

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Elettrica ed Energetica

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Superbonus 110% e riqualificazione energetica nei condomini residenziali: tra aspettative e risultati reali, verso un sistema di incentivazione innovativo



**Politecnico
di Torino**



Relatori

Prof. Enrico FABRIZIO
Thomas CLARI
Ing. Fabiano DI LAZZARO
Ing. Enrico FASANO

Candidato

Mauro Ermes FLORISSI

Luglio 2025

ABSTRACT

Il raggiungimento dell'efficientamento energetico del patrimonio edilizio è un elemento imprescindibile verso la decarbonizzazione dei consumi. L'Unione Europea ha fissato obiettivi stringenti di riduzione delle emissioni di gas serra: -55% al 2030 rispetto ai livelli del 1990, con il traguardo finale della neutralità climatica entro il 2050. In tale contesto, il settore edilizio italiano rappresenta un settore prioritario d'intervento, in quanto responsabile del 40% dei consumi energetici e del 22% delle emissioni di CO₂ complessive. In Italia, la riqualificazione energetica è stata spinta dal Superbonus 110% con l'obiettivo di promuovere interventi di efficienza energetica e potenziamento sismico negli edifici. Inoltre, l'incentivo ha rappresentato uno strumento di stimolo economico in una situazione di crisi dovuta all'emergenza sanitaria.

Per valutare l'effettiva efficacia degli interventi di riqualificazione energetica, realizzati attraverso il Superbonus, sono stati presi in esame tre interventi distinti su edifici condominiali situati nella città di Udine. Per ciascun caso sono stati analizzati i consumi energetici pre e post-retrofit, a partire da dati misurati, distinguendo tra i vettori energetici gas naturale ed energia elettrica. I risparmi complessivi sono stati poi convertiti in energia primaria non rinnovabile e confrontati con quelli teorici, facendo riferimento ai consumi reali pre-intervento e ai valori standard degli APE convenzionali post-intervento. Questo ha permesso di identificare un gap prestazionale.

A valle di questa analisi sono state individuate le principali cause del performance gap. È emerso che gli occupanti, beneficiando di un risparmio economico, tendono a migliorare le proprie condizioni di comfort, con un conseguente incremento dei consumi rispetto alle previsioni progettuali: questo comportamento è noto come *rebound effect*. Inoltre, sono state riscontrate modalità di funzionamento degli impianti diverse da quanto previsto in fase progettuale, fenomeno definito in letteratura come *design vs as-built*. Tali considerazioni sono state supportate sia dall'analisi della firma energetica, sia dai risultati emersi dal questionario di valutazione post-occupazionale, elaborato e adattato al settore residenziale secondo la norma ISO 10551 e ai principi del WELL Building Standard. Il questionario, somministrato in formato sia cartaceo che digitale, è stato utilizzato al fine di valutare la percezione degli utenti sul comfort abitativo interno e sulle variazioni comportamentali rispetto alla situazione pre-retrofit.

Il lavoro si conclude con un'analisi dei costi-benefici finalizzata alla valutazione della sostenibilità economica degli interventi, confrontando il contesto reale del Superbonus con uno scenario senza incentivi. È stato inoltre simulato un ulteriore scenario, basato su un'ipotesi di incentivo "ottimale", calibrato sui risparmi energetici reali, con l'obiettivo di garantire un tempo di ritorno finanziario pari a 10 anni. I risultati ottenuti risultano parzialmente coerenti con le attuali aliquote di incentivazione. Infine, per ottenere una valutazione più completa, è stata introdotta una distinzione tra la quota di investimento legata all'efficientamento energetico e quella destinata a interventi di natura estetica, come il rifacimento della facciata. L'analisi ha considerato, oltre ai risparmi economici, anche benefici aggiuntivi come il miglioramento del comfort abitativo e l'aumento del valore immobiliare.

INDICE

ABSTRACT	II
ELENCO DELLE FIGURE	V
ELENCO DELLE TABELLE	IX
1. INTRODUZIONE	1
1.1 L'IMPORTANZA DELL'EFFICIENTAMENTO ENERGETICO NEL PANORAMA EDILIZIO ITALIANO	1
1.2 STRUTTURA DELLA TESI.....	6
2. QUADRO NORMATIVO: SUPERBONUS, EPBD IV E OLTRE	9
2.1 IL SUPERBONUS 110%: INTRODUZIONE, OBIETTIVI E IMPATTO MACROECONOMICO, SULLA FINANZA PUBBLICA, AMBIENTALE E SOCIALE.....	9
2.1.1 <i>Introduzione al Superbonus 110%</i>	9
2.1.2 <i>Interventi trainanti, interventi trainati e limiti massimi di spesa previsti</i>	9
2.1.3 <i>Chi può usufruirne, uso combinato con altre agevolazioni e requisiti degli interventi</i>	11
2.1.4 <i>Principali risultati del Superbonus</i>	12
2.1.5 <i>Impatti macroeconomici e sulla finanza pubblica del Superbonus</i>	16
2.1.6 <i>Impatto ambientale e sociale del Superbonus</i>	23
2.2 INCENTIVI EDILIZI POST-SUPERBONUS: IL PRESENTE DEGLI INCENTIVI PER LA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA IN ITALIA CON UNO SGUARDO AL FUTURO	29
2.3 DIRETTIVA EPBD IV E IMPATTO PREVISTO SULLE POLITICHE DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA	32
2.3.1 <i>Quadro comune generale per il calcolo della prestazione energetica degli edifici (allegato I)</i>	36
2.4 L'IMPATTO DELLE POLITICHE DI INCENTIVAZIONE SULLA DIFFUSIONE DI NUOVE TECNOLOGIE PER LA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA.	38
2.5 CONFRONTO CON NORMATIVE E INCENTIVI PER LA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA IN ALTRI PAESI EUROPEI.	42
3. METODOLOGIA	47
3.1 INTERPOLAZIONE DI DATI ENERGETICI.....	47
3.2 APPLICAZIONE DI UN PROFILO STAGIONALE PER LA RIPARTIZIONE DEI CONSUMI PRE-INTERVENTO.....	50
3.3 VALUTAZIONE DEI RISPARMI ENERGETICI.....	53
3.4 NORME PER LA VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE DEGLI EDIFICI (RIFERIMENTO ALLA NORMA UNI/TS 11300-1, 2, 4 E 5 E AL DM DEL 26/06/15)	61
3.5 CALCOLO DEL RISPARMIO DI ENERGIA PRIMARIA NON RINNOVABILE ANNUALE.	66
3.6 ANALISI COSTI-BENEFICI.....	69
3.7 REDAZIONE DEL QUESTIONARIO DI POST-OCCUPANCY EVALUATION (POE).	71
4. PRESENTAZIONE DEI TRE CASI STUDIO	75
4.1 CASO STUDIO 1: CONDOMINIO BLU	77
4.1.1 <i>Caratterizzazione dell'involucro edilizio: confronto tra lo stato di fatto e lo stato riqualificato</i>	78
4.1.2 <i>Caratterizzazione delle soluzioni impiantistiche: confronto tra lo stato di fatto e lo stato riqualificato</i>	82
4.2 CASO STUDIO 2: CONDOMINIO ARANCIONE	87
4.2.1 <i>Caratterizzazione dell'involucro edilizio: confronto tra lo stato di fatto e lo stato riqualificato</i>	88
4.2.2 <i>Caratterizzazione delle soluzioni impiantistiche: confronto tra lo stato di fatto e lo stato riqualificato</i>	90
4.3 CASO STUDIO 3: CONDOMINIO VERDE	94

4.3.1	Caratterizzazione dell'involucro edilizio: confronto tra lo stato di fatto e lo stato riqualificato	95
4.3.2	Caratterizzazione delle soluzioni impiantistiche: confronto tra lo stato di fatto e lo stato riqualificato	99
5.	RISULTATI.....	101
5.1	ANALISI ENERGETICA DELLO STATO DI FATTO	101
5.1.1	Determinazione dei consumi energetici per il riscaldamento degli ambienti e per la produzione di ACS pre-retrofit	101
5.2	ANALISI ENERGETICA DELLO STATO DI PROGETTO.....	107
5.2.1	Determinazione dei fabbisogni energetici per il riscaldamento degli ambienti e per la produzione di ACS post-retrofit mediante Edilclima	107
5.3	ANALISI ENERGETICA DELLO STATO RIQUALIFICATO	110
5.3.1	Determinazione dei consumi energetici per il riscaldamento degli ambienti e per la produzione di ACS post-retrofit nel 2023-2024.....	110
5.4	VALUTAZIONE DEI RISPARMI DI GAS NATURALE	116
5.4.1	Normalizzazione rispetto ai GG mensili	116
5.4.2	Firma energetica	121
5.5	VALUTAZIONE DEI RISPARMI DI ENERGIA ELETTRICA.....	139
5.6	VALUTAZIONE COMPLESSIVA DEI RISPARMI DI ENERGIA PRIMARIA NON RINNOVABILE	145
5.7	PERFORMANCE GAP	148
6.	ANALISI ECONOMICA E TARATURA DELLE MISURE INCENTIVANTI.....	153
6.1	INVESTIMENTO INIZIALE E RISPARMIO ECONOMICO	153
6.2	SCENARIO 1 - SUPERBONUS 110%: VALUTAZIONE DELL'INVESTIMENTO CON INCENTIVAZIONE REALE	158
6.3	SCENARIO 2 - NESSUN INCENTIVO: VALUTAZIONE DELL'INVESTIMENTO ALLE CONDIZIONI DI MERCATO ATTUALI.....	160
6.4	SCENARIO 3 - INCENTIVO OTTIMALE: VALUTAZIONE DELL'INVESTIMENTO MEDIANTE TARATURA DELL'INCENTIVAZIONE	161
7.	RISULTATI DEL POST-OCCUPANCY EVALUATION.....	171
7.1	PRESENTAZIONE DEI RISULTATI DEL POE	171
7.2	ANALISI DEI RISULTATI SECONDO UNI EN ISO 10551	176
8.	CONCLUSIONI.....	181
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	186
	APPENDICE A.....	190
	IMPLEMENTAZIONE DEL CODICE VBA IN EXCEL PER L'INTERPOLAZIONE SPLINE CUBICA DEI DATI DI CONSUMO ENERGETICO.....	190
	APPENDICE B.....	192
	QUESTIONARIO DI VALUTAZIONE POST-OCCUPAZIONALE.....	192

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1.1 - Consumi finali di energia per settore in Italia. Fonte: elaborazione ENEA su dati EUROSTAT	2
Figura 1.2 - Consumo energetico per fonte nel settore residenziale italiano dal 2000 al 2022, espresso in Mtep. Fonte: elaborazione ENEA su dati EUROSTAT	3
Figura 1.3 - Distribuzione percentuale degli edifici per destinazione d'uso, secondo la classificazione stabilita dal DPR 412/1993, e per classe energetica, sulla base dell'analisi degli Attestati di Prestazione Energetica (APE) caricati nel SIAPE e rilasciati nel corso del 2023. Fonte: ENEA	4
Figura 2.1 - Investimenti ammessi a detrazione per i lavori conclusi tra il 2021 e il 2024.....	13
Fonte: ENEA	13
Figura 2.2 - Numero di edifici oggetto di intervento nel periodo compreso tra il 2021 e 2024.Fonte: ENEA	13
Figura 2.3 - Distribuzione percentuale delle classi energetiche prima (grafico di sinistra) e dopo (grafico di destra) la realizzazione degli interventi conclusi entro il 31/12/2023. Elaborazione personale su dati ENEA.	16
Figura 2.4 - Possibili scenari di investimenti (in milioni di euro) nel settore residenziale. ...	17
Fonte: OCPI.....	17
Figura 2.5 - Differenza percentuale tra PIL effettivo e PIL senza l'adozione di incentivi.	19
Fonte: OCPI.....	19
Figura 2.6 - Prodotto Interno Lordo e occupati per ripartizione geografica, anno 2023.	20
Fonte: FENEALUIL su dati ISTAT	20
Figura 2.7 - Valutazione degli effetti del Superbonus sul bilancio dello Sato. Fonte: modello ANCE.....	22
Figura 2.8 - Ripartizione per classe energetica degli APE residenziali al 31 dicembre del 2019. Fonte: ENEA	23
Figura 2.9 - Ripartizione per classe energetica degli APE residenziali al 31 dicembre del 2023. Fonte: ENEA..	23
Figura 2.10 - Percentuale dei crediti irregolari relativi ai bonus edilizi. Elaborazione della Camera dei deputati su dati forniti dall' Agenzia delle entrate.	28
Figura 2.11 - Bonus casa 2025: la mappa completa sulle detrazioni per interventi di ristrutturazione edilizia. Fonte: Ingenio	29
Figura 2.12 - Limiti alla detrazione dei bonus edilizi in funzione del reddito. Fonte: InfoBuild.	31
Figura 2.13 - Inefficienza ed emissioni di CO ₂ del parco edilizio europeo. Fonte: BibLus ...	32
Figura 2.14 - Le nuove classi energetiche dell'APE e gli edifici ZEB	37

Figura 2.15 - Super Ecobonus 2023. Ripartizione per tecnologia dei risparmi energetici conseguiti (figura a sinistra) e degli investimenti effettuati (figura a destra) su scala nazionale per gli interventi sugli impianti termici agevolati. Fonte: ENEA	38
Figura 2.16 - Distribuzione per zona climatica dei risparmi energetici connessi a ciascuna tecnologia adottata. Fonte: ENEA	39
Figura 2.17 - Distribuzione dei risparmi energetici per tecnologia adottata, in ciascuna zona climatica	39
Figura 2.18 - Distribuzione regionale dei risparmi energetici conseguiti per tecnologia installata.....	40
Figura 2.19 - Distribuzione delle pompe di calore elettriche rispetto alla potenza installata, per ciascuna zona climatica	40
Figura 3.1 - Consumo termico giornaliero normalizzato per la produzione di acqua calda sanitaria. Fonte: Energy and Building	52
Figura 3.2 - A sinistra è riportato un esempio di firma energetica a tre parametri, mentre a destra è mostrato un esempio di firma energetica a due parametri, basata esclusivamente sui consumi per riscaldamento nei mesi invernali.	57
Figura 4.1 - Modello 3D del condominio Blu realizzato in ambiente Edilclima EC700.	78
Figura 4.2 - Formazione di muffa e condensa interna dovuta ai ponti termici nello stato pre-retrofit.....	79
Figura 4.3 - Vista della facciata est dell'edificio: a sinistra lo stato pre-retrofit, a destra lo stato post-riqualificazione rispetto all'angolo nord-est.....	81
Figura 4.4 - Vista della facciata ovest dell'edificio: a sinistra lo stato pre-retrofit, a destra lo stato post-riqualificazione rispetto all'angolo nord-ovest.	81
Figura 4.5 - Vista d'angolo della facciata sud-est: a sinistra lo stato pre-retrofit, a destra lo stato post-riqualificazione.	82
Figura 4.6 - Vista della facciata ovest: a sinistra lo stato pre-retrofit, a destra lo stato post-retrofit.....	82
Figura 4.7 - A sinistra sono visibili due immagini della caldaia tradizionale pre-retrofit, a destra sono presenti le due caldaie modulari a condensazione installate dopo la riqualificazione.....	84
Figura 4.8 - La centrale termica nello stato antecedente agli interventi è visibile a sinistra, mentre a destra è riportata la configurazione successiva alla riqualificazione.	85
Figura 4.9 - A sinistra è visibile l'impianto fotovoltaico, mentre a destra sono mostrati i collettori solari termici, entrambi installati sulla copertura del condominio.....	86
Figura 4.10 - Modello 3D del condominio Arancione realizzato con il software Edilclima EC700, a sinistra è visibile la vista assonometrica SE, a destra quella NE.	88
Figura 4.11 - Pianta del primo piano del condominio Arancione.	88
Figura 4.12 - Posa della doppia pannellatura in XPS nel sottotetto.	89
Figura 4.13 - Centrale termica: confronto tra stato pre (a sinistra) e post riqualificazione (a destra).....	92
Figura 4.14 - Pompa di calore esterna con barriera acustica (a destra).	92

Figura 4.15 - Vista della copertura con impianto fotovoltaico e impianto solare termico nei due sottocampi.....	94
Figura 4.16 - Modello 3D del condominio Verde in ambiente Edilclima.	95
Figura 4.17 - Vista della facciata nord dell'edificio: a sinistra lo stato pre-retrofit, a destra lo stato post-retrofit rispetto all'angolo nord-ovest.	97
Figura 4.18 - Vista della facciata laterale con orientamento a ovest	98
Figura 4.19 - Vista della facciata sud del condominio prima degli interventi di riqualificazione	98
Figura 4.20 - Vista della facciata sud del condominio dopo gli interventi di riqualificazione	99
Figura 4.21 - Centrale termica per il riscaldamento centralizzato del condominio Verde ..	100
Figura 5.1 - Confronto consumi reali pre-retrofit e temperatura esterna per il condominio Blu.	104
Figura 5.2 - Confronto consumi reali pre-retrofit e temperatura esterna per il condominio Arancione.	104
Figura 5.3 - Confronto consumi reali pre-retrofit e temperatura esterna per il condominio Verde.	105
Figura 5.4 - Confronto consumi reali post-retrofit e temperatura esterna per il condominio Blu.	111
Figura 5.5 - Confronto consumi reali post-retrofit e temperatura esterna per il condominio Arancione.	113
Figura 5.6 - Confronto consumi reali post-retrofit e temperatura esterna per il condominio Verde.	114
Figura 5.7 - Consumi normalizzati pre e post-retrofit nel condominio Blu.	120
Figura 5.8 - Consumi normalizzati pre e post-retrofit nel condominio Arancione.	121
Figura 5.9 - Consumi normalizzati pre e post-retrofit nel condominio Verde.	121
Figura 5.10 - Modello di firma energetica pre-retrofit a 2-P relativo al condominio Blu. ..	123
Figura 5.11 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit a 2-P relativo al condominio Blu.	125
Figura 5.12 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit: evidenza della curvatura nei modelli di regressione polinomiale.	126
Figura 5.13 - Confronto tra firma energetica pre, post-retrofit reale e post-retrofit da relazione di progetto.	127
Figura 5.14 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit a 3-P relativo al condominio Blu.	128
Figura 5.15 - Modello di firma energetica pre-retrofit a 2-P relativo al condominio Arancione.	129
Figura 5.16 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit a 2-P relativo al condominio Arancione.	130

Figura 5.17 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit: evidenza della curvatura nei modelli di regressione polinomiale.	131
Figura 5.18 - Confronto tra firma energetica pre-retrofit, post-retrofit reale e post-retrofit da relazione di progetto.	132
Figura 5.19 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit a 3-P relativo al condominio Arancione.	133
Figura 5.20 - Modello di firma energetica pre-retrofit a 2-P relativo al condominio Verde.	134
Figura 5.21 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit a 2-P relativo al condominio Verde.	135
Figura 5.22 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit: evidenza della curvatura nei modelli di regressione polinomiale.	135
Figura 5.23 - Confronto tra firma energetica pre-retrofit, post-retrofit reale e post-retrofit da relazione di progetto.	136
Figura 6.1 - Scenario 1: Superbonus 110%.	159
Figura 6.2 - Scenario 2: nessuna incentivazione.	161
Figura 6.3 - Scenario 3: incentivazione ottimale.	163

ELENCO DELLE TABELLE

<i>Tabella 1.1 - Emissioni dei gas a effetto serra in Mt di CO₂ equivalente. Fonte: ISPRA</i>	3
<i>Tabella 2.1 - Dati nazionali riepilogativi del Super Ecobonus al 31/12/2024. Fonte: ENEA</i>	14
<i>Tabella 2.2 - Impatto del Superbonus sull'indebitamento netto. Fonte: Camera dei deputati su elaborazione dati ISTAT</i>	20
<i>Tabella 2.3 - Impatto del Superbonus sul debito pubblico. Fonte: Camera dei deputati su elaborazione dati ISTAT</i>	20
<i>Tabella 2.4 - Risparmio energetico medio a seguito degli interventi di ristrutturazione energetica. Elaborazione personale da analisi Gabetti</i>	25
<i>Tabella 2.5 - Traiettorie degli obiettivi in termini di tasso annuo di riqualificazione. Fonte: elaborazione PNIEC su dati ENEA</i>	26
<i>Tabella 2.6 - Classificazione energetica secondo lo standard CasaClima. Fonte: BibLus</i>	34
<i>Tabella 3.1 - Distribuzione percentuale mensile per la stima del consumo di ACS nei mesi non estivi</i>	52
<i>Tabella 3.2 - Fattori di conversione in energia primaria dei vettori energetici. Fonte: DM 26/06/2015</i>	65
<i>Tabella 4.1 - Temperature esterne medie mensili in °C</i>	76
<i>Tabella 4.2 - Miglioramento della trasmittanza termica dei componenti opachi</i>	80
<i>Tabella 4.3 - Miglioramento della trasmittanza termica del soffitto verso l'ambiente non climatizzato</i>	89
<i>Tabella 4.4 - Miglioramento della trasmittanza termica dei componenti opachi e trasparenti</i>	96
<i>Tabella 5.1 - Consumi mensili di gas metano nel periodo pre-retrofit per il condominio Blu suddivisi tra RSC e ACS</i>	103
<i>Tabella 5.2 - Consumi mensili di gas metano nel periodo pre-retrofit per il condominio Arancione suddivisi tra RSC e ACS</i>	104
<i>Tabella 5.3 - Consumi mensili di gas metano nel periodo pre-retrofit per il condominio Verde suddivisi tra RSC e ACS</i>	105
<i>Tabella 5.4 - Consumi annuali normalizzati del condominio Blu (ottobre 2016 - settembre 2018)</i>	106
<i>Tabella 5.5 - Consumi annuali normalizzati del condominio Arancione (ottobre 2015 - settembre 2018)</i>	106
<i>Tabella 5.6 - Consumi annuali normalizzati del condominio Verde (ottobre 2016 - settembre 2021)</i>	107
<i>Tabella 5.7 - Consumi di gas metano definiti da progetto post-retrofit</i>	107
<i>Tabella 5.8 - Consumi di energia elettrica definiti da progetto post-retrofit</i>	108
<i>Tabella 5.9 - Consumi di gas metano definiti da progetto post-retrofit</i>	108

Tabella 5.10 - Consumi di energia elettrica definiti da progetto post-retrofit.	109
Tabella 5.11 - Consumi di gas metano definiti da progetto post-retrofit	109
Tabella 5.12 - Consumi di gas metano misurati post-retrofit nel periodo 2023-2024.	111
Tabella 5.13 - Consumi di energia elettrica della PDC misurati post-retrofit nel periodo 2023-2024.	111
Tabella 5.14 - Confronto tra assorbimenti della PDC e produzione FTV nel periodo 2023-2024.	112
Tabella 5.15 - Consumi di gas metano misurati post-retrofit nel periodo 2023-2024.	113
Tabella 5.16 - Confronto tra assorbimenti della PDC e produzione FTV nel periodo 2023-2024.	113
Tabella 5.17 - Consumi di gas metano misurati post-retrofit nel periodo 2023-2024.	115
Tabella 5.18 - Riepilogo dei consumi di gas metano reali normalizzati post-retrofit nel periodo 2023-2024.	115
Tabella 5.19 - Modello di baseline pre-retrofit: consumi normalizzati per il condominio Blu.	118
Tabella 5.20 - Modello di baseline post-retrofit: consumi normalizzati per il condominio Blu.	118
Tabella 5.21 - Modello di baseline pre-retrofit: consumi normalizzati per il condominio Arancione.	118
Tabella 5.22 - Modello di baseline post-retrofit: consumi normalizzati per il condominio Arancione.	119
Tabella 5.23 - Modello di baseline pre-retrofit: consumi normalizzati per il condominio Verde.	119
Tabella 5.24 - Modello di baseline post-retrofit: consumi normalizzati per il condominio Verde.	119
Tabella 5.25 - Riepilogo dei risparmi assoluti e percentuali per i diversi interventi, utilizzando la normalizzazione dei consumi.	120
Tabella 5.26 - Metriche di errore per i modelli pre-retrofit.	137
Tabella 5.27 - Metriche di errore per i modelli post-retrofit.	137
Tabella 5.28 - Riepilogo dei risparmi assoluti e percentuali per i diversi interventi, utilizzando la firma energetica.	138
Tabella 5.29 - Consumi di energia elettrica pre-retrofit, condominio Blu.	143
Tabella 5.30 - Consumi di energia elettrica post-retrofit, condominio Blu.	143
Tabella 5.31 - Bilancio mensile di energia elettrica post-retrofit, condominio Blu.	143
Tabella 5.32 - Consumi di energia elettrica pre-retrofit, condominio Arancione.	144
Tabella 5.33 - Consumi di energia elettrica post-retrofit, condominio Arancione.	144
Tabella 5.34 - Bilancio mensile di energia elettrica post-retrofit, condominio Arancione. ..	144
Tabella 5.35 - Riepilogo dei risparmi assoluti e percentuali di energia elettrica.	145

<i>Tabella 5.36 - Stima dei risparmi di energia primaria, specifici ed emissioni di CO₂ evitate.</i>	146
<i>Tabella 5.37 - Confronto tra risparmi energetici e ambientali stimati tramite APE e reali misurati.</i>	148
<i>Tabella 5.38 - Valutazione del performance gap per diversi indicatori, nel caso di post-retrofit.</i>	150
<i>Tabella 6.1 - Quadro economico degli interventi realizzati nel condominio Blu.</i>	154
<i>Tabella 6.2 - Quadro economico degli interventi realizzati nel condominio Arancione.</i>	155
<i>Tabella 6.3 - Quadro economico degli interventi realizzati nel condominio Verde.</i>	155
<i>Tabella 6.4 - Riepilogo risparmi economici.</i>	158
<i>Tabella 6.5 - Indicatori economici scenario 1.</i>	159
<i>Tabella 6.6 - Indicatori economici scenario 2.</i>	161
<i>Tabella 6.7 - Indicatori economici scenario 3.</i>	163
<i>Tabella 6.8 - Indicatori economici scenario 3 più realistico.</i>	166
<i>Tabella 7.1 - Sintesi dei risultati ottenuti: media aritmetica e percentuale di soddisfazione.</i>	177

1. INTRODUZIONE

1.1 L'importanza dell'efficientamento energetico nel panorama edilizio italiano

L'efficienza energetica in edilizia rappresenta oggi un tema centrale, sia sul piano nazionale che europeo. Diversi sono i motivi che conferiscono a tale argomento questa rilevanza, primo fra tutti l'urgenza di rispondere ai cambiamenti climatici, causati principalmente da attività umane, quali l'uso prevalente di fonti fossili, da cui oggi dipendiamo fortemente, e l'aumentare della deforestazione. A questo si aggiunge il rischio che, entro il 2050, le risorse fossili economicamente accessibili, ovvero recuperabili a un costo non superiore al doppio di quello attuale, possano esaurirsi ^[1]. Infine, ma altrettanto importante, la necessità di indirizzare la società verso uno sviluppo sostenibile e un miglioramento del comfort abitativo.

Dal 1950 la concentrazione atmosferica di gas serra ha raggiunto livelli mai registrati negli ultimi 800.000 anni ^[2]. Parallelamente, la temperatura media globale ha subito un evidente incremento: nel periodo compreso tra il 1880 e il 2012, la superficie terrestre e quella degli oceani hanno registrato un aumento di circa 0,85 °C. Anche lo scioglimento dei ghiacciai è ormai osservabile visivamente. Le previsioni climatiche per l'anno 2100 delineano scenari preoccupanti: secondo numerosi studi scientifici ^[2], infatti, senza una significativa riduzione delle emissioni di gas serra entro la fine del XXI secolo, le conseguenze per il nostro pianeta saranno irreversibili. Tra il 2000 e il 2010, le emissioni globali di CO₂ e degli altri gas serra sono cresciute mediamente del 2,2% all'anno, un incremento significativo rispetto al periodo 1970-2000, in cui la crescita media annua era stata pari all'1,3%. Le principali cause dell'incremento delle emissioni sono da ricondurre all'aumento della popolazione mondiale e alla crescita economica ^[2].

◆ Consumi energetici nel settore civile

La riduzione della dipendenza da fonti fossili e la diminuzione dei consumi energetici rappresentano gli obiettivi principali, sia per l'Italia sia per l'intera Europa, per porre le basi verso una società decarbonizzata. Le opportunità per ottenere elevati risparmi energetici sono numerose, ma è certamente più efficace concentrarsi sui settori caratterizzati da consumi energetici particolarmente elevati, primo fra tutti quello dell'edilizia ^[3].

Osservando la distribuzione dei consumi energetici negli anni 2000 e 2022 in **Figura 1.1** ^[3], tratto dal Rapporto Annuale sull'Efficienza Energetica pubblicato a dicembre 2024 e redatto dall'agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA), emerge chiaramente come il settore degli usi civili sia stato l'unico a registrare una crescita significativa, assorbendo nel 2022 il 39,7% dei consumi finali, corrispondente ad un valore di circa 46 Mtep¹ annui. La distribuzione dei consumi energetici per settore riflette i profondi cambiamenti che hanno coinvolto il sistema produttivo italiano negli ultimi decenni. Nel 2000, infatti, i tre settori principali (usi civili, industria e trasporti) avevano ciascuno una

¹ Mtep è l'acronimo di milioni di tonnellate equivalenti di petrolio

quota simile, prossima al 30%. Al contrario, nel 2022 gli usi civili si collocano al primo posto, evidenziando la crescente importanza che ha assunto il settore terziario a discapito di quello industriale, la cui percentuale è scesa fino al 21,1%.

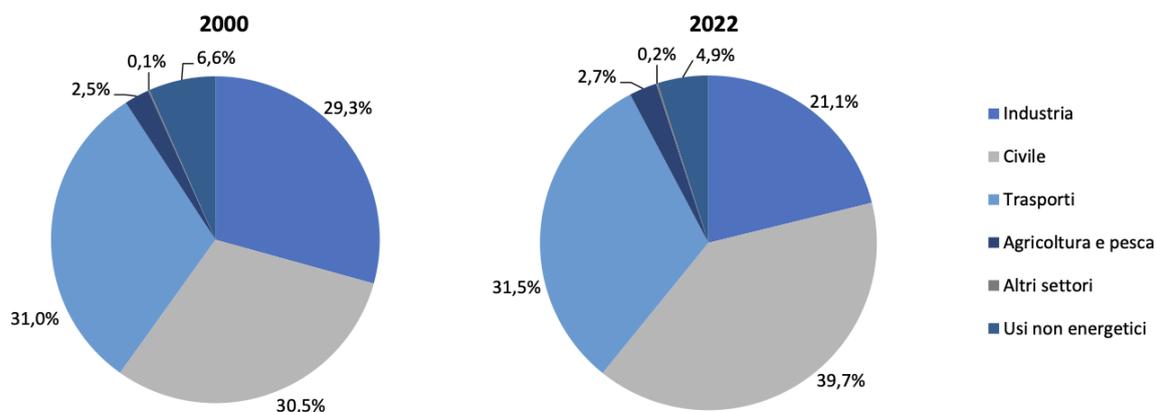


Figura 1.1 - Consumi finali di energia per settore in Italia. Fonte: elaborazione ENEA su dati EUROSTAT

Nel 2022, i consumi energetici del settore residenziale, inclusi all'interno degli usi civili, hanno raggiunto i 30 Mtep, registrando una diminuzione del 10% rispetto all'anno precedente. Come si riporta in **Figura 1.2** le principali fonti energetiche utilizzate nel settore residenziale sono il gas naturale con circa il 50% del consumo complessivo, l'energia elettrica con il 18% e i biocombustibili solidi con circa il 20%. Nel 2022, il diminuire dei consumi ha coinvolto proprio queste fonti, insieme al GPL, registrando una decrescita significativa rispetto all'anno precedente. Le fonti energetiche rinnovabili come il solare termico, la geotermia e le pompe di calore hanno mostrato una crescita considerevole, ma continuano a restare marginali rispetto al totale dei consumi. Nel periodo 2000-2022, i consumi energetici del settore residenziale sono aumentati complessivamente dell'9,2%. Questo andamento riflette due fasi: una crescita fino all'anno 2010 seguita da una fase di calo, con un picco negativo nel 2014, dovuta all'effetto combinato di normative sull'efficienza energetica degli edifici (requisiti minimi per le nuove costruzioni e in seguito anche per gli interventi di ristrutturazione importante) e degli incentivi economici per la riqualificazione energetica ^[3].

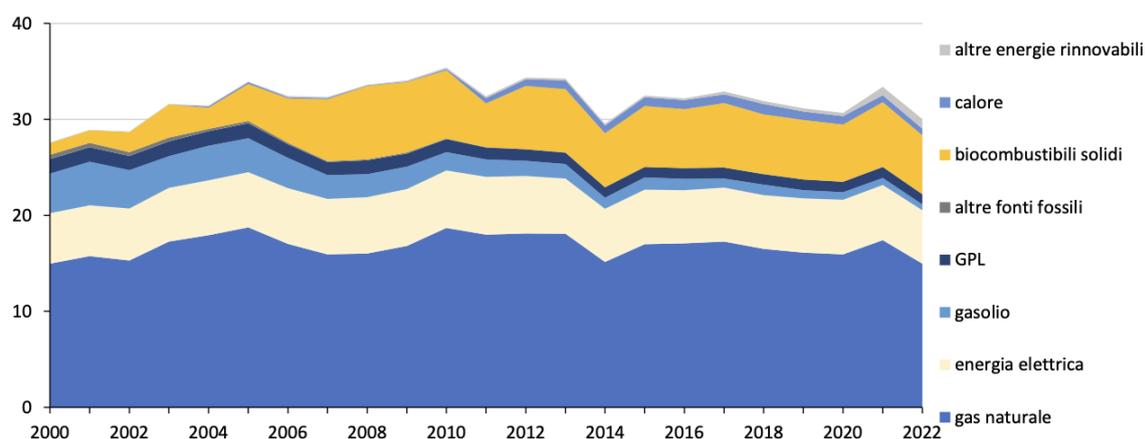


Figura 1.2 - Consumo energetico per fonte nel settore residenziale italiano dal 2000 al 2022, espresso in Mtep. Fonte: elaborazione ENEA su dati EUROSTAT

Si evidenzia come la diminuzione dei consumi energetici nel settore civile è stata ottenuta attraverso l'implementazione di misure di efficienza energetica nel settore delle costruzioni, attraverso le quali si è potuto garantire un approvvigionamento energetico sostenibile e una riduzione delle emissioni di gas serra. Inoltre, è stato possibile ottenere un aumento della sicurezza energetica, con una conseguente riduzione dei costi legati alle importazioni di energia e, quindi, un rafforzamento della competitività economica del nostro paese. Anche il contributo del settore degli usi civili alle emissioni di gas a effetto serra (**Tabella 1.1**) risulta particolarmente rilevante: esso rappresenta circa il 22% del totale delle emissioni legate agli usi energetici.

	1990	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
DA USI ENERGETICI, di cui:	426	488	430	360	356	351	346	336	300	332	338
Industrie energetiche	138	160	137	106	105	105	96	92	82	86	95
Industrie manifatturiere e costruzioni	92	92	70	56	54	53	54	50	46	55	55
Trasporti	102	128	116	107	106	102	105	106	87	103	110
Civile	79	96	96	82	83	83	84	81	79	82	73
Altro energia e fuggitive	15	12	10	9	8	8	8	7	7	6	6

Tabella 1.1 - Emissioni dei gas a effetto serra in Mt di CO₂ equivalente. Fonte: ISPRA

Questo evidenzia come gli edifici, attraverso i consumi per riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, illuminazione e altri servizi, costituiscano una delle principali cause di emissione di gas serra, sottolineando ancora una volta la necessità di intraprendere decisioni mirate al miglioramento dell'efficienza energetica e alla riduzione dell'impatto ambientale.

◆ La consistenza del parco edilizio italiano

Il numero di edifici a destinazione residenziale in Italia è pari a circa 12,42 milioni ^[4], mentre le abitazioni complessive ammontano a circa 35 milioni, di cui oltre 25 milioni risultano effettivamente occupate. Un dato significativo riguarda l'epoca di costruzione del patrimonio

edilizio: più del 65% degli edifici residenziali ha oltre 45 anni, essendo stato costruito prima del 1976, anno di introduzione della prima legge nazionale sul risparmio energetico, che ha introdotto norme per la riduzione dei consumi negli edifici.

Come indicato dal Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica (SIAPE), sviluppato e gestito integralmente da ENEA ^[3], in attuazione del Decreto del 26 giugno 2015, la quota di edifici nelle classi energetiche peggiori (F e G) è scesa al di sotto del 50%, registrando una diminuzione del 6,2% rispetto al 2022 (**Figura 1.3**).

Tale piattaforma costituisce il database energetico nazionale, nel quale vengono raccolti e archiviati gli Attestati di Prestazione Energetica (APE) emessi all'interno del territorio.

La **Figura 1.3** evidenzia un miglioramento complessivo delle prestazioni energetiche nella maggior parte delle categorie edilizie, gli edifici adibiti ad attività sanitarie (E.3), invece, registrano una diminuzione del 2,9% nelle classi energetiche più elevate (da B ad A4). Questo dato conferma, nuovamente, che gli interventi di efficientamento energetico hanno contribuito ad un innalzamento generale della prestazione energetica degli edifici. Tuttavia, il fatto che circa il 50% del patrimonio immobiliare appartenga ancora alle classi energetiche peggiori (F e G), evidenzia come la strada verso una riqualificazione profonda sia ancora lunga e indispensabile per raggiungere gli obiettivi imposti dalla nuova Direttiva sull'efficienza energetica degli edifici (EPBD IV), che verrà discussa nei seguenti capitoli.

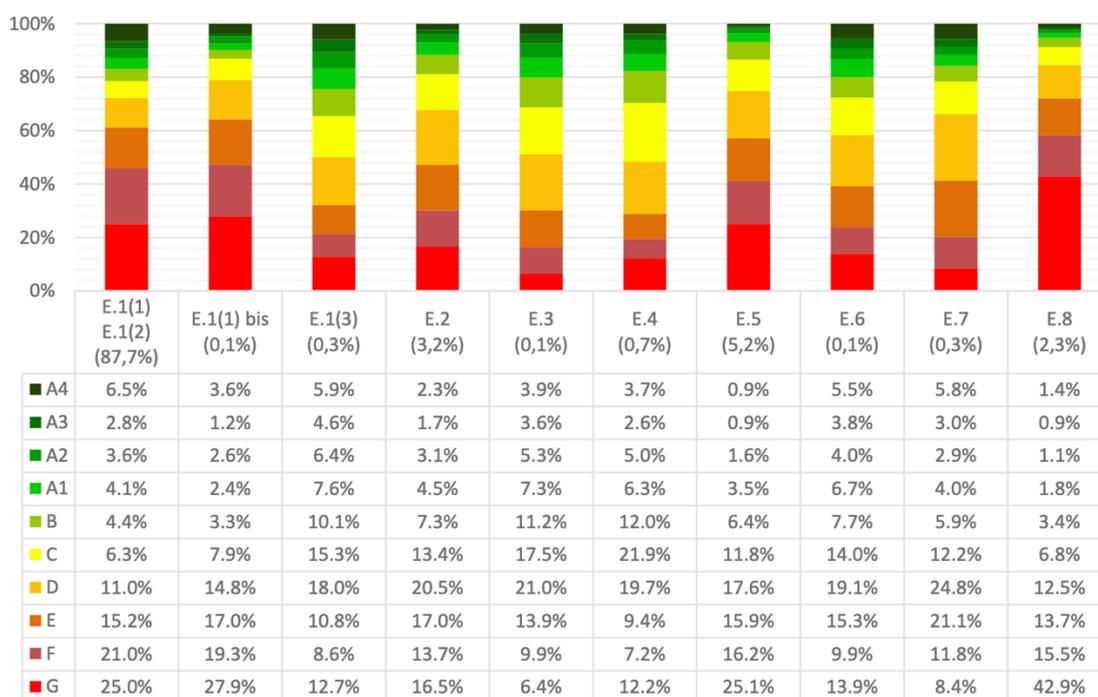


Figura 1.3 - Distribuzione percentuale degli edifici per destinazione d'uso, secondo la classificazione stabilita dal DPR 412/1993, e per classe energetica, sulla base dell'analisi degli Attestati di Prestazione Energetica (APE) caricati nel SIAPE e rilasciati nel corso del 2023. Fonte: ENEA

L'introduzione di strumenti finanziari come il Superbonus ha contribuito a rimuovere gli ostacoli economici che limitavano il diffondersi dell'efficientamento energetico nel settore edilizio. Tra le iniziative più rilevanti adottate in Italia, il Superbonus 110% si è distinto come

la misura più innovativa, capace di incentivare in modo concreto e forse, troppo generoso, la riqualificazione energetica del patrimonio immobiliare, offrendo vantaggi ai beneficiari e sostenendo il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità fissati a livello europeo.

◆ **Scopo del lavoro**

Il seguente lavoro propone di analizzare in maniera approfondita, sulla base dei consumi reali pre e post-retrofit, gli effetti dell'efficientamento energetico su edifici condominiali oggetto di interventi agevolati tramite il Superbonus 110%.

Le prestazioni energetiche degli edifici verranno confrontate tra quelle antecedenti e quelle successive agli interventi di riqualificazione, al fine di quantificare il risparmio energetico ottenuto, utilizzando la *firma energetica* per neutralizzare gli effetti del clima. Successivamente, le prestazioni reali post-intervento saranno messe a confronto con i valori di progetto, calcolati secondo la norma *UNI/TS 11300* e mediante l'utilizzo del software Edilclima, per verificare in che misura le prestazioni reali si avvicinino a quelle previste in fase progettuale, facendo un'analisi di *Performance Gap*.

Oltre all'analisi dei consumi energetici e alla valutazione dei risparmi ottenuti, sia in termini di efficienza energetica che di riduzione delle emissioni, lo studio approfondisce anche gli impatti economici attraverso un'analisi dei costi-benefici. Parallelamente, vengono presi in considerazione anche gli effetti sociali degli interventi realizzati, somministrando un questionario di *valutazione post-occupazione (POE)*, elaborato per raccogliere il grado di soddisfazione generale degli occupanti, e, di come questo è cambiato dopo la realizzazione degli interventi.

L'efficientamento energetico indubbiamente comporta numerosi benefici dal punto di vista dei risparmi ottenuti, ma è importante chiedersi se i risultati ottenuti siano realmente in linea con quanto previsto in fase di progetto. In altre parole: le prestazioni energetiche stimate sono state effettivamente raggiunte o si poteva fare meglio?

La carenza di analisi sui risultati effettivi post-intervento, in particolare sugli edifici condominiali, rappresenta un'importante lacuna nella letteratura scientifica. Questo studio tenta di colmare tale mancanza, offrendo una valutazione dei benefici reali ottenuti e delle eventuali problematiche incontrate nell'attuazione degli interventi.

In letteratura sono disponibili numerosi studi che valutano i risparmi energetici teorici grazie al Superbonus 110%, attraverso gli APE pre e gli APE post-intervento. Tuttavia, il presente lavoro si distingue per il suo approccio: grazie alla disponibilità di dati reali post-intervento, riferiti al periodo che va da ottobre 2023 a settembre 2024, è possibile valutare effettivamente il risparmio energetico conseguito. Confrontando tali risultati con le stime progettuali elaborate secondo la normativa *UNI/TS 11.300*, il lavoro consente ulteriormente di fare un'analisi di *Performance Gap* e di verificare l'effettiva efficacia degli interventi incentivati dal Superbonus.

Verranno analizzati tre casi studio, relativi ad altrettanti interventi di riqualificazione energetica realizzati su tre condomini diversi:

- **Condominio Blu**, costituito da 30 unità abitative, ha beneficiato di un intervento combinato che ha previsto la sostituzione del vecchio generatore di calore con un sistema ibrido (pompa

di calore abbinata a due caldaie a condensazione) e l'isolamento termico dell'involucro edilizio;

- **Condominio Arancione**, costituito da 19 unità abitative, è stato oggetto della sostituzione dell'impianto di riscaldamento con un sistema ibrido (pompa di calore abbinata a due caldaie a condensazione), e del solo isolamento del sottotetto;
- **Condominio Verde**, costituito da 12 unità abitative, ha invece beneficiato esclusivamente di interventi sull'involucro edilizio: isolamento termico delle pareti perimetrali, della copertura e parziale sostituzione dei serramenti.

Le analisi di questi tre casi studio consentiranno la valutazione dell'efficacia dei diversi interventi, con riferimento al miglioramento delle prestazioni energetiche e alla riduzione delle emissioni. Particolare attenzione viene posta al confronto tra i risultati effettivamente ottenuti post-intervento e quelli stimati in fase progettuale (APE-post), al fine di verificare la coerenza tra le previsioni e i risultati ottenuti rispetto alla tipologia di intervento effettuato, e fornire una misura più realistica dell'impatto energetico e ambientale degli interventi realizzati.

1.2 Struttura della tesi

La presente tesi si compone di dieci capitoli, l'obiettivo principale del lavoro è analizzare l'efficacia reale degli interventi di riqualificazione energetica incentivati dal Superbonus 110%, valutando il risparmio energetico conseguito, il divario rispetto alle stime progettuali, gli impatti economici e sulla soddisfazione generale degli occupanti. Successivamente al capitolo introduttivo, il lavoro si articola nei seguenti capitoli.

Capitolo 2 – Quadro normativo: Superbonus, EPBD IV e oltre

Viene analizzato in dettaglio il quadro normativo relativo al Superbonus 110%, con un focus sugli impatti macroeconomici, ambientali e sociali, nonché sulle conseguenze per la finanza pubblica. Si approfondiscono le normative successive al Superbonus, attualmente in vigore per la riqualificazione energetica, evidenziando come il mercato edilizio si trovi oggi in una fase di rallentamento. Segue un'analisi della nuova Direttiva EPBD IV e delle sue implicazioni sulle future politiche nazionali. Infine, si esamina l'effetto degli incentivi sulla diffusione delle tecnologie, con particolare attenzione alle pompe di calore elettriche di piccola taglia per uso domestico, e viene proposto un confronto sintetico con gli incentivi simili adottati nei principali Paesi europei.

Capitolo 3 – Metodologia

Vengono presentati gli strumenti e i riferimenti normativi utilizzati per lo svolgimento delle analisi. Si definiscono i metodi di interpolazione per l'elaborazione dei dati energetici e le norme tecniche di riferimento (*UNI/TS 11300 parte 1, 2, 4 e 5*) per la valutazione dei fabbisogni termici e di energia primaria. Si introduce la *firma energetica* per la valutazione del risparmio effettivo e il metodo di analisi del *performance gap*, utile per confrontare consumi reali e previsioni di progetto. Viene inoltre considerata la norma *UNI EN 15459* per l'analisi economica degli interventi, e la *ISO 10551* per la redazione del questionario di valutazione post-

occupazione (POE), la quale si dimostrerà utile al fine di costruire scale di giudizio soggettive. Chiude il capitolo l'analisi dei costi-benefici, utile a individuare strategie di incentivazioni ottimali e tarate sui risparmi effettivamente ottenuti.

Capitolo 4 – Presentazione dei tre casi studio

In questo capitolo si descrivono in dettaglio i tre casi studio analizzati, relativi a edifici condominiali oggetto di riqualificazione. Per ciascun edificio vengono illustrate: la localizzazione e le caratteristiche generali, lo stato pre-intervento e le soluzioni adottate in fase di riqualificazione, sia per l'involucro edilizio che per il sistema impiantistico.

Capitolo 5 – Risultati

Viene svolta un'analisi energetica approfondita, articolata in quattro fasi:

1. Analisi dei consumi pre-intervento per riscaldamento e produzione di ACS, con normalizzazione climatica e confronto tra i periodi.
2. Analisi dello stato di progetto, con calcolo dei fabbisogni termici secondo normativa *UNI/TS 11300*.
3. Analisi dei consumi post-intervento nell'anno 2023-2024, anch'essi normalizzati rispetto al clima.
4. Attraverso l'adozione della *firma energetica* si stimeranno i risparmi effettivi di gas naturale neutralizzando l'effetto del clima, si valuteranno i risparmi di energia elettrica e successivamente quelli di energia primaria non rinnovabile complessivi. L'analisi consentirà di identificare la presenza di un *Performance Gap* che consentirà di valutare l'efficacia degli interventi rispetto a quanto previsto in fase progettuale. Si include anche una breve riflessione sul fenomeno del *Rebound Effect*.

Capitolo 6 – Analisi economica e taratura delle misure incentivanti

Questo capitolo è dedicato alla valutazione economica degli interventi tramite l'analisi dei costi benefici e la normativa *UNI EN 15459*. Si analizzeranno le spese sostenute per la realizzazione degli interventi grazie al Superbonus 110%, si stimerà il periodo di ritorno dell'investimento (PBT), il valore attuale netto (VAN) e l'indice di profitto (IP). L'analisi verrà condotta su diversi scenari, evidenziando come l'accesso al Superbonus rappresenti una scelta economicamente vantaggiosa, mentre la realizzazione degli stessi interventi in assenza di incentivi risulti non sostenibile dal punto di vista economico. Successivamente, verrà individuata un'aliquota incentivante "ottimale", calibrata per rendere gli interventi sostenibili anche senza un supporto integrale delle spese come il Superbonus 110%. Infine, oltre ai benefici economici legati alla riduzione delle spese in bolletta, verranno valutati anche i vantaggi ambientali, l'incremento del valore dell'immobile, il miglioramento delle condizioni di comfort interno e la riduzione delle emissioni di gas climalteranti.

Capitolo 7 – Risultati del Post-Occupancy Evaluation (POE)

Vengono presentati i risultati del questionario di valutazione post-intervento, costruito sulla base della norma *ISO 10551* riguardante le scale di giudizio soggettive e, sul protocollo *WELL Building Standard* per edifici residenziali. I dati raccolti riguardano il confronto tra il comfort degli occupanti prima e dopo la riqualificazione. L'analisi permette di affiancare alla valutazione oggettiva basata sui consumi reali, una verifica soggettiva basata sulla soddisfazione del comfort da parte degli occupanti, offrendo così una visione più completa degli effetti degli interventi da più punti di vista.

Capitolo 8 – Conclusioni

Il capitolo finale offre una sintesi dei risultati raggiunti più significativi e, propone alcune riflessioni sulle prospettive future delle politiche di incentivazione per la riqualificazione energetica in Italia.

2. QUADRO NORMATIVO: SUPERBONUS, EPBD IV E OLTRE

2.1 Il superbonus 110%: introduzione, obiettivi e impatto macroeconomico, sulla finanza pubblica, ambientale e sociale.

Il Superbonus 110% è una misura di incentivazione edilizia che consiste in una detrazione pari al 110% sull'imposta lorda delle spese sostenute a partire dal 1° luglio del 2020, ed è applicabile nel caso in cui si eseguano interventi volti al miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici esistenti o a potenziare la loro sicurezza sismica. La seguente analisi sul Superbonus sarà affrontata con un approccio mirato verso i condomini residenziali, oggetto della tesi, concentrandosi sugli aspetti tecnici applicabili agli edifici analizzati.

2.1.1 Introduzione al Superbonus 110%

Il Superbonus viene concesso per le spese sostenute relative a interventi realizzati su parti comuni di edifici, su unità immobiliari funzionalmente indipendenti con uno o più accessi autonomi dall'esterno, unità immobiliari all'interno di edifici plurifamiliari e singole unità immobiliari.

L'aliquota di detrazione delle spese sostenute per interventi specifici di efficientamento energetico, riduzione del rischio sismico, installazione di impianti fotovoltaici e infrastrutture per la ricarica dei veicoli elettrici negli edifici è stata incrementata al 110% con il decreto-legge n. 34 del 2020 noto anche come “*Decreto Rilancio*”.

Il Superbonus, insieme agli altri bonus già in vigore, incrementa una detrazione al 110% delle spese per gli interventi di recupero del patrimonio edilizio (Sismabonus) e di riqualificazione energetica degli edifici (Ecobonus), per i quali le detrazioni passavano da un 50% ad un 85% delle spese sostenute. La validità del Superbonus è stata estesa dalla legge di bilancio del 2022; nello specifico l'agevolazione è stata riconosciuta fino al 31 dicembre 2025 con aliquote variabili nel tempo: se le spese sono state sostenute entro il 31 dicembre del 2023 la detrazione spettante resterà pari al 110%, per quelle effettuate nel 2024 diminuirà al 70% e infine per quelle del 2025, l'imposta si attesterà al 65% solamente se al 15 ottobre 2024 risulta presentata la comunicazione di inizio lavori asseverata (CILA) e, soddisfatti ulteriori requisiti.

2.1.2 Interventi trainanti, interventi trainati e limiti massimi di spesa previsti

Lo schema di incentivazione distingue tra due diverse tipologie di interventi: interventi principali o “trainanti” e interventi aggiuntivi o “trainati” ^[5]. I primi risultano essenziali per poter beneficiare della detrazione del 110% a condizione che le spese siano documentate e restino effettivamente a carico del contribuente, mentre le seconde sono secondarie e non vincolanti.

Nei casi studio analizzati, l'accesso alla detrazione è avvenuto esclusivamente attraverso interventi principali finalizzati al miglioramento dell'efficienza energetica, escludendo quindi ogni operazione di tipo antisismico.

◆ **Interventi trainanti**

Le tipologie di intervento considerate “*Trainanti*” sono complessivamente tre ^[6]. Il primo tra questi interventi prevede l'isolamento termico dell'involucro edilizio, ovvero delle superfici opache verticali, orizzontali e inclinate, per una porzione superiore al 25% della superficie disperdente lorda dell'edificio o dell'unità abitativa, qualora funzionalmente indipendente e provvista di almeno un accesso autonomo. I materiali isolanti utilizzati devono essere conformi ai criteri ambientali minimi stabiliti dal decreto ministeriale dell'11 ottobre 2017.

Per queste tipologie di intervento il contributo spettante è calcolato sulla base di un massimale di spesa variabile a seconda del numero di unità immobiliari che compongono l'edificio: 50.000 euro per edifici unifamiliari o unità funzionalmente indipendenti, 40.000 euro moltiplicata ciascuna unità negli edifici composti da 2 a 8 unità immobiliari, e 30.000 euro moltiplicato ogni unità nel caso di edificio composto da più di 8 unità. Ad esempio, nel caso di condominio composto da 20 unità abitative, il limite massimo di spesa ammissibile per gli interventi di isolamento termico si calcola applicando 40.000 euro a ciascuna delle prime 8 unità e 30.000 euro per le 12 unità rimanenti. Il massimale di spesa detraibile risulta quindi essere pari a 680.000 euro.

Inoltre, il Superbonus spetta nel caso in cui siano realizzati interventi di sostituzione degli impianti di climatizzazione invernale preesistenti, con impianti centralizzati per il riscaldamento, e/o il raffrescamento e/o la produzione di acqua calda sanitaria su parti comuni, oppure su edifici unifamiliari o su unità immobiliari indipendenti all'interno di edifici plurifamiliari, purché funzionalmente indipendenti e dotati di accesso autonomo.

Nel caso di edifici condominiali, questi impianti devono essere sostituiti con impianti centralizzati destinati al riscaldamento, al raffrescamento e alla produzione di acqua calda sanitaria. Gli impianti che beneficiano dell'agevolazione sono i seguenti: generatori a condensazione con efficienza pari alla classe A, pompe di calore ad alta efficienza, sistemi ibridi costituiti da caldaia a condensazione e pompa di calore integrata, impianti di microgenerazione e collettori solari termici.

Anche in questo caso il contributo è calcolato sulla base di un massimale di spesa variabile a seconda del numero di unità immobiliari che compongono l'edificio: 20.000 euro per ciascuna unità nel caso di edifici composti fino a 8 unità immobiliari, e 15.000 euro moltiplicato ogni unità nel caso di edificio composto da più di 8 unità. Ad esempio, nel caso di un condominio composto da 20 unità abitative, il limite massimo di spesa ammissibile per gli interventi di sostituzione degli impianti di climatizzazione si calcola applicando 20.000 euro a ciascuna delle prime 8 unità e 15.000 euro per le 12 unità rimanenti. Il massimale di spesa detraibile risulta quindi essere pari a 340.000 euro.

Ricapitolando, per gli edifici che superano le otto unità immobiliari, il calcolo del massimale di spesa viene suddiviso in due fasce: si applica l'importo più elevato per le prime otto unità, mentre per le unità eccedenti si utilizza la soglia più bassa. Questo meccanismo serve a scalare

progressivamente l'importo detraibile all'aumentare della dimensione dell'edificio, evitando che gli incentivi crescano in modo proporzionale e illimitato rispetto al numero di abitazioni.

La terza tipologia di intervento trainante riguarda le opere di messa in sicurezza sismica degli edifici. Questi interventi erano già precedentemente agevolati attraverso il Sismabonus, e rientrano ora tra quelli ammessi al Superbonus. A differenza dei primi due, l'intervento non prevede un miglioramento dell'efficienza energetica e nei nostri casi studio non verrà preso in considerazione.

◆ **Interventi trainati**

Il Superbonus si estende anche a determinati interventi secondari, definiti "*Trainati*", purché realizzati insieme ad almeno uno degli interventi principali di isolamento termico, sostituzione degli impianti di climatizzazione invernale o di potenziamento sismico. Tra questi rientrano le opere di efficientamento energetico previste dall'Ecobonus, ad esempio, la sostituzione di serramenti e infissi, accompagnata dall'installazione di schermature solari, gli interventi per l'eliminazione delle barriere architettoniche e l'installazione di infrastrutture per la ricarica di veicoli elettrici.

Inoltre, il Superbonus spetta anche per l'installazione di impianti solari fotovoltaici connessi alla rete elettrica e per l'integrazione di essi con sistemi di accumulo. Analogamente agli interventi trainanti anche quelli trainati sono ammessi al Superbonus solo se realizzati congiuntamente ad almeno uno degli interventi trainanti e a condizione che le spese siano sostenute nel periodo compreso tra l'inizio e la fine dei lavori relativi agli interventi trainanti. Per quanto riguarda l'installazione di impianti solari fotovoltaici e dei relativi sistemi di accumulo, l'agevolazione prevede massimali di spesa, pari a 48.000 euro per ciascuna unità immobiliare, ma entro il limite di 2.400 euro per ogni kW di potenza dell'impianto e 1.000 euro per ogni kWh di capacità di accumulo.

2.1.3 Chi può usufruirne, uso combinato con altre agevolazioni e requisiti degli interventi

La detrazione è riconosciuta a diverse categorie di beneficiari, tra cui condomini, edifici unifamiliari, unità immobiliari appartenenti ad un unico proprietario, istituti autonomi case popolari (Iacp), cooperative di abitazione a proprietà indivisa, Onlus, società sportive dilettantistiche e persone fisiche in possesso o in detenzione dell'immobile indipendentemente dal fatto che risiedano in Italia o all'estero ^[7], purché non operanti nell'ambito di attività d'impresa, arte o professione. Nel presente caso studio, gli interventi analizzati sono stati realizzati tutti su edifici condominiali, per i quali l'accesso al Superbonus ha richiesto l'adempimento di specifici requisiti. Nel contesto condominiale, il Superbonus è riconosciuto per lavori effettuati sulle parti comuni dell'edificio, a condizione che gli stessi siano deliberati dall'assemblea condominiale secondo le maggioranze semplificate previste dalla legge (almeno un terzo del valore dell'edificio e la maggioranza degli intervenuti ^[8]).

Per gli interventi che non rientrano nel Superbonus, restano valide le altre agevolazioni fiscali esistenti per la riqualificazione energetica (Ecobonus). Se una spesa può rientrare in più bonus, è possibile scegliere solo un'agevolazione. Tuttavia, se si eseguono più interventi diversi,

ciascuno legato a un bonus specifico, si possono usare più agevolazioni, a patto che le spese siano separate e si rispettino i requisiti previsti per ciascun incentivo.

Il beneficiario dell'agevolazione ha diverse opzioni: può utilizzare direttamente la detrazione nella propria dichiarazione dei redditi a partire dal 1° gennaio 2022, in quattro rate annuali di uguale importo nel limite dell'imposta dovuta annualmente come indicato nella dichiarazione dei redditi, oppure scegliere alternative come lo sconto in fattura applicato dal fornitore o la cessione del credito a banche, intermediari finanziari, fornitori di beni e servizi o altri soggetti.

Per accedere al Superbonus, gli interventi devono garantire un miglioramento di almeno due classi energetiche dell'edificio oppure, se ciò non è possibile perché l'edificio si trova già in una classe molto alta, il raggiungimento della classe energetica più elevata. Per dimostrare l'incremento della classe energetica è necessario presentare l'Attestazione di Prestazione Energetica (APE) sia antecedente che in seguito all'intervento di riqualificazione. Inoltre, è necessario rispettare i requisiti tecnici stabiliti dal Decreto del 6 agosto del 2020, il quale definisce le caratteristiche tecniche obbligatorie che devono possedere gli interventi di riqualificazione per poter accedere alla detrazione delle spese ^[9].

Al suo interno, ad esempio, sono stabiliti i valori limite di trasmittanza termica delle strutture opache e trasparenti. Per l'accesso alle detrazioni è necessario indicare i valori di trasmittanza termica prima e dopo l'intervento, dimostrando che il valore post rispetta i limiti previsti dalla tabella 1 dell'allegato E del decreto. Nel caso specifico di una riqualificazione energetica globale dell'intero edificio, come avviene nei casi studio analizzati, i valori limite di riferimento da rispettare sono quelli previsti dal Decreto Requisiti Minimi del 26 giugno 2015, Appendice B. Infine, i costi sostenuti dovranno rispettare i nuovi massimali aggiornati dal Decreto Prezzi del MiTE, entrato in vigore il 15 aprile 2022, che prevede un incremento minimo del 20% rispetto ai valori definiti dal DM del 6 agosto 2020, in considerazione dell'inflazione e dei rincari delle materie prime ^[9].

2.1.4 Principali risultati del Superbonus

L'ENEA pubblica annualmente sul sito del Dipartimento Unità di Efficienza Energetica (nella sezione dedicata ai risultati del Superbonus) un report dettagliato sulle detrazioni fiscali, ponendo attenzione all'agevolazione del Super Ecobonus ^[10]. Questi resoconti contengono dati sul numero complessivo di edifici interessati dagli interventi, sull'ammontare totale degli investimenti effettuati e ammessi a detrazione e il costo globale a carico dello Stato.

Analizzando i dati dei bollettini mensili relativi agli investimenti ammessi a detrazione per lavori conclusi tra agosto 2021 e ottobre 2024, emerge una crescita costante fino a marzo 2024, seguita da una successiva stabilizzazione (**Figura 2.1**).

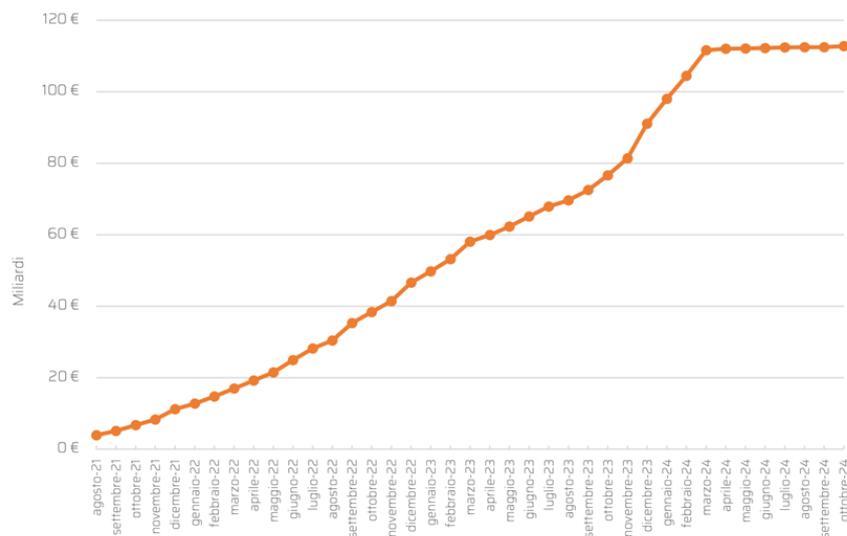


Figura 2.1- Investimenti ammessi a detrazione per i lavori conclusi tra il 2021 e il 2024.
Fonte: ENEA

Un andamento simile si osserva anche per il numero di edifici interessati dagli interventi, anch'esso dopo una fase crescente fino a marzo 2024, si mantiene sostanzialmente stabile (**Figura 2.2**).

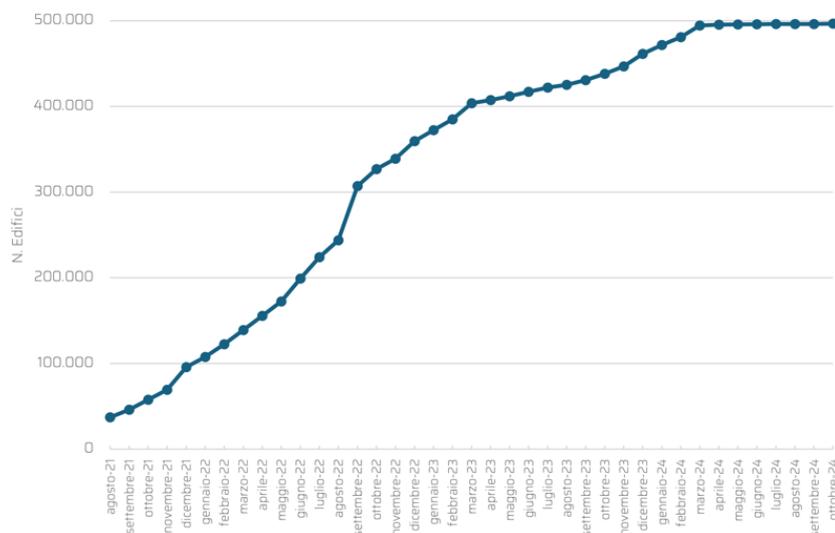


Figura 2.2 - Numero di edifici oggetto di intervento nel periodo compreso tra il 2021 e 2024. Fonte: ENEA

La **Tabella 2.1** riassume i dati nazionali aggiornati al 31/12/2024, relativi al numero di immobili coinvolti, suddivisi per categoria di edificio e ai relativi investimenti, indicando l'importo ammesso all'agevolazione, quello relativo ai lavori completati e la corrispondente detrazione fiscale (onere statale). La categoria di edifici che ha utilizzato di più l'incentivo del Super Ecobonus è quella delle case unifamiliari, che rappresentano il 49,2% del totale degli immobili coinvolti, considerando anche i condomini e le unità indipendenti. Se però si guarda agli importi effettivamente investiti e ammessi alla detrazione, il contributo maggiore arriva dai condomini, che coprono ben il 67,1% del totale degli investimenti.

		Dato Nazionale		
		% lavori realizzati (#)	% edifici	% Invest.
N. di edifici		497.782		
Totale investimenti(*)		120.798.990.813,04 €		
Totale investimenti ammessi a detrazione		119.055.253.648,97 €		
Totale investimenti per lavori conclusi ammessi a detrazione		113.930.706.027,73 €	95,7%	
Detrazioni maturate per i lavori conclusi		124.181.388.360,93 €	Onere a carico dello Stato	
di cui	Condomini			
	N. di edifici condominiali	135.486	27,2%	
	Totale investimenti(*)	80.573.162.145,79 €		
	Tot. Inv. Condominiali ammessi a detrazione	79.844.227.535,75 €		67,1%
	Tot. Lavori Condominiali realizzati ammessi a detrazione	75.396.797.160,72 €	94,4%	
	Edifici unifamiliari			
	N. di edifici unifamiliari	244.933	49,2%	
	Totale investimenti(*)	28.693.982.719,09 €		
	Tot. Inv. in edifici unifamiliari ammessi a detrazione	27.914.222.235,51 €		23,4%
	Tot. Lavori in edifici unifam. realizzati ammessi a detrazione	27.436.378.750,28 €	98,3%	
	U.I. funzionalmente indipendenti			
	N. di unità immobiliari funzionalmente indipendenti	117.355	23,6%	
	Totale investimenti(*)	11.529.908.249,04 €		
	Tot. Inv. in unità immob. indipend. ammessi a detrazione	11.295.721.044,56 €		9,5%
	Tot. Lavori in unità immob. indipend. realizzati	11.096.550.947,00 €	98,2%	
A/9 aperti al pubblico				
N. edifici A/9 aperti al pubblico	8	0,0%		
Totale investimenti(*)	1.937.699,12 €			
Tot. Inv. ammessi a detrazione	1.082.833,15 €		0,0%	
Tot. Lavori realizzati ammessi a detrazione	979.169,73 €	90,4%		
		Investimento medio(*)		
Condomini		594.697,33 €		
Edifici unifamiliari		117.150,33 €		
U.I. funzionalmente indipendenti		98.248,12 €		
A/9 aperti al pubblico		242.212,39 €		

Tabella 2.1 - Dati nazionali riepilogativi del Super Ecobonus al 31/12/2024. Fonte: ENEA

La situazione al 31 dicembre 2024 relativa al Super Ecobonus è sintetizzata nella **Tabella 2.1**, da cui emerge che il numero totale degli edifici che hanno usufruito dell'incentivo è pari a 497.782. Inoltre, secondo dati ISTAT ^[11] la misura ha coinvolto poco più dell'11% del totale dei condomini italiani, e circa il 4% del totale degli edifici residenziali presenti sul territorio nazionale.

◆ Confronto con le nuove costruzioni

Confrontando i dati relativi alle nuove costruzioni prima dell'introduzione del Superbonus nel 2020, emerge che mediamente venivano realizzati circa 17.000 fabbricati residenziali di nuova costruzione all'anno ^[12]. In particolare, tra il 2015 e il 2017 il settore delle nuove costruzioni aveva visto una crescita importante, con circa 16.225 nuove unità realizzate nel 2016 (con un più 3,1% rispetto al 2015) e circa 17.243 nel 2017 (con un più 6,3% rispetto al 2016). Dopo questa fase di espansione, nel 2020 si è invece registrata una diminuzione a 15.411 nuovi edifici, dovuta all'emergenza sanitaria, e in seguito, all'introduzione del Superbonus che ha agevolato le ristrutturazioni edilizie piuttosto delle nuove costruzioni. Facendo una media tra il 2013 e il 2017 dei fabbricati residenziali di nuova costruzione si scopre che tale valore si attesta a circa 17.000 unità.

Questo valore permette di stimare un tasso annuo di nuove costruzioni, precedente al Superbonus, di circa lo 0,14% rispetto all'intero patrimonio immobiliare residenziale esistente.

Se confrontato con l'impatto del Superbonus, che in 4 anni ha coinvolto circa il 4% degli edifici esistenti, il tasso medio annuo di ristrutturazione incentivata risulta pari all'1% circa. Dunque, tale valore è circa sette volte superiore rispetto al ritmo annuale di nuove costruzioni

antecedenti all'introduzione dell'incentivo, evidenziando come il Superbonus abbia rappresentato un enorme spinta per il settore edilizio.

◆ I risultati in breve

Gli investimenti totali, comprendenti anche le spese non detraibili, ammontano a circa 120,8 miliardi di euro, mentre quelli effettivamente ammessi a detrazione risultano pari a circa 119 miliardi di euro. Di questi, gli investimenti relativi ai lavori già conclusi e ammessi a detrazione raggiungono quasi 114 miliardi di euro. Infine, la voce relativa alle detrazioni maturate per i lavori conclusi, che rappresenta l'onere a carico dello Stato, è di poco superiore a 124 miliardi di euro. Va tuttavia sottolineato che questa situazione è aggiornata al 31 dicembre 2024, mentre l'ultimo aggiornamento del report annuale sulle detrazioni fiscali per l'efficienza energetica e l'uso di fonti rinnovabili negli edifici, effettua le analisi di miglioramento di classe energetica e di risparmio ottenuto, considerando i dati disponibili fino al 31 dicembre del 2023. Tale differenza temporale dipende dal fatto che il report annuale ufficiale raccoglie ed elabora dati su base annuale, e per questa ragione l'ultima analisi disponibile si ferma alla fine del 2023.

Come già detto, per poter beneficiare del Super Ecobonus, è necessario dimostrare il miglioramento della prestazione energetica dell'edificio di almeno due classi energetiche. Nel caso l'edificio si trovi già nella classe A3, è sufficiente il passaggio alla classe energetica massima (A4). Per verificare questo requisito, devono essere utilizzati degli attestati specifici chiamati "APE convenzionali"; diversi dai normali certificati energetici, poiché devono riferirsi obbligatoriamente all'intero edificio, anche se formato da più abitazioni. Anche negli APE convenzionali le classi energetiche sono indicate con delle lettere, dalla G (prestazione energetica peggiore) alla A4 (prestazione energetica migliore).

In **Figura 2.3** si presentano le percentuali relative alle classi energetiche degli edifici italiani che hanno usufruito del Super Ecobonus, confrontando la situazione prima e dopo gli interventi realizzati. In figura si può notare che, prima degli interventi, circa il 60% degli edifici rientrava nelle due classi energetiche peggiori (G ed F), con consumi energetici molto elevati e, di conseguenza, poco confortevoli per gli occupanti. Grazie agli interventi finanziati dal Superbonus, con il miglioramento di almeno due classi energetiche, le prestazioni energetiche degli edifici sono migliorate significativamente. Infatti, oltre il 65% degli edifici ha raggiunto una classe energetica di tipo A. Si nota, inoltre, la totale scomparsa delle classi peggiori, G ed F dal grafico post-intervento e la significativa percentuale di edifici in A4, pari al 30%.

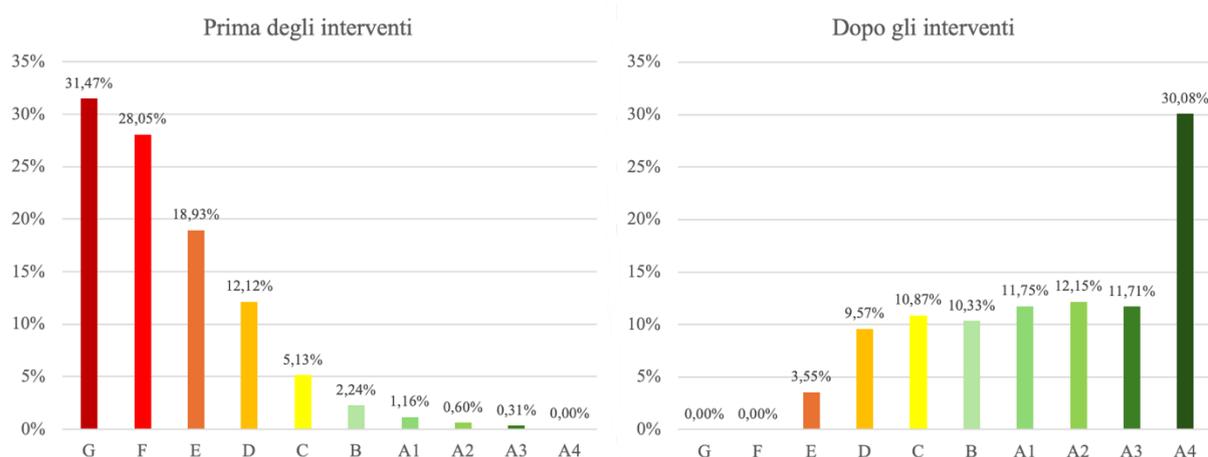


Figura 2.3 - Distribuzione percentuale delle classi energetiche prima (grafico di sinistra) e dopo (grafico di destra) la realizzazione degli interventi conclusi entro il 31/12/2023. Elaborazione personale su dati ENEA.

Secondo i dati riportati nel report annuale di ENEA sulle Agevolazioni Fiscali, il risparmio energetico totale ottenuto attraverso gli interventi incentivati dal Super Ecobonus è stimato in circa 13.500 GWh ogni anno. Questo risultato comprende tutte le categorie di interventi realizzati, come la riqualificazione dell'involucro esterno degli edifici e degli infissi, l'incremento del rendimento degli impianti termici, la building automation, l'installazione di impianti solari e la microgenerazione. È importante evidenziare che gli interventi con maggior impatto di risparmio energetico sono quelli relativi alla coibentazione degli edifici (circa il 66% del totale), seguiti dalla riqualificazione degli impianti termici, che rappresentano circa il 32% del risparmio energetico complessivamente ottenuto.

2.1.5 Impatti macroeconomici e sulla finanza pubblica del Superbonus

Di seguito si analizzeranno gli effetti del Superbonus, prendendo in esame diversi studi sugli impatti generati dall'incentivo, con particolare riferimento alla valutazione degli aspetti economici ed ambientali. L'analisi sarà sviluppata sia sotto il profilo macroeconomico, valutando quindi gli effetti diretti e indiretti sull'economia e sulla finanza pubblica, sia in relazione ai risultati ottenuti in termini di risparmio energetico stimato e riduzione delle emissioni di gas climalteranti.

Le prime agevolazioni fiscali per l'edilizia, introdotte nel 1997, avevano lo scopo principale di sostenere il settore, contrastare l'evasione fiscale e riqualificare il parco edilizio. Il Superbonus viene introdotto dal governo nel 2020 come parte delle misure di rilancio economico post-pandemico e per tale ragione, l'incentivo è molto più vantaggioso dei precedenti, con un'agevolazione fiscale del 110% delle spese sostenute, e con importanti innovazioni come la cessione del credito e lo sconto diretto in fattura. Nel breve termine queste misure hanno rilanciato la domanda nel settore edilizio, mentre nel lungo periodo puntano all'efficienza energetica. Ora che il Superbonus è giunto al termine, i dati disponibili consentono valutazioni più precise sugli effetti ottenuti.

Gli investimenti nel settore edilizio nel periodo 2019-2023 sono cresciuti del 60%, tuttavia è necessario valutare quale parte di questa crescita sia direttamente imputabile al Superbonus.

Per farlo, occorre considerare *l'addizionalità* degli investimenti generati esclusivamente dall'incentivo, scorporando tutti quegli investimenti che si sarebbero eseguiti lo stesso anche senza incentivo.

◆ L'addizionalità degli investimenti

Secondo una prima analisi condotta dalla Banca d'Italia, soltanto circa il 50% degli investimenti riportati dall'ENEA presenterebbero caratteristiche di effettiva addizionalità ^[13]. Ad esempio, l'installazione di pannelli fotovoltaici, la sostituzione degli infissi, o delle caldaie sono interventi ordinari e, quindi, sarebbero stati realizzati in ogni caso, anche senza beneficiare dell'incentivo. Un discorso analogo vale per interventi diversi, come quelli sulle facciate, i quali probabilmente sarebbero stati eseguiti in ogni caso, considerata la presenza di altri incentivi fiscali attualmente disponibili, tra cui il bonus facciate con detrazione del 90%. L'Osservatorio sui Conti Pubblici Italiani (OCPI) ^[14] ha riportato i risultati sulla stima dello scenario ipotizzato dalla Banca d'Italia (linea blu) in **Figura 2.4**, secondo la quale solo una parte degli investimenti incentivati dal Superbonus (circa il 50%) sarebbero investimenti aggiuntivi, cioè interventi realmente generati dalla presenza del bonus e che non sarebbero stati eseguiti in assenza dell'incentivo. In questa ipotesi, nel 2021 e nel 2022 avremmo avuto meno investimenti rispetto al livello effettivo (in verde): circa 8 e 23 miliardi rispettivamente. L'andamento degli investimenti sarebbe simile a quello reale ma con una ripresa più lenta in seguito alla pandemia.

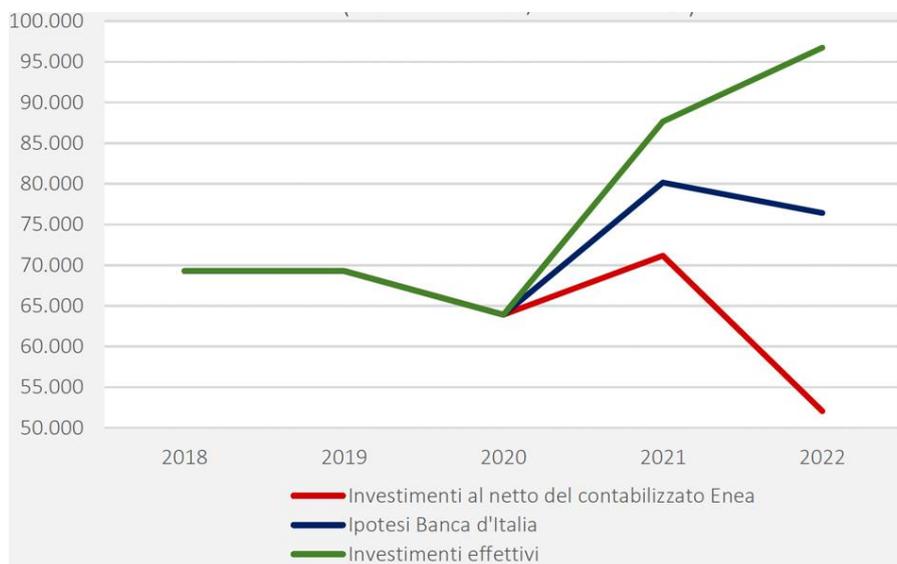


Figura 2.4 - Possibili scenari di investimenti (in milioni di euro) nel settore residenziale.
Fonte: OCPI

La curva verde indica l'andamento degli investimenti totali effettuati (compresi quindi quelli agevolati dal Superbonus), come rilevati dall'ISTAT. La curva rossa rappresenta l'andamento che gli investimenti avrebbero avuto se il Superbonus non fosse esistito, annullando del tutto l'effetto di questo incentivo.

Dire che tutti gli interventi incentivati dal Superbonus sono “aggiuntivi” significa supporre che sono stati realizzati solo grazie al bonus. Se fosse davvero così, senza incentivo ci sarebbe

stato un crollo degli investimenti, cosa che non è verosimile, arrivando addirittura a un calo del 25% nel 2022 rispetto al 2019.

Per completezza si riportano altri due studi sul tema dell'addizionalità. Il primo è stato condotto dal Ministero dell'Economia e delle Finanze attraverso l'utilizzo del modello econometrico ITEM (Italian Treasury Econometric Model). I risultati ottenuti sono analoghi a quelli presentati dall'Osservatorio CPI, verificando che il 49% della spesa è stata sostenuta per realizzare interventi aggiuntivi, mentre il restante 51% riguarda interventi che sarebbero stati effettuati ugualmente. Il secondo lavoro, condotto da Accetturo et al. ^[15], adotta invece un approccio basato sul metodo del "Synthetic control". Il risultato ottenuto è leggermente diverso, infatti, si stima che circa il 25% della spesa incentivata rappresenta una quota di investimenti che si sarebbero comunque realizzati indipendentemente dal Superbonus e che quindi sono stati incentivati inutilmente a discapito delle casse dello Stato.

◆ **Alcuni effetti negativi**

Altro fattore che bisogna considerare per una valutazione macroeconomica completa è l'effetto spiazzamento, cioè la situazione in cui gli investimenti si concentrano prevalentemente verso il settore incentivato, riducendo così gli investimenti che sarebbero stati destinati ad altri settori economici.

Inoltre, nel valutare gli effetti del Superbonus, occorre prendere in considerazione non solo gli impatti diretti sugli investimenti edilizi, ma anche quelli indiretti, includendo aspetti come l'occupazione, gli effetti sui prezzi e i consumi. L'incremento dei prezzi nel settore edilizio residenziale è strettamente legato all'introduzione degli incentivi fiscali.

Le imprese edili coinvolte nel mercato residenziale hanno registrato aumenti dei prezzi superiori rispetto a quelle operanti in altri ambiti edilizi. Questo fenomeno è attribuibile principalmente alla mancanza di un conflitto d'interesse tra cliente e fornitore, determinata dal meccanismo incentivante: entrambi avevano convenienza ad aumentare le spese fino al raggiungimento dei limiti massimi consentiti dalle agevolazioni fiscali, causando un incremento complessivo dei costi a carico dello Stato. A tutto ciò si aggiunge un ulteriore fattore critico rappresentato dalla frequente modifica della normativa, che, aumentando il livello generale d'incertezza, potrebbe aver ostacolato gli investimenti.

◆ **Effetti sul PIL**

Si passa ora ad analizzare gli effetti del Superbonus sul Prodotto Interno Lordo (PIL). Gli investimenti nelle abitazioni costituiscono circa il 5% del Prodotto Interno Lordo complessivo, quindi, un loro aumento significativo si tradurrebbe in una crescita relativamente contenuta del PIL. Secondo le valutazioni dell'OCPI ^[14], dopo circa due anni di applicazione del Superbonus, a fine del 2022, ha determinato una crescita cumulata del PIL pari all'1,4%. La **Figura 2.5** permette di valutare questo effetto positivo: la differenza tra la curva verde (PIL effettivo considerando l'applicazione degli incentivi) e la curva blu (PIL senza incentivi) indica proprio l'impatto del Superbonus sul PIL. La linea rossa rappresenta la differenza percentuale tra i due scenari, raggiungendo nel 2022 il massimo effetto positivo, pari all'1,4%.

Nel solo 2022, il contributo del bonus sulla crescita del PIL è stato dello 0,9%. Senza l'applicazione del Superbonus, infatti, il PIL sarebbe cresciuto del 2,8% invece del 3,7% effettivamente registrato dall'ISTAT.

Analogamente, nel 2021 la crescita sarebbe stata del 6,5%, anziché del 7% osservato grazie all'applicazione degli incentivi fiscali.

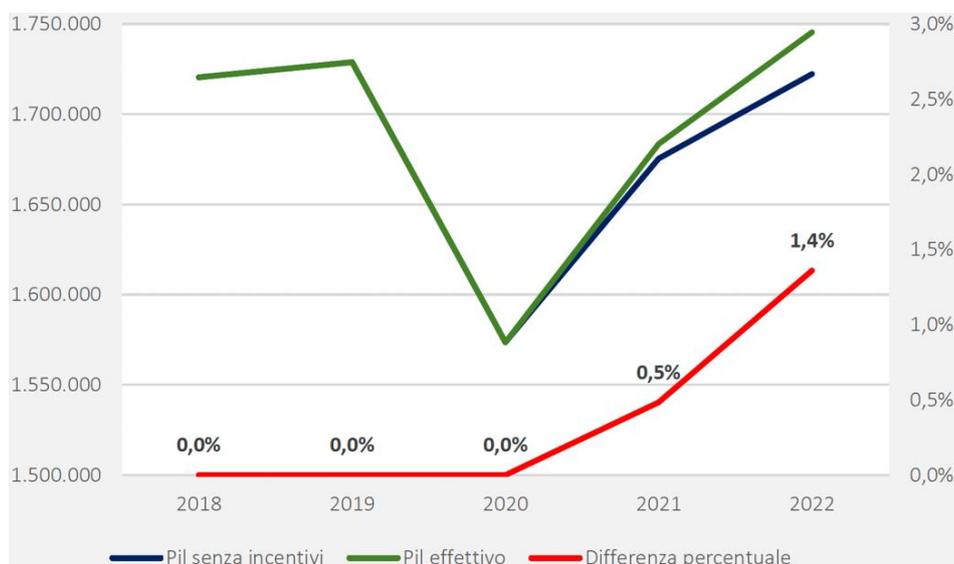


Figura 2.5 - Differenza percentuale tra PIL effettivo e PIL senza l'adozione di incentivi.
Fonte: OCPI

Per completezza viene riportata l'analisi del 2023 fornita dalla Federazione nazionale lavoratori edili affini e del legno che utilizza come fonte i dati forniti dall' ISTAT ^[16]. In **Figura 2.6** si evidenzia come l'agevolazione fiscale abbia incrementato la percentuale del PIL e degli occupati rispetto all'anno precedente.

Complessivamente il PIL a livello nazionale è aumentato dal 2022 al 2023 dello 0,9%, mentre a livello geografico l'incremento più significativo ha interessato il sud Italia con un aumento dell'1,3%. Il Superbonus ha avuto un impatto positivo anche sull'occupazione: a livello nazionale, infatti, gli occupati nel settore delle costruzioni sono cresciuti dell'1,8% rispetto all'anno precedente. Anche in questo caso, il sud Italia ha registrato il miglior risultato, con un aumento del 2,5%.

Nel triennio 2021-2023 oggetto della revisione dell'ISTAT, si evidenzia come, dopo il crollo del 2020 che ha colpito tutti i settori economici, sia stato proprio il settore delle costruzioni, trainato dal Superbonus, a fornire il contributo più significativo alla crescita del PIL. Nonostante l'andamento sia in progressiva diminuzione, il settore ha registrato un incremento nella produzione del 21,9% nel 2021, seguito da un 16,4% nel 2022 e da un 6,7% nel 2023 che comunque resta il valore più elevato tra tutti i settori produttivi.

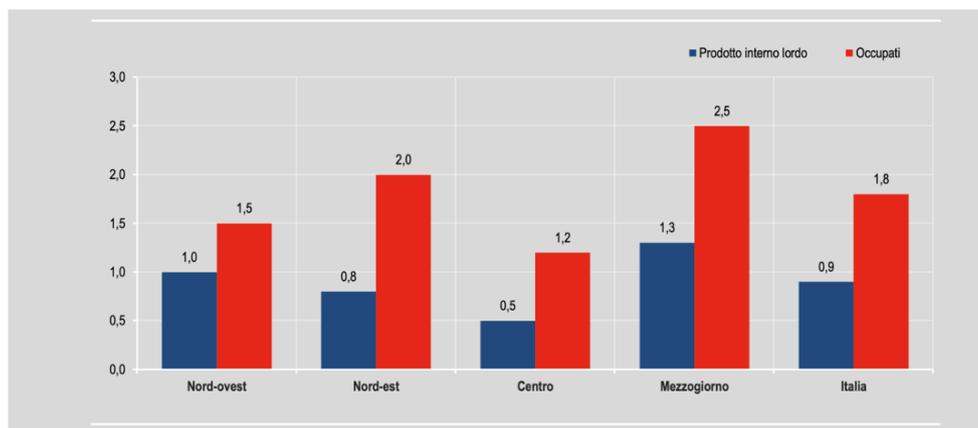


Figura 2.6 - Prodotto Interno Lordo e occupati per ripartizione geografica, anno 2023.
Fonte: FENEALUIL su dati ISTAT

◆ Effetti sulla finanza pubblica

A marzo del 2024, l'Osservatorio sulla finanza pubblica della Camera dei deputati ^[17] ha pubblicato lo studio più recente sugli impatti del Superbonus sul deficit e sul debito dello Stato.

La differenza principale tra deficit e debito deriva dalla diversa modalità con cui sono stati classificati i crediti d'imposta. Nel quadriennio 2020-2023, le spese legate al Superbonus sono state considerate come "pagabili", cioè da registrare immediatamente come uscite per lo Stato, determinando così un aumento repentino del deficit (come mostrato in **Tabella 2.2**); l'attribuzione completa dei crediti d'imposta veniva fatta all'anno in cui era stata sostenuta la spesa.

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Impatto cumulato
Impatto annuo del Superbonus sull'indebitamento netto	-498	-16.397	-54.960	-81.330	0	-1.087	-1.633	-1.199	-1.199	-1.199	-1.199	-1.199	-1.199	-1.199	-1.199	-112	434	-165.176
% del Pil	-0,03	-0,90	-2,80	-3,90	0,00	-0,05	-0,07	-0,05										
p.m. Pil a prezzi di mercato	1.661.240	1.821.935	1.962.846	2.085.376	2.162.700	2.238.200	2.305.900	2.367.600										

Tabella 2.2 - Impatto del Superbonus sull'indebitamento netto. Fonte: Camera dei deputati su elaborazione dati ISTAT

Dal 2024, invece, i crediti sono stati classificati come "non pagabili", e quindi il loro impatto sul deficit viene distribuito nel tempo. Per questo motivo, mentre tra il 2020 e il 2023 l'impatto complessivo sul deficit ha superato i 153 miliardi di euro, il debito pubblico è cresciuto in modo molto più graduale, raggiungendo circa 20,6 miliardi di euro nello stesso periodo (**Tabella 2.3**).

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	dal 2036
Impatto annuo	100	3.379	17.119	37.451	38.538	38.984	21.532	1.199	1.199	1.199	1.199	1.199	1.199	1.199	112	-434
% del Pil	0,01	0,17	0,82	1,73	1,72	1,69	0,91	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Impatto cumulato	100	3.479	20.598	58.049	96.588	135.572	157.104	158.303	159.502	160.701	161.900	163.099	164.298	165.497	165.610	165.176
% del Pil	0,01	0,18	0,99	2,68	4,32	5,88	6,64									

Tabella 2.3 - Impatto del Superbonus sul debito pubblico. Fonte: Camera dei deputati su elaborazione dati ISTAT

Secondo le elaborazioni dell'Osservatorio parlamentare su dati ISTAT, l'effetto complessivo del Superbonus (super Ecobonus più super Sismabonus) sul debito pubblico è stimato in circa 165 miliardi di euro, cifra che sale a 188 miliardi se si includono anche i circa 23 miliardi derivanti dal Bonus Facciate.

Secondo le previsioni ufficiali della Ragioneria Generale dello Stato (RGS), il costo complessivo previsto di tutti gli incentivi edilizi era inizialmente di circa 71 miliardi di euro. Nella realtà, invece, la spesa finale ha raggiunto 165 miliardi considerando il solo Superbonus. Questa difficoltà nello stimare la spesa complessiva a carico dello Stato è dovuta a più fattori.

La ragione principale è che le stime iniziali erano state effettuate sulla base di metodologie e ipotesi utilizzate in precedenza per bonus ordinari con aliquote inferiori. Tuttavia, dato che il Superbonus prevedeva condizioni decisamente più favorevoli, con un'aliquota pari al 110%, probabilmente sarebbe stato più appropriato adottare modelli differenti.

Inoltre, l'introduzione di meccanismi come lo sconto in fattura e la cessione del credito (che hanno ampliato notevolmente il numero dei beneficiari), ha causato una sottostima dei costi dell'incentivo. A peggiorare la situazione ha contribuito la mancanza di un adeguato sistema di controllo, con il risultato che i crediti d'imposta effettivamente generati sono stati di molto superiori rispetto alle stime iniziali, e, conseguentemente, hanno causato un onere a carico dello Stato significativamente elevato.

◆ Il modello ANCE

Per valutare in modo completo l'impatto del Superbonus, è fondamentale considerare anche gli effetti che esso ha generato e sta generando tuttora sul gettito fiscale. L'associazione Nazionale Costruttori Edili (ANCE), attraverso un modello empirico semplificato ^[18], ha fatto una stima cautelativa delle entrate per lo Stato derivanti direttamente dai cantieri edilizi.

Tra queste entrate ci sono ad esempio i redditi degli operai, i compensi dei professionisti e l'acquisto di materiali. Il modello prende in esame solo gli effetti diretti e indiretti, escludendo però quelli indotti. Lo studio conclude che il 47% dell'ammontare complessivo dei crediti fiscali, rientra allo Stato sotto forma di entrate fiscali come riportato in **Figura 2.7** (tasse, IVA e altri contributi).

Di conseguenza, il costo netto effettivo per lo Stato si ridurrebbe al 53% della spesa agevolata. Per fornire un quadro più completo, è utile confrontare tale stima con altre valutazioni disponibili. In particolare, secondo le analisi dell'Osservatorio Conti Pubblici Italiani (OCPI) ^[19], per ogni 100 euro di spesa, solo circa 20 euro rientrerebbero nelle casse pubbliche sotto forma di imposte e contributi sociali. Applicando questa ipotesi, che considera un effetto sul gettito pari al 20% della spesa sostenuta dallo Stato, l'impatto complessivo sul bilancio pubblico risulterebbe molto più oneroso rispetto alla stima ANCE, determinando una differenza di circa 50 miliardi di euro tra i due scenari.



Figura 2.7 - Valutazione degli effetti del Superbonus sul bilancio dello Stato. Fonte: modello ANCE

Infine, uno studio condotto dalla Fondazione Nazionale dei Commercialisti ^[20] ha stimato che il recupero da parte dello Stato potrebbe essere quantificato in 43,3% della spesa attraverso il gettito fiscale.

Questa stima si basa sull'ipotesi che tutti gli interventi siano stati realizzati esclusivamente grazie al Superbonus, e che, in assenza dell'incentivo, non sarebbero stati realizzati, determinando quindi un aumento del PIL. Tuttavia, in uno scenario più realistico, è ragionevole ritenere che una percentuale rilevante degli interventi sarebbe stata comunque effettuata, anche senza l'aliquota del 110%, mediante aliquote inferiori. In questo caso, non tutta la spesa può essere considerata aggiuntiva, e il risultato, è un incremento del debito pubblico, dovuto al fatto che lo Stato ha sostenuto una spesa molto più elevata di quanto avrebbe dovuto sostenere con incentivi ordinari, limitando così l'effettiva efficienza economica della misura.

L'impatto economico del Superbonus varia sensibilmente a seconda dei modelli economici utilizzati per valutarne gli effetti. Tuttavia, osservando la **Tabella 2.3**, relativa al debito pubblico, e i dati ISTAT sull'andamento del PIL, emerge un dato interessante: fino al 2023, le spese per lo Stato hanno inciso sul debito pubblico per una quota cumulata pari allo 0,99% del PIL, mentre lo stesso è cresciuto già al 2022 dell'1,4%. Questo significa che, nei primi tre anni di applicazione (2020-2023), il Superbonus potrebbe considerarsi autofinanziato, mentre negli anni successivi non lo è più, dal momento che il debito cresce rapidamente e il beneficio economico (PIL aggiuntivo) generato dall'applicazione dell'incentivo diminuisce costantemente poiché gli investimenti si sono arrestati.

In conclusione, il Superbonus ha avuto un impatto negativo sui conti pubblici, lasciando in eredità un debito di circa 165 miliardi di euro. Tale effetto negativo si sarebbe potuto mitigare introducendo un tetto massimo alla spesa totale incentivabile, contenendo gli oneri a carico dello Stato. Anche se l'impatto sul debito pubblico è risultato negativo e nettamente superiore alle stime della RGS, alcuni ricercatori ^[21] stimano che, considerando un orizzonte di circa cinque anni, il Superbonus generi un incremento del PIL pari a circa 91 miliardi di euro. Sebbene non sia realistico affermare che gli incentivi edilizi si autofinanzino, essi hanno stimolato l'economia e generato nuove entrate fiscali, inoltre, hanno prodotto rilevanti benefici in termini ambientali e occupazionali che verranno discussi nel prossimo paragrafo.

2.1.6 Impatto ambientale e sociale del Superbonus

Per analizzare l'impatto ambientale, è stato innanzitutto esaminato come è cambiata la consistenza del parco immobiliare italiano durante gli anni di applicazione dell'incentivo.

L'analisi dei dati degli APE, da parte di ENEA ^[22] nel rapporto sulla consistenza del parco immobiliare nazionale, mostra un miglioramento significativo delle prestazioni energetiche degli edifici. Al 31 dicembre 2019, con circa 1,6 milioni di APE il 74,1% degli immobili risultava nelle classi meno efficienti (E, F, G), mentre solo l'8,1% godeva di una classe superiore alla B (**Figura 2.8**).

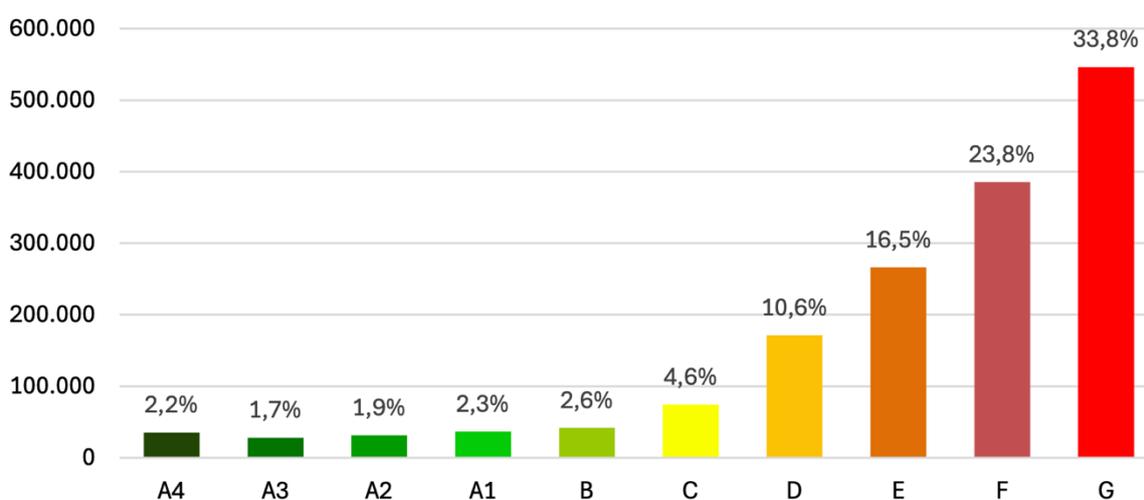


Figura 2.8 - Ripartizione per classe energetica degli APE residenziali al 31 dicembre del 2019.
Fonte: ENEA

Al 31 dicembre 2023, con un aumento a 4,6 milioni di APE, la quota degli edifici nelle classi E, F e G è scesa al 70,4% e quella nelle classi dalla A1 alla A4 è aumentata all'11%, con una riduzione dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile da 197,7 a 185,4 kWh/m² all'anno (**Figura 2.9**). Questi dati evidenziano come i bonus edilizi, soprattutto il Superbonus, hanno contribuito a migliorare le prestazioni energetiche degli edifici residenziali, anche se la percentuale di edifici obsoleti è ancora significativa.

Il numero degli immobili presenti all'interno del SIAPE, il Sistema Informativo degli APE, è sempre più caratteristico dell'intero parco immobiliare, tuttavia, il campione di immobili certificati registrati non può essere considerato pienamente rappresentativo dell'intero parco immobiliare, a causa della limitata diffusione degli Attestati di Prestazione Energetica, in particolare nel settore terziario. La percentuale di APE rispetto al totale degli immobili presenti nel territorio nazionale corrisponde al 13,07% rispetto ai 35.271.829 unità immobiliari presenti sul territorio nazionale (ISTAT 2021).

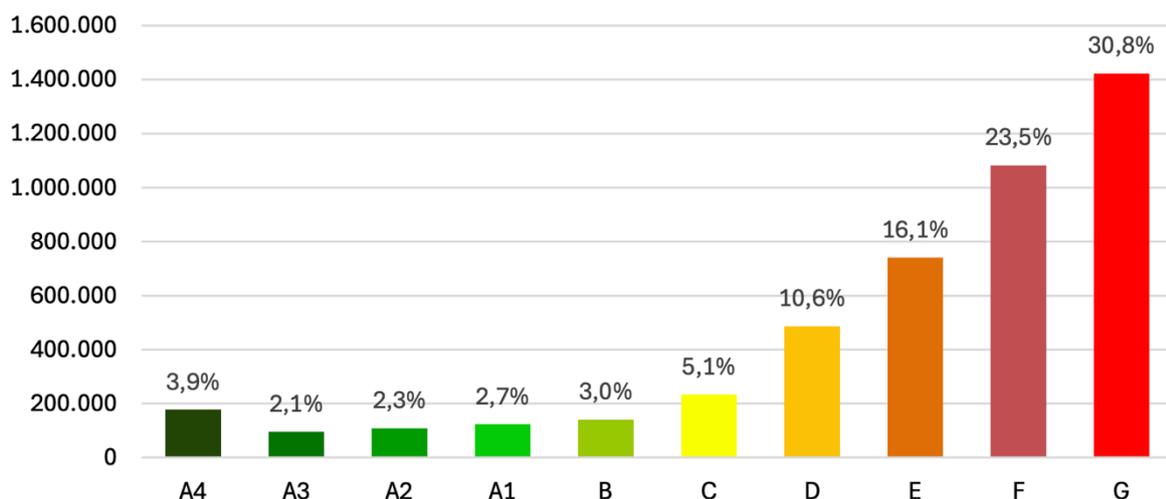


Figura 2.9 - Ripartizione per classe energetica degli APE residenziali al 31 dicembre del 2023.
Fonte: ENEA

Si può osservare che, poiché la maggioranza dei bonus edilizi utilizzata negli ultimi 4 anni è stata rappresentata quasi esclusivamente dal Superbonus 110%, la riqualificazione energetica ha avuto un impatto particolarmente rilevante, soprattutto per quanto riguarda il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici.

Vengono riportati ulteriori studi di analisi dell'impatto ambientale e di risparmio energetico. Secondo uno studio condotto da Nomisma a inizio del 2023^[23], gli edifici che hanno beneficiato del Superbonus hanno ridotto mediamente del 50% le loro emissioni di CO₂ e il valore complessivo degli immobili riqualificati è aumentato di circa 7 miliardi di euro, con un incremento percentuale stimato tra il 3% e il 5%. Considerando che il settore edilizio è responsabile di circa un quinto delle emissioni di gas serra totali, l'impatto ambientale è particolarmente importante: lo studio riporta che a inizio del 2023, la riduzione complessiva delle emissioni di CO₂ è pari a 1,42 milioni di tonnellate. Come si vedrà in seguito queste stime si basano su dati teorici, e spesso si discostano dai risultati reali.

Tali risultati sono in linea con l'analisi di fine 2022 condotta da Censis^[24], infatti, anche per quest'ultima indagine, il risparmio ottenuto è pari a 11.700 GWh all'anno, riducendo il consumo di gas di circa 1,1 miliardi di metri cubi.

Per avere un riferimento quantitativo, il gas metano risparmiato teoricamente equivale all'1,61% del consumo nazionale registrato nel 2022², mentre la riduzione teorica delle emissioni di CO₂ rappresenta circa lo 0,46% del totale delle emissioni prodotte in Italia nel 2022³, e circa l'1,95% rispetto alle emissioni totali di gas a effetto serra dell'intero settore degli usi civili nel 2022^[25]. Tale riduzione corrisponde a oltre due terzi del risparmio previsto dalle misure adottate nel 2022 per ridurre i consumi del settore domestico in risposta all'emergenza energetica. Inoltre, questi interventi hanno prodotto risparmi per le famiglie di circa 29 miliardi di euro, con una riduzione media annua delle bollette di circa 1.000 euro per famiglia.

² Il consumo di gas in Italia nel 2022 si attesta a 68,5 miliardi di metri cubi secondo i dati pubblicati da Metaneia

³ Le emissioni di CO₂ in Italia nel 2022 si attestano a 310 Mt secondo l'International Energy Agency

Il risparmio economico in bolletta dipende dalle classi energetiche ed è compreso tra il 30,9% (con un salto di due classi energetiche) e il 46,4% (con un salto di tre classi).

◆ L'analisi di Gabetti Lab

Anche Gabetti Lab ^[26] ha condotto un'analisi sull'impatto energetico del Superbonus, esaminando un campione di 181 condomini distribuiti in modo eterogeneo sul territorio nazionale. L'obiettivo dello studio è valutare l'efficacia degli interventi in termini di risparmio energetico, riduzione delle emissioni di CO₂, miglioramento del comfort abitativo e beneficio economico per le famiglie. I risultati ottenuti sono i seguenti:

- Il fabbisogno energetico medio degli edifici è stato ridotto del 53%, mentre il risparmio energetico medio si attesta al 46%, con un salto medio di 3 classi energetiche;
- Il consumo di gas è diminuito in media del 40%, contribuendo a una riduzione annua dei costi in bolletta del 43% negli edifici oggetto dell'analisi;
- Il rendimento medio stagionale degli impianti termici, ossia il rapporto tra il calore fornito dalla caldaia e l'energia consumata è migliorato, passando dall'80% al 94% dopo gli interventi, contribuendo alla riduzione delle spese condominiali e all'aumento del valore dell'immobile;
- Le emissioni di CO₂ sono diminuite in media del 51%, sottolineando l'importante contributo ambientale della misura.

In sintesi, lo studio conferma che il Superbonus ha prodotto impatti rilevanti sia dal punto di vista energetico che ambientale (**Tabella 2.4**).

RIDUZIONE MEDIA GAS ALL'ANNO [%]	RENDIMENTO MEDIO STAGIONALE DOPO LA RIQUALIFICAZIONE [%]	RIDUZIONE SPESA ANNUALE MEDIA PER IL GAS [%]	ABBATTIMENTO FABBISOGNO MEDIO [%]	RISPARMIO ENERGETICO MEDIO [%]	RISPARMIO DI EMISSIONI DI CO ₂ [%]	SALTO MEDIO DI CLASSE ENERGETICA
40%	94%	43%	53%	46%	51%	3,1

Tabella 2.4 - Risparmio energetico medio a seguito degli interventi di ristrutturazione energetica. Elaborazione personale da analisi Gabetti

In conclusione, va sottolineato che gli studi più recenti analizzano dati riferiti a un periodo in cui gli investimenti legati al Superbonus ammontavano a circa 50 miliardi di euro, ovvero meno della metà del valore complessivo raggiunto dalla misura, che ha superato i 120 miliardi. Perciò è plausibile ipotizzare che anche gli impatti positivi, in termini di riduzione del consumo di gas metano e delle emissioni di CO₂, siano significativamente superiori rispetto alle stime iniziali. Di conseguenza, le percentuali di risparmio teorico precedentemente considerate (pari all'1,61% del consumo nazionale di gas e allo 0,46% delle emissioni di CO₂ nazionali) rappresentano una stima conservativa, e potrebbero in realtà risultare ben più elevate se rapportate all'intero ammontare degli investimenti effettivamente realizzati.

◆ Un obiettivo ambizioso

Considerando che in Italia il 68% degli immobili residenziali possiede una classe di efficienza energetica pari a D o inferiore, diventa essenziale porre uno sguardo agli obblighi derivanti dalla direttiva UE sull'efficienza energetica degli edifici "EPBD IV", che impone di raggiungere almeno la classe E entro il 2030 e la classe D entro il 2033, nonché rispettare gli impegni per la neutralità climatica (zero emissioni al 2050). La Direttiva inclusa nel pacchetto "Fit for 55", richiede la riqualificazione di 1,8 milioni di edifici in 10 anni. In questo scenario, il Superbonus ha generato un'ondata senza precedenti di interventi di riqualificazione con un onere elevatissimo a carico dello Stato, il 4% del parco residenziale italiano, corrispondente a circa 500.000 edifici, è stato efficientato utilizzando il suddetto incentivo. Gli edifici assumono un ruolo centrale per il raggiungimento degli obiettivi europei di neutralità climatica che, senza l'impiego di sostegni economici come il Superbonus, sarebbero impossibili da raggiungere.

La stima dell'attuale tasso di riqualificazione energetica permette di misurare la distanza dagli obiettivi di decarbonizzazione, definendo così la traiettoria necessaria degli interventi futuri^[25]. Attraverso i dati dell'Ecobonus e del Bonus casa, si è calcolato un "tasso virtuale di ristrutturazione profonda". Questo tasso virtuale viene stimato, attraverso la creazione di un modello, a 1,9% con un risparmio energetico di 0,332 Mtep all'anno.

Tuttavia, è importante ricordare che questi tassi saranno aggiornati nella versione definitiva del piano. Infine, la **Tabella 2.5** presenta una traiettoria con gli obiettivi sui tassi annuali di riqualificazione necessari per i settori residenziale e terziario al 2030, 2040 e 2050.

Indicatore	Periodo 2020-2030	Periodo 2030-2040	Periodo 2040-2050
Tasso di riqualificazione annuo settore residenziale	1,9%	2,7%	2,7%
Tasso di riqualificazione annuo settore terziario	2,8%	2,6%	2,6%

Tabella 2.5 - Traiettoria degli obiettivi in termini di tasso annuo di riqualificazione. Fonte: elaborazione PNIEC su dati ENEA

Si può osservare come i tassi annui di ristrutturazione previsti per il settore residenziale siano significativamente superiori rispetto ai valori attuali. In particolare, entro il 2040, tale tasso, rispetto a quello attuale dovrà quasi triplicare per consentire il raggiungimento degli obiettivi energetici fissati al 2050, rivelandosi molto ambiziosi.

"L'Italian Buildings Climate Tracker" rappresenta il primo indice creato per monitorare i progressi dell'Italia verso la decarbonizzazione del patrimonio edilizio nazionale. Realizzato dal Building Performance Institute Europe (BPIE), questo strumento analizza quattro indicatori principali: gli investimenti destinati alla riqualificazione degli edifici, le emissioni di CO₂, il consumo finale di energia e l'utilizzo di fonti rinnovabili. L'ITA BCT offre un quadro dettagliato sull'evoluzione italiana verso gli obiettivi di neutralità climatica fissati per il 2050.

Anche il BPIE afferma che nonostante l'aumento degli investimenti nella riqualificazione, in particolare grazie al Superbonus 110%, il settore edilizio italiano non sta avanzando abbastanza velocemente per centrare gli obiettivi climatici, infatti i progressi ottenuti finora non sono sufficienti.

◆ **Impatto sociale del Superbonus**

Ultima tematica affrontata ma non meno rilevante è rappresentata dall'impatto occupazionale e sociale generato dal Superbonus. Secondo le stime elaborate da Nomisma^[23], la misura ha contribuito a creare 641.000 posti di lavoro nel settore delle costruzioni e ulteriori 351.000 occupati indirettamente, generando quasi un milione di nuovi occupati. Lo studio conclude che per ogni miliardo di euro di produzione aggiuntiva nelle costruzioni, si calcola la creazione di circa 16.400 posti di lavoro netti. Anche lo studio condotto dal Censis^[24] conferma l'elevato impatto occupazionale del Superbonus.

Nel solo 2021, il valore aggiunto del settore delle costruzioni è cresciuto del 21,3% rispetto all'anno precedente, con picchi del 25,9% nel sud Italia. Da agosto 2020 a ottobre 2022, il Superbonus ha attivato circa 900.000 posti di lavoro tra diretti e indiretti (in linea con l'analisi di Nomisma).

Inoltre, dal punto di vista sociale, il Superbonus ha avuto anche un effetto redistributivo. È interessante notare che, in passato tra il 2011 e il 2020, secondo le indagini effettuate dall'Ufficio Parlamentare di Bilancio (UPB), le agevolazioni fiscali risultavano fortemente regressive. Infatti, la maggior parte dei beneficiari delle agevolazioni possedevano un patrimonio immobiliare e un alto reddito e, disponendo di una capienza fiscale sufficiente, potevano effettuare gli interventi. È stato stimato che circa il 50% del valore complessivo delle detrazioni veniva assorbito dal 10% dei contribuenti più ricchi.

Mediante il Superbonus, 1,7 milioni di cittadini a reddito medio-basso hanno potuto accedere a interventi di riqualificazione nelle proprie abitazioni. Attraverso l'introduzione di strumenti come lo sconto in fattura e la cessione del credito, si è superato l'ostacolo del capitale iniziale e della capienza fiscale necessaria alla detrazione della spesa. Questo ha reso l'incentivo più accessibile anche alle fasce meno abbienti, contribuendo a una distribuzione più equa dei benefici.

◆ **Le principali criticità**

Sebbene i benefici in termini ambientali, di risparmio energetico e impatto macroeconomico siano evidenti, vi sono anche degli svantaggi notevoli. In particolare, l'onere finanziario annuo per le finanze pubbliche è molto elevato; tale costo che si manifesta maggiormente nel lungo periodo, lascia una pesante eredità per il futuro. Le stime iniziali hanno infatti gravemente sottovalutato l'impatto sul debito pubblico; come evidenziato da Papi^[27], un errore di previsione che ha minato la credibilità della RGS. È doveroso sottolineare che il Superbonus è stato introdotto non solo per rispondere alle sfide ambientali, ma soprattutto per creare uno shock economico positivo in un periodo di crisi nazionale dovuta alla pandemia.

Un ulteriore aspetto negativo, comune a tutti i bonus edilizi, riguarda i comportamenti fraudolenti. Durante un'audizione del 16 aprile 2024, l'Agenzia delle Entrate, in collaborazione con la Guardia di Finanza, ha comunicato di aver individuato truffe per un valore complessivo di circa 15 miliardi di euro nel settore dei bonus edilizi^[28]. Dalla **Figura 2.10** si evince, tuttavia, che il tasso di frode associato al Superbonus è significativamente inferiore rispetto a quello dei bonus facciate, portandosi intorno al 5%.

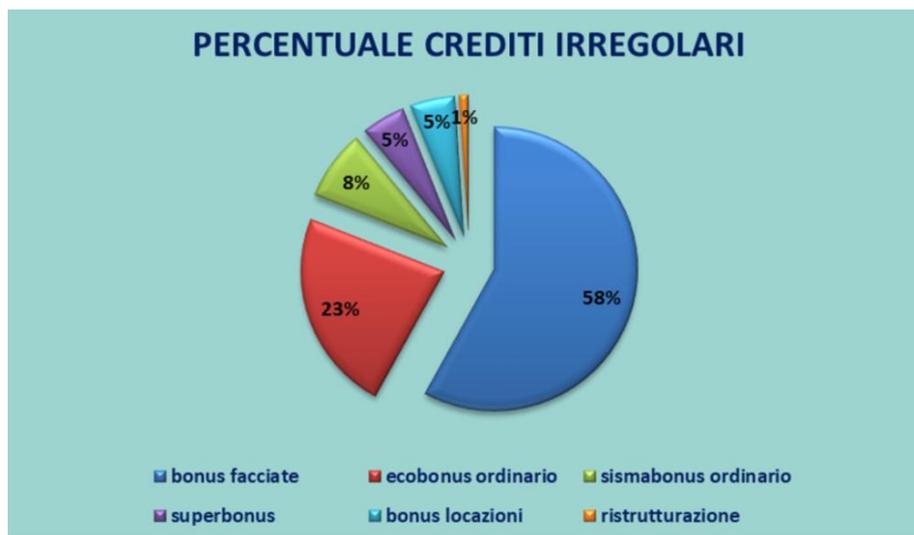


Figura 2.10 - Percentuale dei crediti irregolari relativi ai bonus edilizi. Elaborazione della Camera dei deputati su dati forniti dall' Agenzia delle entrate.

Ulteriori considerazioni sono da fare anche sugli effetti recessivi: a partire dal 2024, la conclusione del Superbonus sta già determinando un impatto negativo sull'economia del settore edilizio; in cui si registra una riduzione della produzione, dell'occupazione e degli investimenti, con conseguente rallentamento del PIL. In sostanza, la rimozione dell'incentivo genera un effetto recessivo di dimensioni simili ma con verso opposto rispetto allo stimolo originario, annullando i vantaggi accumulati.

In sintesi, il Superbonus ha avuto un impatto decisivo sia nel rilancio economico sia nel promuovere la transizione ecologica ed energetica del Paese; anche se ha comportato un notevole incremento del debito pubblico. È essenziale imparare dagli aspetti più positivi di questo strumento, confermando le nuove misure come la cessione del credito e lo sconto in fattura introducendoli solo esclusivamente ai soggetti che non hanno abbastanza capienza fiscale per recuperare le spese, e che quindi possono accedere comunque al beneficio.

Inoltre, riducendo l'aliquota dal 110% a valori molto più contenuti, si eliminerebbe la comunanza di interessi tra fornitore e acquirente. Un'aliquota di detrazione superiore al 100% ha generato distorsioni nel mercato, in particolare un aumento generale dei prezzi nel settore edilizio. Questo perché non essendoci una reale spesa economica da parte del beneficiario, sia il fornitore che il committente avevano interesse a massimizzare la spesa, senza nessun incentivo al contenimento dei costi. Questa "comunanza di interessi" ha favorito pratiche speculative e ridotto notevolmente l'efficienza dell'investimento pubblico. Ridurre l'aliquota al di sotto del 100% riporta invece un equilibrio di interessi, in cui il beneficiario è più attento ai costi e il mercato tende a stabilizzarsi.

In ogni caso, anche con un'aliquota inferiore al 100% la spesa sostenuta per l'efficientamento energetico, verrebbe compensata dai risparmi energetici e dall'incremento del valore degli immobili, che altrimenti rischierebbero di deprezzarsi col tempo.

2.2 Incentivi edilizi post-Superbonus: il presente degli incentivi per la riqualificazione energetica in Italia con uno sguardo al futuro

Nel capitolo precedente si è analizzato il Superbonus, esaminando sia il contenuto del decreto che gli impatti economici e ambientali, con particolare attenzione all'elevata spesa a carico dello Stato. Le conclusioni evidenziano come il settore edilizio stia attraversando una fase di forte recessione, con ripercussioni sull'intero settore degli edifici e una conseguente riduzione degli incentivi. In questo scenario, il bonus verde e il bonus colonnine sono stati eliminati, e il Superbonus, pur essendo all'ultimo anno, non consente più l'accesso per nuovi interventi ed è considerato ufficialmente morto. Rimangono in vigore, invece, l'Ecobonus, il Bonus Ristrutturazione e il Sismabonus, tutti con aliquote di detrazione notevolmente inferiori, applicabili esclusivamente per l'anno in corso e limitate al 50% per la prima casa (sintesi in **Figura 2.11**, fonte Ingenio ^[29]).



Figura 2.11 - Bonus casa 2025: la mappa completa sulle detrazioni per interventi di ristrutturazione edilizia. Fonte: Ingenio

La Legge di Bilancio del 2024 (L. 207/2024) ha introdotto una revisione generale delle agevolazioni edilizie, tra cui l'Ecobonus, il Sismabonus e il Bonus Ristrutturazione, prevedendo una riduzione delle aliquote. Per la prima casa, la detrazione sarà pari al 50% delle spese sostenute nel 2025, per poi ridursi al 36% nel 2026 e nel 2027. Per gli altri immobili, invece, la detrazione scenderà al 36% nel 2025 e al 30% nei due anni successivi.

Inoltre, è stata introdotta un'importante novità: l'accesso alle agevolazioni sarà limitato anche in base al reddito del contribuente. Chi ha un reddito inferiore a 75.000 euro può accedere completamente alla misura, mentre chi ha un reddito superiore a 75.000 euro sarà soggetto a delle restrizioni, prevedendo limiti di spesa più bassi, con l'obiettivo di rendere il sistema più equo e indirizzato soprattutto verso le fasce di reddito medio-basse.

Gli interventi che ammettono le nuove aliquote e che, fino al 2024, beneficiavano di percentuali più elevate sono:

- interventi effettuati sulle parti comuni degli edifici condominiali;
- interventi volti al miglioramento sismico e all'efficientamento energetico su parti comuni condominiali;

- interventi che determinano la riduzione di una o due classi di rischio sismico;
- interventi di demolizione e ricostruzione di edifici al fine di un potenziamento sismico.

Poiché il focus di questa tesi è il Superbonus e, quindi gli incentivi legati all'efficientamento energetico degli edifici, si vuole porre particolare attenzione all'Ecobonus.

A partire dal 2025 la detrazione fiscale per gli interventi di riqualificazione energetica passa dal 65% al 50%. Anche questa agevolazione, infatti, è soggetta ad una revisione al ribasso. La Legge di Bilancio del 2025 ha prorogato l'agevolazione anche alle spese sostenute nel triennio 2025-2027, escludendo però quelle relative alla sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con caldaie alimentate esclusivamente da combustibili fossili. Per gli interventi effettuati nel 2025, la detrazione fiscale è pari al 36% per le seconde case, che sale al 50% se riguarda l'abitazione principale. Mentre, per le spese sostenute nel 2026 e nel 2027, l'agevolazione si riduce al 30%, o al 36% se riferita alla prima casa. L'Ecobonus si applica agli interventi di efficientamento energetico che contribuiscono alla riduzione dei consumi energetici e alle emissioni di CO₂. In particolare, l'agevolazione riguarda:

- interventi eseguiti sulle parti comuni di edifici condominiali o che coinvolgano l'intero complesso di unità immobiliari di un condominio;
- opere finalizzate alla riqualificazione energetica globale dell'edificio o delle sue parti comuni;
- lavori di coibentazione dell'involucro edilizio;
- acquisto e installazione di infissi con finestre, schermature solari, collettori solari e sistemi di automazione per la gestione intelligente degli edifici;
- acquisto e installazione di impianti per la climatizzazione invernale alimentati da biomasse, micro-cogeneratori, sistemi ibridi o pompe di calore.

Un'ulteriore novità riguarda l'esclusione dalle detrazioni fiscali delle caldaie a gas, comprese quelle a condensazione. Questa modifica si pone in linea con gli orientamenti europei, in particolare con quanto previsto dalla Direttiva EPBD IV che verrà affrontata nel prossimo paragrafo, e che introduce, a partire dal 1° gennaio del 2025, il divieto di concedere incentivi fiscali per l'installazione di caldaie a combustibili fossili.

Come già anticipato, la Legge di Bilancio ha introdotto un tetto massimo alla spesa agevolabile per i contribuenti con reddito superiore a 75.000 euro^[30]. Come illustrato nella **Figura 2.12**, il calcolo del limite di detrazione si ottiene moltiplicando due elementi:

- un importo base, che varia in funzione del reddito a seconda che sia compreso tra 75.000 e 100.000 o maggiore di 100.000 euro;
- un coefficiente correttivo legato al numero di figli appartenenti al nucleo familiare.

redditi	importo base	figli a carico	limite detrazione
> 75.000 euro < 100.000 euro	14.000 euro	+ 2 (o almeno un figlio con disabilità)	14.000 euro (14mila x 1)
		2	11.900 euro (14mila x 0,85)
		1	9.800 euro (14mila x 0,7)
		0	7.000 euro (14mila x 0,5)
> 100.000 euro	8.000 euro	+ 2 (o almeno un figlio con disabilità)	8.000 euro (8mila x 1)
		2	6.800 euro (8mila x 0,85)
		1	5.600 euro (8mila x 0,7)
		0	4.000 euro (8mila x 0,5)

Figura 2.12 - Limiti alla detrazione dei bonus edilizi in funzione del reddito. Fonte: InfoBuild.

Si conclude la panoramica sugli incentivi considerando che nei prossimi mesi è atteso il rinnovo del Conto Termico, nella sua versione aggiornata 3.0. Tale incentivo ha l'obiettivo di sostenere gli interventi per l'incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili, come biomassa, solare termico e pompe di calore.

A differenza delle agevolazioni fiscali tradizionali, come l'Ecobonus o il Superbonus, il Conto Termico non è una detrazione d'imposta, ma un contributo a fondo perduto, erogato direttamente dal GSE sul conto corrente del beneficiario, senza passare per la dichiarazione dei redditi. Con il nuovo aggiornamento, il Conto Termico 3.0 mira a diventare più accessibile rispetto al passato, ampliando la platea dei soggetti ammessi, includendo sia privati che pubbliche amministrazioni.

Le risorse complessivamente previste per questa misura sono pari a 900 milioni di euro annui, un impegno economico trascurabile se lo confrontiamo con il Superbonus, il cui impatto sulla finanza pubblica, come già evidenziato più volte è stato stimato in circa 165 miliardi di euro. Tale confronto evidenzia come il nuovo Conto Termico, pur rappresentando un passo nella direzione della sostenibilità e nel raggiungimento degli obiettivi condivisa dall'UE, si collochi in una fase molto più prudente da parte dello Stato, dopo anni di incentivi massicci a favore del fatto che in questo momento il settore edilizio si trova in una fase di forte recessione.

Dall'analisi svolta, si può affermare che stiamo attraversando un periodo di netta contrazione delle politiche incentivanti in edilizia. A seguito del boom espansivo generato dal Superbonus, il sistema degli incentivi si sta ridimensionando, con una fase di rallentamento nel settore delle costruzioni e dell'efficientamento energetico. Secondo le più recenti stime dell'ANCE^[31], per l'anno appena trascorso si registra una diminuzione reale degli investimenti nel settore delle costruzioni pari al -5,3% su base annua. Inoltre, l'ANCE prevede per il 2025 un'ulteriore contrazione, con una diminuzione del 7% su base annua, peggiorando rispetto al calo stimato per il 2024.

Questo dato conferma la tendenza negativa e mette in evidenza il calo degli interventi di riqualificazione nel settore residenziale, dovuto principalmente al fatto che le opportunità di intervento agevolato sono fortemente ridotte rispetto al triennio 2021-2023.

2.3 Direttiva EPBD IV e impatto previsto sulle politiche di riqualificazione energetica

Il surriscaldamento globale e il conseguente cambiamento climatico rappresentano oggi una delle sfide più urgenti a livello globale. Grazie alle conferenze delle parti (COP), ossia le conferenze annuali delle Nazioni Unite sul cambiamento climatico, durante le quali i Paesi di tutto il mondo si riuniscono per definire le strategie globali da intraprendere al fine di ottenere una sostenibilità ambientale.

Durante la COP29, tenutasi a Baku nel novembre 2024, è stato riportato il ruolo fondamentale dell'efficiamento energetico degli edifici nella lotta al cambiamento climatico, sottolineando la necessità di ridurre i consumi nel settore edilizio, responsabile di una parte rilevante delle emissioni globali di CO₂. Infatti, gli edifici nell'Unione Europea rappresentano circa il 40% del consumo finale di energia e sono responsabili del 36% delle emissioni di gas serra legate all'uso energetico (*Figura 2.13*).

Inoltre, il 75% del patrimonio edilizio europeo risulta ancora inefficiente sotto il profilo energetico. Un ruolo rilevante in questo contesto lo riveste il gas naturale, che costituisce la fonte principale per il riscaldamento degli ambienti domestici, coprendo circa il 39% dei consumi energetici del settore residenziale. Risulta evidente come l'efficiamento degli edifici sia una priorità strategica adottando standard costruttivi più sostenibili e tecnologie a basse emissioni.

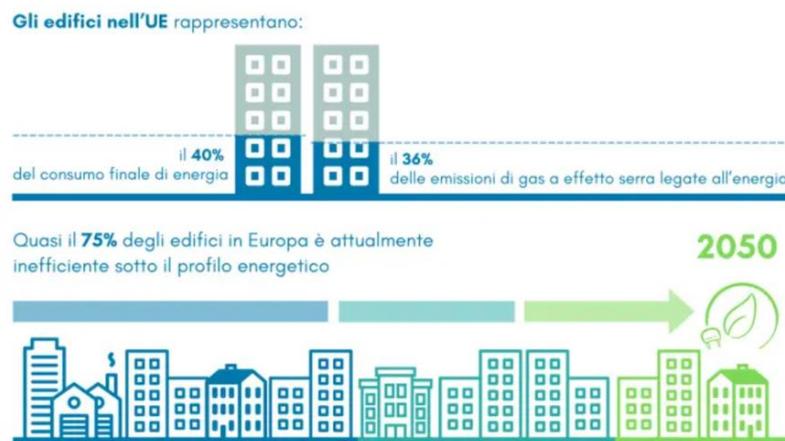


Figura 2.13 - Inefficienza ed emissioni di CO₂ del parco edilizio europeo. Fonte: BibLus

A partire da queste decisioni prese in sede internazionale, l'Unione Europea recepisce e traduce gli impegni in strategie legislative vincolanti, come nel caso del Green Deal Europeo. Il piano prevede azioni da intraprendere in diversi settori, tra cui quello edilizio, promuovendo la riqualificazione del patrimonio edilizio e destinando 72,2 miliardi di euro in sette anni per interventi a favore della sostenibilità (la cifra è minima se consideriamo che per il solo Super Ecobonus in Italia sono stati spesi circa 125 miliardi).

La Direttiva EPBD (Energy Performance of Buildings Directive), fa parte del pacchetto per l'energia pulita presentato dalla Commissione europea, contribuendo al raggiungimento degli obiettivi di transizione energetica. L'obiettivo che la UE si è posta è il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050, impegnandosi a ridurre le emissioni nette di gas serra di almeno il 55% (al netto degli assorbimenti) rispetto ai livelli del 1990 entro il 2030. Per

conseguire tali traguardi, la Commissione europea ha introdotto un pacchetto legislativo con obiettivi ancora più ambiziosi: “Fit for 55” (Pronti per il 55%), prevedendo diverse misure, ad esempio l’efficienza energetica, le energie rinnovabili, i sistemi di scambio delle quote di emissione e le infrastrutture per i combustibili alternativi. L’insieme di questi interventi rappresentano il pilastro normativo della transizione ecologica della UE.

Infine, ogni stato membro, ha il compito di recepire le direttive europee entro le scadenze fissate, attraverso dei piani nazionali, ad esempio il PNIEC (Piano Nazionale Integrato per l’Energia e il Clima) per l’Italia. All’interno vengono definiti i contributi che si impegnano a fornire per il raggiungimento dei target europei al 2030, le traiettorie e le misure che introdurranno, ad esempio le ristrutturazioni edilizie e le misure incentivanti come l’Ecobonus, il Superbonus e i futuri strumenti per sostenere la transizione energetica nel settore edilizio.

L’insieme di tutto questo processo si articola in diversi livelli, garantendo che le decisioni prese a livello globale durante le COP, trovino poi un’attuazione effettiva su scala nazionale.

Il target di riduzione delle emissioni di gas serra del 55% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2030, con l’obiettivo finale della neutralità climatica entro il 2050, rappresenta una sfida considerevole ed ambiziosa. Basti pensare che tra il 1990 e il 2020 l’Unione Europea ha ridotto le emissioni solamente del 20%, mentre ora si punta quasi a triplicare tale riduzione in meno di un decennio. In quest’ottica è nata la nuova Direttiva EPBD IV, uno strumento fondamentale per raggiungere questi obiettivi, aggiornando le misure precedenti e introducendo interventi più efficaci per il miglioramento della prestazione energetica degli edifici in tutta Europa.

La nuova Direttiva Europea EPBD IV, conosciuta come Direttiva “Case Green”^[32], è stata approvata in via definitiva dal Parlamento Europeo e pubblicata nella Gazzetta Ufficiale dell’Unione Europea l’8 maggio 2024; sostituisce la vecchia normativa energetica nel settore edilizio (EPBD III). Entrata ufficialmente in vigore il 28 maggio 2024, la norma costituisce uno degli strumenti fondamentali della strategia europea per la neutralità climatica al 2050. L’obiettivo è ridurre gradualmente le emissioni di gas serra e i consumi energetici del settore edilizio, favorendo la riqualificazione energetica del parco immobiliare esistente e promuovendo edifici ad emissioni zero. Tutti gli Stati membri dell’UE avranno tempo fino al 29 maggio del 2026 per recepire la direttiva. Inoltre, dovranno elaborare e attuare un piano nazionale di ristrutturazione degli edifici, sia residenziali che non residenziali, pubblici e privati, così da renderlo decarbonizzato e ad alta efficienza energetica entro il 2050.

La Provincia di Bolzano si conferma una tra le prime istituzioni in Europa ad aver recepito la nuova Direttiva EPBD IV. Il nuovo Regolamento in materia di prestazione energetica degli edifici introduce misure volte all’allineamento ai nuovi standard europei per ridurre progressivamente i consumi e le emissioni nel settore edilizio, contribuendo a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Un elemento chiave è il rafforzamento del protocollo CasaClima, che continua a rappresentare il riferimento per la progettazione, costruzione e certificazione degli edifici sul territorio provinciale. In Alto Adige, tutti i nuovi edifici e quelli sottoposti a ristrutturazioni importanti devono ottenere il certificato CasaClima, il quale attesta le prestazioni energetiche e la sostenibilità dell’edificio. La Classe A è il requisito minimo richiesto e il certificato, valido 10 anni, è rilasciato dall’Agenzia per l’Energia Alto Adige. La **Tabella 2.6** mostra che la classe di prestazione energetica di un edificio viene determinata considerando l’efficienza energetica dell’involucro, il fabbisogno complessivo di energia primaria, le emissioni totali di CO₂ e quelle prodotte localmente da combustibili fossili.

Classe CasaClima	Efficienza Energetica Involucro (EINER) [kWh/m ² a]	Fabbisogno Energia Primaria totale (EP _{totER}) [kWh/m ² a]	Emissioni complessive di CO ₂ (ECER) [kg CO ₂ eqv /m ² a]	Emissioni in loco di CO ₂ da combustibili fossili (CO ₂ locale) [kg CO ₂ eqv /m ² a]
Gold	≤10	≤100	≤15	0
A0	≤27	≤135	≤27	0
A	≤30	≤150	≤30	≤30
B	≤50	≤200	≤50	≤50
C	≤70	≤250	≤70	≤70
D	≤90	≤300	≤90	≤90
E	≤120	≤340	≤120	≤120
F	≤160	≤400	≤160	≤160
G	>160	>400	>160	>160

Tabella 2.6 - Classificazione energetica secondo lo standard CasaClima. Fonte: BibLus

A testimonianza dell'importanza di questa direttiva sulla politica climatica europea, alcune misure sono già state introdotte in questi mesi. Ad esempio, a partire dal 1° gennaio del 2025, sarà vietato concedere incentivi fiscali per l'installazione di caldaie uniche alimentate da combustibili fossili, in linea con l'obiettivo di ridurre progressivamente l'uso di fonti non rinnovabili. Entro il 31 dicembre del 2026, sarà obbligatoria l'installazione di impianti solari su tutti gli edifici pubblici e non residenziali che presentano una superficie utile maggiore di 250 metri quadrati. Dal 1° gennaio del 2030, tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere progettati e realizzati per essere a emissioni zero.

Entro il 2030 gli edifici residenziali dovranno raggiungere una riduzione media del consumo di energia primaria di almeno il 16% rispetto al 2020. Questo valore dovrà crescere ulteriormente, a circa 20-22% entro il 2035. Mentre, per gli edifici non residenziali, sarà necessario fissare dei requisiti minimi di prestazione energetica, da rispettare obbligatoriamente per almeno il 16% del patrimonio edilizio non residenziale entro il 2030, e per almeno il 26% entro il 2033. Infine, dal 1° gennaio 2040, scatterà il divieto di installare nuove caldaie a gas, passaggio fondamentale siccome a oggi, circa due terzi dell'energia consumata per la climatizzazione degli edifici proviene da combustibili fossili. Queste tappe sono fondamentali per indirizzare l'Europa verso l'obiettivo della neutralità climatica entro il 2050.

La nuova Direttiva Case Green impone di raddoppiare il tasso annuo di ristrutturazioni energetiche degli edifici esistenti. L'intento è di riqualificare almeno 35 milioni di unità immobiliari entro il 2030, focalizzandosi sugli edifici residenziali con le prestazioni energetiche peggiori e che hanno il potenziale più alto in termini risparmio energetico, economico e di decarbonizzazione, e pertanto la loro ristrutturazione deve essere considerata prioritaria soprattutto per i nuclei familiari economicamente svantaggiati. Infatti, nel 2021 in Italia l'8,1% della popolazione non ha avuto la possibilità di accendere l'impianto di riscaldamento durante l'inverno e scaldarsi, e il 6,5% ha avuto difficoltà a pagare le bollette. Nel 2023 invece le

percentuali sono diventate del 9,5% e del 4,1% rispettivamente. Complessivamente tutte queste misure sono state pensate per stimolare un'ondata di ristrutturazioni profonde che progressivamente potranno decarbonizzare il parco edilizio europeo^[32].

Secondo un'analisi condotta dall'Osservatorio Energy&Strategy del Politecnico di Milano^[30], per consentire all'Italia di rispettare gli obiettivi fissati dalla nuova direttiva EPBD IV, saranno necessari investimenti complessivi stimati in circa 100 miliardi di euro da qui al 2030, circa 20 miliardi all'anno. Per l'Italia la riduzione dell'energia primaria dovrà essere pari a 6,32 Mtep, di cui il 55% dovrà riguardare i consumi di energia primaria degli edifici con la classe di prestazione energetica peggiore, cioè la G.

L'analisi condotta dal CRESME afferma che il Superbonus ha permesso solamente nel 2022 di risparmiare 0,72 Mtep, diversamente da quanto stimato dal Ministero dell'Ambiente, e stima che altri quattro anni con risultati simili, considerando anche tutti gli altri incentivi fiscali per l'edilizia, avrebbe permesso di raggiungere l'obiettivo posto al 2030 con qualche anno di anticipo; ma con un enorme debito a carico dello Stato.

Questo risultato porta a pensare nuovamente che l'obiettivo posto dalla UE è molto ambizioso, ma che con le opportune strategie è possibile raggiungere. Inoltre, gli interventi dovranno interessare almeno il 43% del patrimonio edilizio più obsoleto e meno efficiente, pari a oltre 500 mila edifici pubblici e, circa 5 milioni di edifici residenziali su un totale di 12 milioni stimati dall'ISTAT. Circa il 60% degli edifici esistenti ha oltre 45 anni, essendo stati costruiti prima dell'entrata in vigore della prima legge in materia di risparmio energetico. Anche se, il settore pubblico incide per il 5-10% sul consumo totale di energia finale nell'UE, la direttiva impone anche la riduzione del consumo di energia primaria degli enti pubblici.

Gli obiettivi fissati dalla direttiva risultano molto ambiziosi, ma solo grazie ad un piano di riqualificazione profonda in linea con gli obiettivi europei per la decarbonizzazione del settore edilizio si potrà cercare di raggiungere.

Un ulteriore studio conferma il fatto che però, l'Italia ha già raggiunto più del 50% dei traguardi fissati dall'Unione Europea per il 2030^[33]. Secondo un'indagine condotta da Nomisma per ROCKWOOL, i principali incentivi fiscali in ambito edilizio hanno permesso di raggiungere un risparmio energetico pari all'8,9%, contribuendo al percorso verso il target europeo del 16% di riduzione dei consumi. A maggio del 2024 la percentuale degli edifici italiani che rientrava nelle classi di prestazione energetica peggiori (F e G) è scesa al 54%, a evidenza del fatto che siamo sulla buona strada ma molto resta da fare.

◆ Cosa contiene l'EPBD IV?

All'interno della direttiva vengono affrontati numerosi temi, tra questi, particolare rilievo assumono: il piano nazionale di ristrutturazione degli edifici che ogni stato membro dovrà elaborare, il vincolo che i nuovi edifici dovranno essere idonei a ospitare impianti fotovoltaici o solari termici sui tetti, il passaporto di ristrutturazione, una nuova metodologia per il calcolo della prestazione energetica, l'applicazione dei requisiti minimi di prestazione energetica da raggiungere per gli edifici esistenti e nuovi, definiti i livelli ottimali in funzione dei costi per rendere economicamente sostenibili gli interventi, lo sviluppo delle infrastrutture per la mobilità sostenibile, la predisposizione degli edifici all'intelligenza, l'obbligo di calcolare il GWP (Global Warming Potential) nel corso del ciclo vita degli edifici, considerando le

emissioni generate dai materiali da costruzione e le emissioni dirette e indirette rilasciate nella fase di utilizzo, ponendo una maggiore attenzione all'economia circolare e altri temi ancora.

Si evidenzia il passaggio concettuale da *NZEB*, edifici a energia quasi zero, a *ZEmB*, cioè edifici a emissioni zero. I primi sono caratterizzati da un fabbisogno energetico molto basso coperto in larga parte da fonti rinnovabili, mentre i secondi si distinguono per non generare emissioni dirette di carbonio da fonti fossili e per avere emissioni operative di gas serra molto basse o nulle. Tra tutti i temi presenti all'interno della direttiva, siccome il seguente lavoro riguarderà il calcolo del risparmio energetico e del performance gap in seguito alla realizzazione di interventi di riqualificazione, si pone particolare attenzione all'evoluzione della metodologia di calcolo della prestazione energetica.

Nonostante sia stato aggiornato il quadro normativo in tema di efficienza energetica degli edifici, la priorità politica europea è cambiata. La Presidente della Commissione europea, Ursula von der Leyen, infatti, ha dichiarato che la sicurezza è tornata a essere la priorità dell'UE, superando il Green Deal. L'UE sta sostenendo militarmente l'Ucraina attraverso l'impiego di una quantità significativa di risorse che potrebbero invece, essere destinate alla transizione energetica e quindi all'efficientamento energetico degli edifici.

Infatti, un dato oggettivo di questo cambio di rotta è rappresentato dall'aumento della spesa militare europea, che nel 2023 ha raggiunto i 590 miliardi di euro, segnando un incremento del 16% rispetto all'anno precedente, secondo quanto riportato dallo Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) ^[30]. Queste ingenti spese, oltre agli obiettivi già di per sé ambiziosi fissati per il 2050, rendono il loro conseguimento più complesso e sfidante.

2.3.1 Quadro comune generale per il calcolo della prestazione energetica degli edifici (allegato I)

La nuova metodologia utilizzata per determinare la prestazione energetica degli edifici, rispetto al passato, introduce una valutazione più completa. Oltre ai tradizionali parametri energetici, come la capacità termica, l'isolamento, i ponti termici, il rendimento degli impianti di riscaldamento, la nuova metodologia include una serie di aspetti finora trascurati ma sempre più rilevanti:

- la capacità dell'edificio di produrre e accumulare energia da fonti rinnovabili in loco;
- sistemi di automazione e controllo degli edifici e relative capacità di monitorare, controllare e ottimizzare la prestazione energetica (sistemi intelligenti);
- sistemi solari passivi e protezione solare (schermature);
- il recupero termico dell'aria viziata o delle acque reflue.

Viene inoltre presa in considerazione la qualità dell'ambiente interno, l'illuminazione naturale e soprattutto la progettazione degli edifici secondo l'architettura bioclimatica, adattandosi alle condizioni climatiche esterne, come per esempio il vento, la luce solare, strategie che consentono di garantire livelli di comfort termico elevati all'interno delle abitazioni.

Anche l'APE subisce alcune modifiche, per cominciare le classi di prestazione energetica A1, A2, A3 e A4 verranno unite in un'unica classe A (**Figura 2.14**). La nuova classe A sarà riservata agli edifici a emissioni zero, mentre la classe G continuerà a indicare quelli con le peggiori prestazioni energetiche presenti. Se entro due anni dall'entrata in vigore della direttiva,

gli stati hanno già adottato la denominazione “A0” per identificare gli edifici a emissioni zero, possono mantenere tale classificazione al posto della classe A. Gli stati membri potranno introdurre una classe superiore, la A+, per identificare gli edifici che presentano un consumo energetico annuo inferiore di almeno il 20% rispetto al limite previsto per gli edifici a emissioni zero, e che producono localmente, su base annuale, una quantità di energia rinnovabile superiore al proprio fabbisogno di energia primaria. Inoltre, nel caso di edifici esistenti riqualificati per raggiungere la classe A+, gli stati membri devono assicurare che l’impatto ambientale complessivo, espresso con il GWP lungo l’intero ciclo di vita, venga calcolato e indicato all’interno dell’APE.

La metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, si basa sulla misurazione o il calcolo del consumo energetico che deve rispecchiare il più possibile il consumo energetico normale in condizioni standard (per il riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ventilazione, illuminazione e altri sistemi) espresso in kWh su metro quadro all’anno.

La direttiva nomina le seguenti norme: EN ISO 52000-1, EN ISO 52003-1, EN ISO 52010-1, EN ISO 52016-1, EN ISO 52018-1, EN ISO 52120-1, EN 16798-1 e EN 17423 già recepite da UNI. La metodologia deve cercare di allineare il più possibile il consumo normale con le condizioni d’uso effettive e rispecchiare le condizioni d’uso standard, basandosi su misure periodiche (minimo mensili, ma anche orari o suborari e distinte per vettore energetico) e dati statistici. Se si utilizzano i dati misurati per la valutazione dei consumi normali, si può definire l’effetto del comportamento degli occupanti e delle condizioni climatiche in modo da escluderle dal calcolo della prestazione energetica dell’edificio.

Per verificare se i consumi calcolati sono in linea con quelli misurati, è possibile utilizzare i dati di consumo energetico in condizioni standard in modo da confrontare le prestazioni calcolate con quelle effettivamente registrate. Così come nel vecchio APE anche ora la prestazione energetica di un edificio viene espressa in kWh su metro quadro all’anno di energia primaria.

Per valutare le prestazioni energetiche di un edificio, si adottano indicatori numerici che misurano il consumo complessivo di energia primaria, sia da fonti rinnovabili che non rinnovabili, nonché le emissioni operative di gas a effetto serra, espresse in kg di CO₂ equivalente per metro quadro all'anno.

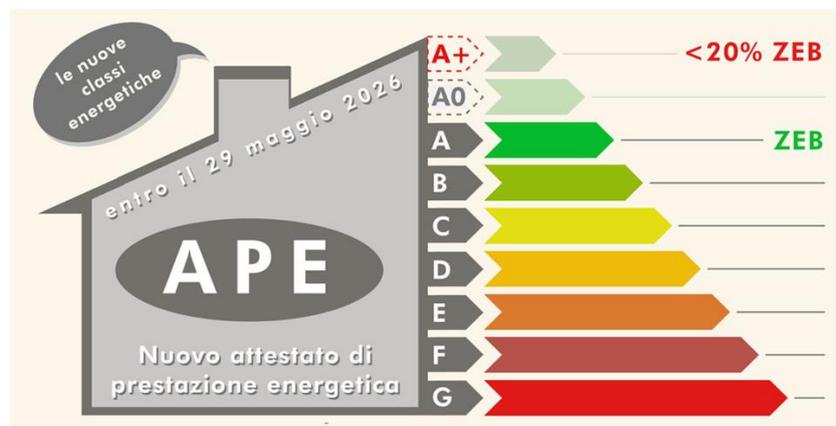


Figura 2.14 - Le nuove classi energetiche dell’APE e gli edifici ZEB

2.4 L'impatto delle politiche di incentivazione sulla diffusione di nuove tecnologie per la riqualificazione energetica.

I dati presentati in questa sezione provengono dal rapporto annuale sulle Detrazioni Fiscali per interventi di Efficientamento Energetico e utilizzo di Fonti Rinnovabili ^[10], elaborato dal dipartimento unità per l'efficienza energetica di ENEA per gli edifici esistenti a livello nazionale, sulla base delle informazioni e dei dati disponibili al 30 novembre 2024. L'obiettivo dell'analisi è individuare le tecnologie maggiormente adottate, valutandone la diffusione e il successo nell'ambito delle agevolazioni fiscali.

L'intervento che ha generato il maggior impatto in termini di risparmio energetico e volume di investimenti è rappresentato dalla sostituzione degli impianti termici con sistemi ibridi (45% dei risparmi energetici e 34% di investimenti effettuati). Seguono, per rilevanza, le pompe di calore elettriche a compressione di vapore e le caldaie a condensazione. Altri interventi, come l'installazione di impianti a biomassa, collettori solari, sistemi di automazione e controllo (building automation), e la sostituzione degli scaldacqua tradizionali con modelli a pompa di calore, risultano caratterizzati da una minore incidenza di risparmio energetico.

In **Figura 2.15** si possono valutare i risparmi energetici ottenuti e gli investimenti effettuati, in funzione della tecnologia impiantistica adottata. È possibile valutare anche i risparmi energetici conseguiti in funzione della zona climatica, il teleriscaldamento ha portato maggiori risparmi nella zona climatica F, come evidenziato in **Figura 2.16**. Le pompe di calore elettriche a compressione di vapore, i sistemi ibridi, gli scaldacqua a pompa di calore, i collettori solari e le soluzioni di building automation sono soluzioni impiantistiche maggiormente installate nelle zone climatiche C e D.

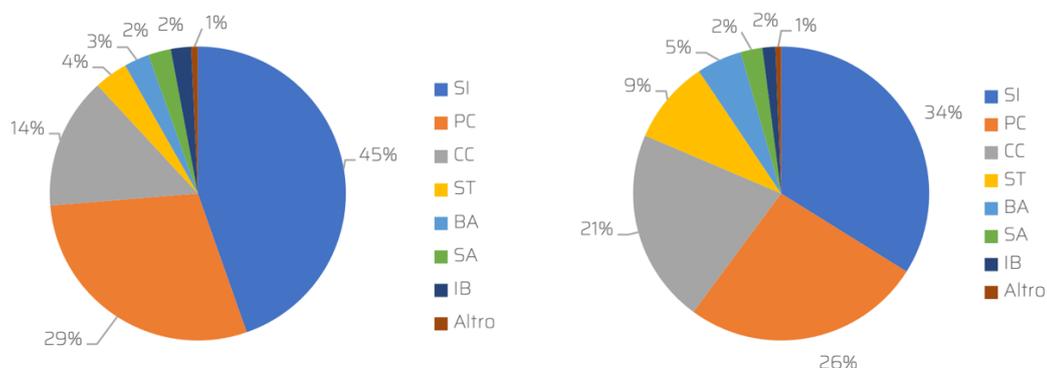


Figura 2.15 - Super Ecobonus 2023. Ripartizione per tecnologia dei risparmi energetici conseguiti (figura a sinistra) e degli investimenti effettuati (figura a destra) su scala nazionale per gli interventi sugli impianti termici agevolati. Fonte: ENEA

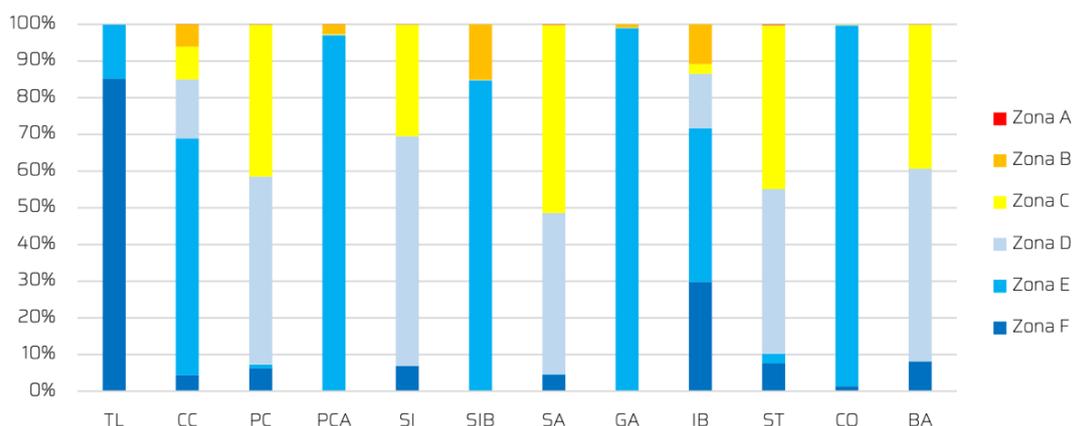


Figura 2.16 - Distribuzione per zona climatica dei risparmi energetici connessi a ciascuna tecnologia adottata. Fonte: ENEA

I risparmi energetici ottenuti attraverso l'adozione di tecnologie per l'efficiamento degli impianti termici, suddivisi per zona climatica, sono rappresentati in **Figura 2.17**. Dall'analisi emerge chiaramente che i sistemi ibridi, indicati con il colore azzurro, costituiscono la tecnologia con il maggior contributo al risparmio energetico, seguiti dalle pompe di calore a compressione di vapore elettriche (colore grigio) e dalle caldaie a condensazione (colore arancione). Questo conferma che, nella zona climatica E, la tipologia impiantistica più frequentemente adottata risulta essere il sistema ibrido, come sarà confermato nei casi studio analizzati nei capitoli successivi.

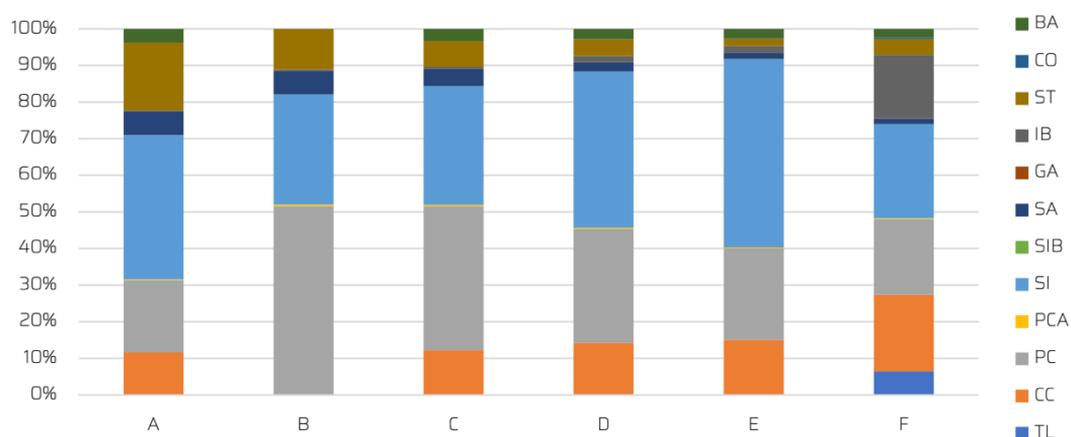


Figura 2.17 - Distribuzione dei risparmi energetici per tecnologia adottata, in ciascuna zona climatica

In **Figura 2.18** i sistemi ibridi risultano essere la tecnologia prevalente nella maggior parte delle regioni italiane, fatta eccezione per la Sardegna, dove si registra una maggiore diffusione delle pompe di calore elettriche. Anche nel Friuli-Venezia Giulia, regione oggetto dei casi studio, si conferma questa tendenza, con i sistemi ibridi come soluzione impiantistica maggiormente adottata.

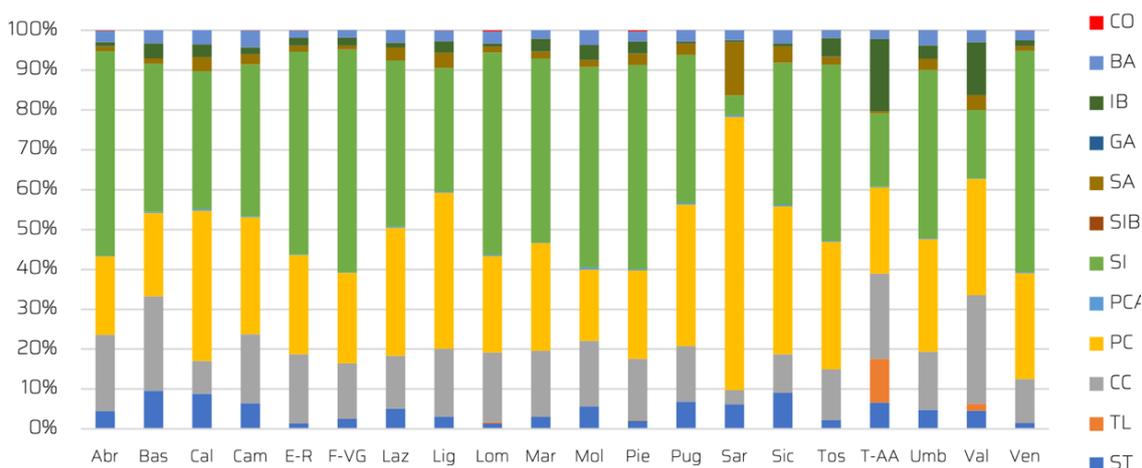


Figura 2.18 - Distribuzione regionale dei risparmi energetici conseguiti per tecnologia installata

Come evidenziato in **Figura 2.19**, le configurazioni di pompe di calore aria/aria e aria/acqua risultano essere le più diffuse su tutto il territorio nazionale, indipendentemente dalla zona climatica. In particolare, le pompe di calore aria/aria presentano le maggiori potenze installate nella zona climatica A, con un utilizzo progressivamente decrescente nelle zone più fredde, dove si registra invece un aumento delle installazioni di pompe di calore aria/acqua.

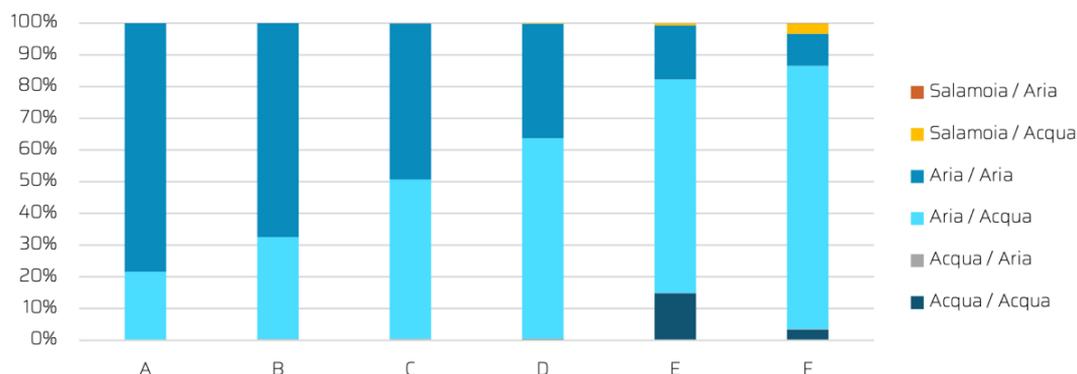


Figura 2.19 - Distribuzione delle pompe di calore elettriche rispetto alla potenza installata, per ciascuna zona climatica

◆ Il mercato delle pompe di calore

Nel 2022 i principali materiali da costruzione hanno visto un aumento dei prezzi esagerato, legato a dinamiche straordinarie post-pandemiche; successivamente si è osservato un graduale ritorno ai livelli pre-Covid. Questo rientro verso la normalità è stato favorito dalla progressiva limitazione di strumenti fiscali come la cessione del credito e lo sconto in fattura, che hanno ridotto l'accessibilità agli incentivi per molti interventi.

Le tecnologie che hanno risentito maggiormente di queste restrizioni sono state le caldaie a condensazione di piccola potenza (fino a 35 kW), con un decremento delle vendite nel 2023 rispetto al 2022 del 22% e rispetto al 2021 del 16%, e le pompe di calore per uso domestico (fino a 17 kW). Sebbene il calo registrato nel 2023 nel mercato delle caldaie a condensazione vada interpretato rispetto l'anno precedente, è fondamentale non perdere di vista gli obiettivi ambiziosi di decarbonizzazione del parco edilizio italiano: zero emissioni entro il 2050. In tale

contesto, le caldaie alimentate a biocombustibili potranno assumere un ruolo rilevante, proprio come previsto dalla Direttiva EPBD IV. Secondo quest'ultima, a partire dal 1° gennaio 2025 non sono più incentivabili le caldaie uniche alimentate da combustibili fossili, e dal 1° gennaio 2040 potranno essere immesse sul mercato solo caldaie a condensazione a gas metano o GPL compatibili con i cosiddetti "*Green Gas Ready*", cioè caldaie predisposte per funzionare, in futuro, con gas rinnovabili, come ad esempio biometano, idrogeno o miscele di gas verdi, senza necessità di sostituzione dell'apparecchio.

Dopo il boom di vendite registrato nel 2022, trainato dall'elevata diffusione degli incentivi e dalle tensioni sul mercato del gas dovute al conflitto Russia-Ucraina, nel 2023 così come è avvenuto per le caldaie a condensazione, anche per il mercato italiano delle pompe di calore, si è riscontrato un andamento diverso. Secondo i dati annuali di Assoclimate, si è osservato un rallentamento nel settore residenziale, in particolare per le apparecchiature di piccola taglia (fino a 17 kW), dovuto soprattutto alla ridotta accessibilità dell'incentivo, vista l'eliminazione della cessione del credito e dello sconto in fattura. Tuttavia, questo calo non ha interessato le pompe di calore di taglia maggiore: nel settore commerciale, infatti, le vendite sono aumentate, mostrando una tendenza positiva per i sistemi di potenza medio-grande.

Nel 2023 il mercato dei sistemi ibridi ha subito una fase di recessione, legato principalmente al costo più elevato rispetto ad altre soluzioni per la climatizzazione invernale. Rispetto al 2022, si registra un calo significativo: -75% in termini di unità vendute e -72% in termini di fatturato.

Si registra ulteriormente un cambiamento nel primo semestre del 2024, secondo Assoclimate il mercato italiano delle pompe di calore mostra una crescita delle vendite pari a circa il 14%, segnalando una ripresa rispetto l'anno precedente. Tale dinamica positiva, si manifesta sia per il settore residenziale con pompe di calore di piccola taglia che per quello commerciale aventi taglia maggiore. Tuttavia, i sistemi ibridi continuano a mostrare segnali negativi: nei primi sei mesi del 2024, infatti, si osserva una riduzione del 69% delle vendite rispetto allo stesso periodo dell'anno precedente; questa fase di recessione è strettamente legata alla rimozione delle principali agevolazioni fiscali, le quali non garantiscono più la convenienza economica dell'installazione di questa soluzione impiantistica.

Riassumendo, nel 2023 si è registrata una recessione del mercato delle pompe di calore nel settore residenziale, dovuta alle nuove limitazioni introdotte, in netta contrapposizione con gli obiettivi di decarbonizzazione al 2030 e al 2050 e con il ruolo strategico assegnato a tale tecnologia dal PNIEC. Invece, in ambito non residenziale si ha una forte espansione dello stesso mercato, riconducibile a diversi fattori, tra cui una maggiore attenzione verso l'efficienza energetica degli edifici e una maggiore convenienza economica. Infatti, negli edifici commerciali si tende a realizzare interventi di efficientamento energetico, allo scopo di ridurre i costi operativi in particolare quelli legati al consumo energetico e di aumentare il valore di mercato degli immobili.

Negli ultimi anni, le pompe di calore si sono imposte come una delle soluzioni più sostenibili ed efficaci per la climatizzazione degli edifici, grazie all'utilizzo di fonti rinnovabili e al loro contributo nella riduzione delle emissioni di gas serra. In passato, gli interventi più comuni riguardavano la sostituzione delle caldaie tradizionali con modelli a condensazione, che, pur più efficienti, continuavano a generare emissioni di CO₂.

L'introduzione del Superbonus 110% ha dato un forte impulso alla diffusione delle pompe di calore nel settore residenziale, con una crescita significativa fino al 2022. A partire dal 2023,

però, si è verificato un rallentamento momentaneo, anche se i dati del primo semestre del 2024 indicano un aumento delle vendite. Le pompe di calore si confermano una tecnologia strategica per il percorso di decarbonizzazione e per il raggiungimento della neutralità climatica al 2050, con ulteriori margini di miglioramento legati alla riduzione delle emissioni indirette associate all'uso di refrigeranti e all'origine dell'energia elettrica impiegata.

Si conclude affermando che il Superbonus 110% ha favorito la diffusione dei sistemi di Building Automation (BA) nel settore terziario. Queste tecnologie rendono gli edifici più intelligenti ed efficienti. Gli interventi ammessi come “trainati” devono essere realizzati congiuntamente a uno degli interventi principali e consentono la gestione automatizzata degli impianti di riscaldamento, climatizzazione e produzione di acqua calda attraverso un controllo avanzato. L'obiettivo di un sistema di BA è ottimizzare comfort, sicurezza ed efficienza energetica. Il controllo integrato degli impianti consente una gestione precisa e adattativa del loro funzionamento, regolata sulle reali necessità degli occupanti in tempo reale, migliorando così il comfort abitativo e riducendo i consumi energetici. I sistemi possono fornire dati sui consumi, permettere il controllo remoto degli impianti e garantire una regolazione personalizzata della temperatura. Si tratta di soluzioni semplici da installare, capaci di migliorare significativamente le prestazioni energetiche dell'edificio, aumentare il comfort abitativo e monitorare eventuali anomalie, trasformando edifici in strutture connesse e tecnologicamente avanzate.

2.5 Confronto con normative e incentivi per la riqualificazione energetica in altri Paesi europei.

In seguito verranno confrontate le principali misure di incentivazione per l'efficienza energetica adottate nei maggiori paesi europei, partendo dalla Francia, passando poi per l'Inghilterra e il Galles e infine alla Germania. L'obiettivo è quello di fornire una panoramica dei sistemi di sostegno edilizio utilizzati a livello internazionale, mettendoli poi a confronto con il modello italiano, in particolare con il Superbonus 110%, per valutarne differenze ed efficacia dal punto di vista tecnico, economico e normativo ^{[34], [35]}.

◆ Politiche di riqualificazione energetica in Francia

In Francia, il credito d'imposta per la transizione energetica, che garantiva detrazioni tra il 15% e il 30%, è stato rimpiazzato nel 2021 da un programma di sussidi denominato "*Ma Prime Rénov*", il cui importo dipende dal reddito familiare e le famiglie vengono classificate in 4 categorie. Ad ogni famiglia viene associato un colore distintivo (blu, giallo, viola e rosa), che identifica l'aiuto economico spettante:

- **Blu**: riguarda le famiglie con redditi più bassi, fino a 21.760 euro annui per una coppia senza figli (fuori dall'Île-de-France) e 30.225 euro all'interno dell'Île-de-France;
- **Giallo**: corrisponde a una fascia intermedia, immediatamente superiore a quella blu;
- **Viola**: indica nuclei con reddito più elevato rispetto a quello giallo;
- **Rosa**: è destinato alle famiglie con reddito superiore a 42.848 euro (fuori Île-de-France) e 56.130 euro (in Île-de-France) per una coppia senza figli, che quindi accedono ad aiuti ridotti.

Questa classificazione permette l'ottenimento di un incentivo proporzionato al reddito e quindi erogato in base alla capacità economica. Ad esempio, una coppia senza figli appartenente alla fascia blu (redditi più bassi) riceverà un incentivo di 10.000 euro per la sostituzione di una vecchia caldaia con una a pellet, oppure 8.000 euro per l'installazione di un impianto di riscaldamento solare. La stessa coppia, se rientrasse nella fascia rosa (redditi più alti), non otterrebbe alcun contributo per questi interventi.

Anche per gli interventi di isolamento termico, l'aiuto è diverso: una famiglia "blu" riceve 75 €/m² per l'isolamento dei muri esterni e 25 €/m² per l'isolamento del sottotetto, mentre una famiglia "rosa" percepisce tra i 7 e i 15 €/m² per gli stessi interventi. Tuttavia, le famiglie della fascia rosa possono comunque beneficiare di altri incentivi cumulabili, come i Certificati di Risparmio Energetico (CEE), accessibili a tutti, indipendentemente dal reddito. Per quanto riguarda i condomini, il contributo può coprire fino al 25% della spesa totale, con un massimo di 3.750 euro per unità abitativa, a cui si può aggiungere un bonus di 500 euro per ogni alloggio che non si trova più nelle classi energetiche F o G.

Inoltre, il sussidio viene erogato solo se, anche dopo l'intervento, viene confermato tramite asseverazione, l'effettivo impatto dell'efficientamento realizzato sui consumi energetici, a differenza del Superbonus 110%. Il programma "Ma Prime Rénov" ha riscosso molto successo in Francia, con oltre 190.000 richieste inviate in circa un anno all'Agenzia Nazionale per l'Alloggio (ANAH), l'ente incaricato della gestione dell'incentivo. Questo dato testimonia la forte adesione dei cittadini francesi verso le misure di riqualificazione energetica degli edifici.

◆ Politiche di riqualificazione energetica in Inghilterra e in Galles

Si passa ora all'analisi del sistema di incentivazione in Inghilterra e in Galles per promuovere l'efficienza energetica nel settore edilizio. A partire dal 1° aprile 2018, è stato introdotto l'obbligo di non poter più stipulare nuovi contratti di affitto sia per immobili residenziali che per quelli commerciali che non siano almeno in classe energetica E. Successivamente, dal 1° aprile 2020, tale obbligo è stato esteso anche ai contratti di locazione già attivi, imponendo quindi la realizzazione di interventi di efficientamento energetico sugli edifici, nel caso in cui questi ultimi non siano almeno in classe energetica E. In caso di inadempienza, sono previste sanzioni economiche a carico dei proprietari.

Da sottolineare che non sono previsti incentivi statali a fondo perso, ma piuttosto strumenti finanziari come prestiti a tasso agevolato per la realizzazione degli interventi di efficientamento, ripagati grazie ai risparmi energetici ottenuti in bolletta. Non sono previsti incentivi a fondo perduto in quanto si ritiene che i costi degli interventi siano economicamente sostenibili per i proprietari immobiliari.

In particolare, la normativa sugli standard per l'efficienza energetica minima (MEES), introdotta nel 2018, stabilisce dei tetti di spesa massima per i proprietari degli immobili che devono portare l'edificio almeno alla classe energetica E; e pari a 3.500 sterline. Gli interventi possono includere l'isolamento delle pareti, la sostituzione degli impianti, i pannelli solari termici e altre opere ancora. Nel caso in cui non si riesca a raggiungere la classe energetica E, la normativa impone comunque al proprietario di investire fino a 3.500 sterline per ottenere il massimo risparmio. Ciò risponde alla logica che, anche per edifici particolarmente degradati o difficili da ristrutturare, deve essere comunque effettuato il miglior intervento tecnicamente realizzabile. In linea con una normativa in costante evoluzione verso requisiti energetici più

stringenti, nei prossimi anni saranno introdotte nuove restrizioni: l'obiettivo è raggiungere la classe C entro il 2030.

In Italia, gli incentivi per l'efficientamento energetico sono spesso erogati senza una preventiva analisi del rapporto costi-benefici. I benefici fiscali vengono riconosciuti automaticamente per tutti gli interventi che rientrano in specifiche categorie, a prescindere dall'effettiva efficacia energetica. Un esempio è rappresentato dalla possibilità di accedere al Superbonus 110% realizzando un intervento trainante congiuntamente al doppio salto di classe, e beneficiando così del rimborso anche per altri interventi non necessariamente prioritari.

In Inghilterra e in Galles, non sono previste risorse pubbliche a fondo perduto per la riqualificazione energetica. L'approccio si basa invece sull'accesso a prestiti da restituire, spesso a condizioni agevolate. In Italia, al contrario, gli investimenti nel settore edilizio sono stati fortemente trainati da risorse pubbliche, come dimostra il Super Ecobonus, che ha consentito la copertura integrale delle spese maggiorate di un ulteriore 10% se entro i limiti. Lo Stato italiano ha finanziato completamente questi interventi, senza considerare la reale riduzione dei consumi energetici sull'entità degli incentivi. Ciò significa che l'incentivo è concesso indipendentemente dall'entità del risparmio ottenuto, portando a situazioni in cui l'investimento pubblico non è direttamente proporzionale ai benefici energetici realizzati. Il principio da seguire dovrebbe essere, invece, quello stabilito dalle direttive europee, orientato al raggiungimento delle classi energetiche più elevate e garantendo un maggiore sostegno alle fasce di popolazione in condizione di povertà energetica.

Un'ulteriore problematica da considerare è che le risorse pubbliche sono limitate e il debito è elevato, quindi, destinare fondi a interventi solo sul settore privato rischia di compromettere investimenti più urgenti, come quelli su scuole e ospedali.

◆ **Politiche di riqualificazione energetica in Germania**

L'ultimo Paese preso in esame per completare il confronto sulle principali politiche di incentivazione adottate in Europa è la Germania. Con l'introduzione nel 2020 di un sistema di detrazione fiscale pari al 20% dei costi degli interventi, distribuito su tre anni e che resterà in vigore fino al termine del 2029.

Tale sistema equivale alla versione tedesca dell'Ecobonus, consentendo ai proprietari delle abitazioni di detrarre il 20% delle spese sostenute per realizzare interventi di ristrutturazione energetica, fino a un importo massimo di 200.000 euro per un beneficio complessivo di 40.000 euro. La detrazione è distribuita su tre anni: 7% nel primo e secondo anno, 6% nel terzo. Ad esempio, per una spesa di 100.000 euro, il contribuente ottiene 20.000 euro di detrazione: 7.000 euro nei primi due anni e 6.000 nel terzo e ultimo anno.

Inoltre, è stata eliminata l'IVA per l'installazione di pannelli solari e parallelamente sono stati attivati e incrementati i contributi pubblici a sostegno dell'efficientamento energetico degli impianti di riscaldamento e raffrescamento nel settore residenziale. Negli ultimi anni il numero di richieste per la realizzazione degli interventi di efficientamento energetico degli edifici sta crescendo. Questo forte incremento delle richieste è legato all'aumento dei fondi stanziati dal governo: in particolare, i finanziamenti destinati alla riqualificazione energetica degli edifici sono passati da 1,85 miliardi di euro nel 2019 a 8,6 miliardi di euro nel 2020.

◆ Il confronto con l'Italia

Si può concludere che rispetto le principali nazioni europee, l'incentivazione fiscale per la riqualificazione energetica in Italia, si distingue per la sua significativa generosità. Anche escludendo il Superbonus 110%, le agevolazioni italiane offrono vantaggi enormi, sia in termini di percentuali di detrazione che di importi massimi ammessi. A ciò si aggiunge un'ampia estensione del perimetro di interventi agevolabili e degli immobili coinvolti, che include sia edifici unifamiliari che condomini, con pochi vincoli legati al reddito dei beneficiari.

Pur essendo comuni gli obiettivi della Comunità Europea, le politiche incentivanti per l'efficienza energetica sono notevolmente diverse tra l'Italia e gli altri paesi europei. All'estero le detrazioni fiscali e i crediti d'imposta non sono sempre utilizzati e, vengono concessi ai soli proprietari delle abitazioni principali. Al contrario, in Italia questi strumenti sono disponibili per qualsiasi tipo di abitazione (principale, secondaria, in affitto) e per qualunque persona che vi risieda legalmente, inclusi anche gli affittuari. In Italia, gli incentivi legati all'IVA per migliorare l'efficienza energetica degli edifici sono più limitati se comparati con quanto avviene all'estero, dove tali meccanismi risultano più frequenti.

Il Superbonus 110% risulta molto più generoso e permissivo rispetto agli incentivi adottati da altri Stati europei, dove i bonus fiscali sono limitati a precise fasce di reddito e, la cui entità dipende fortemente dai risparmi energetici ottenuti. All'estero, l'accesso ai bonus e la loro entità sono proporzionali rispetto alla capacità economica dei nuclei familiari, con l'obiettivo di favorire le fasce più deboli della popolazione. Questa logica risponde alla necessità di rendere le politiche di efficientamento energetico non solo strumenti di sostenibilità ambientale, ma anche di equità sociale.

L'Italia ha spesso trascurato l'esigenza di orientare le risorse pubbliche verso le famiglie meno abbienti, ma grazie all'introduzione del Superbonus 110% ha cercato di permettere anche alle fasce più deboli della popolazione di beneficiare degli interventi di riqualificazione energetica, grazie agli strumenti della cessione del credito e dello sconto in fattura, che hanno eliminato la necessità di un esborso economico iniziale. Questo ha favorito anche i contribuenti con redditi più bassi.

Tuttavia, il Superbonus è stato usato principalmente da proprietari di abitazioni unifamiliari e chi ha potuto beneficiarne più facilmente sono state famiglie con redditi medio-alti, perché hanno avuto più facilità di accesso al credito per avviare i lavori, più dimestichezza con le procedure burocratiche a differenza delle famiglie vulnerabili che vivono più spesso in affitto. Il Superbonus ha aumentato la quantità di lavori nel settore edilizio, ma non ha avuto un carattere strategico, in quanto gli edifici con i consumi energetici più alti (che emettono quindi più CO₂) non sono stati la priorità degli interventi. Anche il BPIE afferma che l'incentivo non ha centrato gli obiettivi sociali ed ambientali, risultando ingiusto e inefficace su entrambi i piani.

In sintesi, mentre l'Italia si è distinta per l'uso esteso di detrazioni fiscali con aliquote elevate, in molti altri Paesi europei l'approccio include sussidi diretti e/o misure IVA agevolate, che possono essere più accessibili, soprattutto alle fasce di popolazione meno abbienti.

3. METODOLOGIA

Il presente capitolo è dedicato alla descrizione delle metodologie teoriche che costituiscono la base dell'intero lavoro di tesi. Verranno analizzati i modelli di calcolo adottati per eseguire le valutazioni energetiche prima e dopo la realizzazione degli interventi, ponendo particolare attenzione alla normativa tecnica e agli studi presenti in letteratura scientifica.

Di seguito si illustreranno le principali formule utilizzate per la determinazione dei consumi energetici, dei risparmi ottenuti e della prestazione energetica degli edifici. Le analisi conseguite, supportate da modelli di calcolo standardizzati, permettono di valutare gli effetti dei diversi interventi di efficientamento energetico oggetto di studio, e costituiscono la base per il confronto dei risultati presentati nei capitoli successivi.

3.1 Interpolazione di dati energetici

Nei tre condomini residenziali oggetto di studio, le letture dei contatori di gas ed energia elettrica non risultano sempre allineate con l'inizio del mese e, in almeno due occasioni, si sono verificati buchi di lettura. Sebbene il contatore incrementale registri correttamente il consumo totale, l'assenza di letture intermedie impedisce di conoscere la distribuzione mensile dei consumi. Per ricostruire un andamento coerente nel tempo, sono stati utilizzati due modelli di interpolazione.

Inoltre, per effettuare analisi dettagliate, tra cui il confronto dei consumi energetici mensili prima e dopo gli interventi di efficientamento, risulta essenziale stimare con precisione i valori delle letture relative all'inizio di ciascun mese. Questo è necessario per determinare con accuratezza i consumi mensili effettivamente attribuibili al mese corrispondente. Tale problema viene risolto ricostruendo il profilo di consumo energetico attraverso tecniche di interpolazione, che permettono di stimare i valori mancanti. Il misuratore di energia elettrica della Schneider appartiene alla classe di precisione 1, con un errore massimo pari a $\pm 1\%$, mentre i misuratori di portata della tipologia a turbina presentano un errore massimo di misura pari a $\pm 2\%$ tra la portata minima e di transizione e $\pm 1\%$ tra portata di transizione e massima. Quindi l'accuratezza minima sarà del 98%. Infine, i contacalorie della tipologia a ultrasuoni, marca Maddalena, presentano errori di misura massimi compresi tra $\pm 5\%$.

L'interpolazione è una tecnica utilizzata per stimare valori sconosciuti di una funzione all'interno di un intervallo definito, basandosi su un insieme di punti noti, nel nostro caso le letture e i consumi corrispondenti. In altre parole, attraverso l'interpolazione si costruisce una funzione che passa esattamente per tutti i punti noti, permettendo di approssimare l'andamento dei consumi energetici in posizioni intermedie in cui la lettura è incognita.

Inizialmente, per interpolare i dati di consumo è stata tentata l'applicazione di funzioni polinomiali dal quarto fino al sesto grado, utilizzando le linee di tendenza presenti nel programma Excel. Tuttavia, tali interpolazioni hanno evidenziato un eccessivo apprendimento ai punti noti (fenomeno noto come *overfitting*), con la comparsa di oscillazioni irrealistiche tra i punti misurati. Questo comportamento indesiderato, conosciuto come *effetto di Runge*, ha portato ad ottenere stime non coerenti con la natura incrementale dei contatori di energia

termica ed elettrica, soprattutto nei punti estremi del dominio. Infatti, i contatori utilizzati per la misura dei consumi sono di tipo incrementale, ovvero dispositivi che forniscono letture cumulative, mostrando valori continuamente crescenti nel tempo, dato che ogni nuova lettura somma il consumo avvenuto dal momento della prima installazione.

Le interpolazioni polinomiali di alto grado hanno prodotto addirittura valori decrescenti, violando così il requisito fondamentale della monotonia e determinando risultati fisicamente impossibili rispetto al funzionamento stesso del misuratore. Questo limite matematico è intrinseco ai polinomi di grado elevato, specialmente quando i punti sono caratterizzati da valori delle ascisse molto distanti tra loro.

Per ricostruire le letture nei giorni mancanti, si è scelto di applicare due modelli: un'interpolazione più complessa nota come spline cubica e una semplice interpolazione lineare, per poi valutare quale metodologia utilizzare. Entrambe le tecniche risultano adatte al caso in esame, in quanto mantengono l'andamento crescente come i misuratori incrementali. In particolare, queste soluzioni non comportano oscillazioni anomale tra i punti noti, garantendo che il profilo di consumo ricostruito sia rappresentativo con l'andamento reale dei dati.

◆ Interpolazione Spline Cubica

La spline cubica è una funzione utilizzata per interpolare dati tra punti noti, costruita in modo da garantire una curva continua e regolare lungo l'intero intervallo ^[36]. Tale funzione è costituita da un polinomio di terzo grado, interpolato per ogni intervallo tra due letture consecutive.

A differenza dell'interpolazione lineare, che collega i punti con segmenti retti e genera cambi di pendenza bruschi tra misure successive, la spline cubica utilizza un polinomio di terzo grado raccordandolo in modo che l'andamento dei consumi da un mese all'altro avvenga in maniera graduale, creando un profilo annuale lento. Questo approccio consente di ottenere una rappresentazione più reale dell'andamento complessivo dei dati energetici, in quanto la curva terrà conto di più punti contemporaneamente. Questo aiuta nei mesi di transizione (aprile e ottobre), dove il consumo non cambia in modo perfettamente lineare, ma segue un andamento graduale.

Per garantire che la spline cubica sia continua e regolare si impongono i seguenti 3 vincoli: il passaggio per i punti noti dell'intervallo, la continuità della derivata prima e della derivata seconda.

Osserviamo infatti che in ogni intervallo $[x_i, x_{i+1}]$ le funzioni spline si possono rappresentare come nell'*Equazione 3.1*.

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (3.1)$$

dove:

- x_i sono le coordinate dei punti noti (estremi dell'intervallo);
- a_i, b_i, c_i e d_i sono i coefficienti che rendono il polinomio graduale e continuo in tutto l'intervallo.

Questo metodo consente di mantenere un andamento regolare tra mesi vicini, rispettando la variazione dei consumi nel tempo senza introdurre discontinuità significative.

I principali svantaggi dell'interpolazione spline cubica riguardano, innanzitutto, la maggiore complessità di implementazione rispetto ad altri metodi più semplici, in quanto richiede l'utilizzo di un modello di calcolo, ad esempio tramite VBA in Excel. Il codice completo della funzione di spline è riportato nell'Appendice A. Lo script consente di eseguire un'interpolazione spline cubica su una serie di dati temporali discreti, restituendo una stima continua dei valori intermedi mancanti. La funzione, richiamabile direttamente all'interno del foglio di calcolo con la dicitura *SplineCubicInterpolation*, permette di calcolare il valore incognito di consumo energetico in corrispondenza di qualsiasi punto compreso tra gli estremi dell'intervallo noto.

Come precedentemente affermato, la spline cubica offre numerosi vantaggi: genera una curva graduale tra i punti noti e consente una stima molto precisa dei valori intermedi. Tuttavia, presenta uno svantaggio importante: l'errore di interpolazione è proporzionale alla quarta potenza della distanza tra i punti noti dell'intervallo. Questo significa che, se i dati noti sono distanti tra loro, anche piccoli aumenti nella distanza possono causare un incremento significativo dell'errore, mentre se i dati sono vicini tra loro l'errore diminuisce considerevolmente. Infatti, anche se le spline cubiche offrono maggiore precisione quando i punti sono vicini tra loro, in presenza di pochi dati esse tendono a generare oscillazioni poco realistiche curvando in maniera anomala anche dove non dovrebbero.

Come riportato nell'articolo riguardante la ricostruzione di brevi periodi superiori a 4 ore di dati mancanti sui consumi energetici tramite approcci basati su spline cubiche^[37], quest'ultima si è rivelata più affidabile dell'interpolazione lineare. Invece, dall'analisi su serie temporali orarie emerge che l'interpolazione lineare è più adatta per brevi intervalli di dati mancanti (da una a tre ore), mentre la spline cubica offre risultati migliori per lacune più ampie (da quattro a sei ore).

In presenza di intervalli temporali ampi tra due letture (mese), l'interpolazione lineare mantiene una buona affidabilità nei punti vicini agli estremi, grazie al fatto che l'errore diminuisce rapidamente man mano che ci si avvicina a uno dei due estremi. Per questo motivo risulta particolarmente adatta, visto che si dispone di letture poco frequenti e molto vicine all'intervallo noto.

◆ Interpolazione Lineare

L'interpolazione lineare è una tecnica semplice per stimare, attraverso un andamento lineare, valori intermedi tra coppie di dati consecutivi e noti. Dato un intervallo $[x_1, x_2]$ con i corrispondenti valori $[y_1, y_2]$, la funzione interpolante è definita dall'**Equazione 3.2**.

$$f(x) = \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} y_2 \quad (3.2)$$

Questa equazione può essere interpretata come una media ponderata dei valori y_1 e y_2 , pesata in base alla distanza del punto x incognito dagli estremi del medesimo intervallo. L'interpolazione lineare rappresenta una soluzione semplice ed efficace, tra i principali vantaggi vi è la facilità di implementazione e il basso costo computazionale. Inoltre, risulta sufficientemente accurata nei casi in cui il consumo varia uniformemente nel tempo,

permettendo di ricostruire un andamento coerente mese per mese senza introdurre distorsioni evidenti tra periodi molto diversi.

Tuttavia, questo metodo presenta alcune limitazioni. Ad esempio, essendo ogni mese trattato separatamente, possono verificarsi discontinuità tra i dati di mesi consecutivi, con variazioni improvvise di consumo. Questo può portare ad andamenti aggregati annualmente poco realistici nei punti di separazione tra i mesi. Inoltre, ogni intervallo è trattato separatamente: non viene considerata l'evoluzione generale dell'andamento (es. aumento invernale e calo estivo), rendendo l'interpolazione meno accurata tra mesi adiacenti.

Infine, è importante sottolineare che l'errore dell'interpolazione lineare è proporzionale al quadrato della distanza tra i punti noti: per intervalli temporali ampi tra una lettura e l'altra, la precisione può quindi diminuire, ma sicuramente di meno della spline cubica. Quest'ultima genera curve più lisce ma presenta errori di interpolazione maggiori all'aumentare della distanza tra le letture risultando quindi meno precisa.

Nel presente lavoro si è scelto di adottare l'interpolazione lineare per stimare i consumi energetici nei giorni mancanti. Questa scelta è motivata principalmente dalla scarsità di dati disponibili, limitati a una lettura mensile. L'interpolazione lineare, infatti, risulta particolarmente adatta in tali contesti, in quanto è facile da implementare e garantisce la monotonia, rispettando il comportamento crescente dei misuratori incrementali. La spline, al contrario, tende a introdurre distorsioni anche se minime in assenza di un numero sufficiente di punti. Per tali motivi, si è ritenuto più opportuno ricorrere a un metodo semplice ma robusto come l'interpolazione lineare, più coerente con la frequenza dei dati disponibili.

3.2 Applicazione di un profilo stagionale per la ripartizione dei consumi pre-intervento

Nell'analisi dei dati di consumo pre-retrofit, la principale criticità riscontrata ha riguardato l'assenza di misurazioni separate per il riscaldamento (RSC) e l'acqua calda sanitaria (ACS) per il solo condominio Blu, rendendo necessario la stima della ripartizione dei consumi a partire dai dati aggregati mensilmente.

In una prima fase si era valutata la possibilità di adottare un approccio normativo, basato su quanto previsto dalla UNI/TS 11300 parte 2, per stimare separatamente i consumi di gas metano destinati all'ACS e al RSC. Secondo la specifica tecnica, il fabbisogno energetico per l'ACS è considerato costante durante tutto l'anno, in quanto dipende principalmente dalla destinazione d'uso dell'edificio, dalla superficie utile e dalla differenza di temperatura tra ingresso e uscita dell'acqua sanitaria nell'accumulo.

Tuttavia, l'applicazione pratica di questo metodo ha mostrato alcune criticità, in particolare una sottostima della quota di consumo associata all'ACS, soprattutto nei mesi invernali. Di conseguenza, nel caso in esame, essendo disponibili dati reali di consumo mensile su un periodo biennale pre-intervento, si è deciso di provare ad utilizzare un metodo statistico, ossia un modello di regressione lineare semplice.

In questo secondo approccio, è stato ipotizzato che:

- il consumo per riscaldamento sia proporzionale ai gradi giorno mensili (GG), indicatore del fabbisogno termico dipendente dalla temperatura esterna;

- il consumo per ACS sia costante durante l'anno, indipendente dalla temperatura esterna.

È stato quindi costruito un modello di regressione lineare in cui i gradi giorno mensili sono stati utilizzati come variabile indipendente solamente quando generavano consumi per il riscaldamento, e, i consumi mensili di gas metano (in Nm³) come variabile dipendente. La retta di regressione ottenuta ha permesso di distinguere la componente variabile (pendenza della retta) associata al riscaldamento, e la componente costante (intercetta), interpretata come il contributo medio mensile dell'ACS costante sull'intero anno. L'accuratezza del modello è stata verificata valutando il coefficiente di determinazione R²: è una misura statistica che esprime quanto i dati reali sono vicini alla retta di regressione; tanto più il valore è vicino a 1 tanto più il modello ottenuto è robusto.

Anche questo approccio è stato scartato poiché restituiva un valore mensile di consumo per l'ACS inferiore alla media reale dei mesi estivi (da maggio a settembre), periodo in cui i consumi sono interamente attribuibili all'ACS a causa dello spegnimento dell'impianto di riscaldamento. Dal mio punto di vista, tale risultato comportava una sottostima non coerente con il comportamento fisico del sistema, in cui ci si aspetta, al contrario, un aumento dei consumi di ACS nei mesi invernali per effetto della maggiore richiesta di acqua calda, della minor temperatura di ingresso dell'acqua e delle maggiori dispersioni termiche nelle reti di distribuzione.

Per queste ragioni si è deciso, per ripartire i consumi tra ACS e RSC, di adottare un approccio più coerente con la realtà. Grazie all'integrazione di un profilo stagionale ricavato da uno studio scientifico pubblicato sulla rivista *Energy and Buildings*, è stato possibile sfruttare l'evoluzione annuale dei consumi di ACS, evidenziando la forte componente stagionale di tale servizio, per ricostruire i consumi di ACS.

Lo studio intitolato "*Efficiency in building energy use: Pattern discovery and crisis identification in hot-water consumption data*"^[38], ha analizzato i consumi di ACS in dieci edifici condominiali situati nella città di Kaunas, caratterizzata da un clima simile a quello delle zone in cui si trovano gli edifici oggetto di studio e da un simile generatore di calore pre-retrofit. I risultati hanno evidenziato differenze significative nei consumi mensili di acqua calda sanitaria, con scostamenti fino al 35-40% tra i mesi estivi e quelli invernali (**Figura 3.1**). Il grafico mostra il consumo giornaliero di energia termica normalizzato sul numero di occupanti per la produzione di acqua calda sanitaria, sulla base dei dati raccolti di tutti gli edifici condominiali analizzati nel periodo compreso tra il 1° gennaio 2018 e il 30 settembre 2021. La curva blu rappresenta il consumo giornaliero totale di energia, mentre la curva arancione indica il consumo energetico medio, mettendo in evidenza una forte stagionalità nei consumi di ACS.

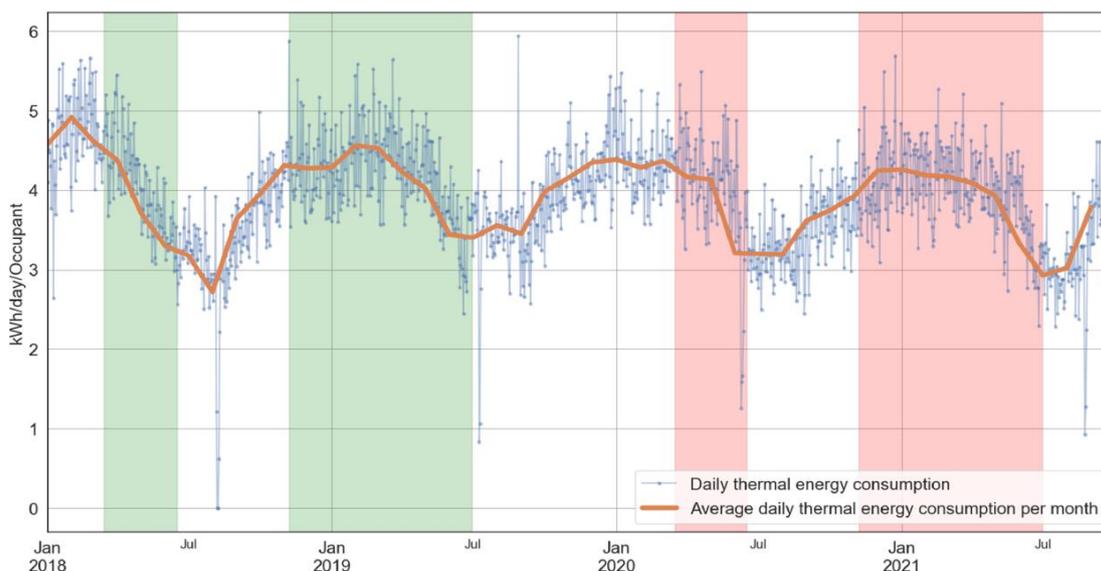


Figura 3.1 - Consumo termico giornaliero normalizzato per la produzione di acqua calda sanitaria.
Fonte: Energy and Building

L'andamento stagionale del consumo di ACS mostra chiaramente una variazione mensile significativa. Tuttavia, per applicare tale profilo ai dati reali del caso studio, è stato necessario quantificarne l'andamento in forma percentuale. A tal fine, sono stati ricavati i valori di fattori di incremento mensile riportati nella **Tabella 3.1**, utilizzati per stimare i consumi di ACS nei mesi invernali sulla base del mese estivo di agosto assunto come riferimento minimo.

Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
100%	95%	93,33%	86,67%	80%	73,33%	66,70%	60%	70%	80%	90%	95%

Tabella 3.1 – Distribuzione percentuale mensile per la stima del consumo di ACS nei mesi non estivi.

Tali variazioni sono principalmente attribuite all'abbassamento della temperatura dell'acqua fredda in ingresso durante i mesi più freddi e alle maggiori dispersioni termiche associate alle condizioni climatiche invernali esterne.

Per questo motivo, è stato adottato un approccio semi-empirico:

- Nei mesi da maggio a settembre in cui l'impianto di riscaldamento è spento, sono stati utilizzati i dati reali rilevati dal contatore, attribuiti esclusivamente all'ACS.
- Per i restanti mesi, i consumi di ACS sono stati stimati applicando ai valori estivi reali un fattore correttivo mensile derivato dal profilo stagionale dello studio scientifico, opportunamente normalizzato.
- Per il calcolo del consumo di riscaldamento è stata effettuata una semplice differenza tra il consumo totale mensile e il consumo di ACS del mese corrispondente.

I vantaggi dell'approccio adottato sono che il calcolo è basato su dati reali nei mesi estivi, dove il consumo è esclusivamente attribuito all'ACS, inoltre, viene integrata la stagionalità documentata scientificamente, migliorando la consistenza dell'approccio utilizzato.

Infine, per il condominio Arancione e Verde nel periodo pre-retrofit e per tutti i condomini considerati nel periodo post-retrofit, la presenza di contabilizzazioni distinte per RSC e ACS ha consentito di utilizzare direttamente i dati reali senza necessità di ulteriori stime.

3.3 Valutazione dei risparmi energetici

Il consumo energetico degli edifici rappresenta una quota significativa del consumo totale di una nazione. I consumi sono spesso superiori a quelli realmente necessari per garantire condizioni ottimali di comfort, a causa sia di difetti tipologici (scarsa coibentazione dell'involucro opaco e trasparente, ponti termici, impianti termici con bassa efficienza, etc.), sia di comportamenti errati da parte degli utenti.

Per stimare i risparmi energetici ottenuti sul vettore gas metano a seguito degli interventi di riqualificazione, è stata adottata una metodologia di *Benchmarking Interno*. Questo approccio consiste nel confrontare in maniera consistente i consumi energetici dell'edificio con sé stesso in due periodi differenti: uno antecedente e uno successivo agli interventi. Tale confronto consente non solo di valutare l'efficacia degli interventi ma anche di aumentare la consapevolezza sui potenziali margini di miglioramento del sistema edificio-impianto. Infatti, nel caso in esame, il benchmarking è stato utilizzato con l'obiettivo di quantificare il risparmio energetico ottenuto in seguito alla realizzazione degli interventi di efficientamento.

Il confronto effettuato tramite benchmarking si fonda su un modello di riferimento, detto modello di baseline, che descrive il comportamento energetico dell'edificio nel periodo antecedente agli interventi di riqualificazione. Affinché questo modello risulti affidabile e rappresentativo, è fondamentale che sia costruito in modo robusto e coerente. Nel presente caso, sono stati adottati due diversi approcci per la valutazione del risparmio energetico e la creazione del modello di baseline: un metodo basato sulla normalizzazione mensile tramite i gradi giorno e uno basato su un modello data-driven di tipo statistico, basato sull'elaborazione di dati storici aggregati su base mensile.

Il modello guidato dai dati è di tipo supervisionato, in quanto sono note le variabili di input e di output, così come la relazione che le lega. Il metodo più immediato per stimare i risparmi energetici consiste nel confrontare i consumi registrati prima e dopo l'intervento di riqualificazione. Tuttavia, questo approccio può risultare inefficace se non si considerano alcune variabili esterne che influenzano il fabbisogno energetico dell'edificio. Tra queste rientrano le condizioni climatiche, il livello di occupazione e le modalità di gestione dell'impianto, che possono cambiare molto tra il periodo pre e post-intervento. La normalizzazione più utilizzata è quella relativa alla variabilità climatica, la quale rappresenta uno dei principali fattori di distorsione nel confronto tra i due periodi. La normalizzazione dei consumi, infatti, permette di isolare l'effetto dell'intervento dalle variazioni climatiche, fornendo una valutazione più precisa dell'efficacia delle diverse soluzioni adottate.

Il risparmio energetico effettivo viene stimato mediante un approccio in linea con quanto indicato dalla norma UNI CEI EN 16231 sulla metodologia di benchmarking dell'efficienza energetica. Tale approccio prevede la costruzione di un modello di baseline rappresentativo del comportamento energetico dell'edificio nel periodo antecedente agli interventi di riqualificazione. La metodologia adottata si articola nelle seguenti fasi:

1. Misurazione dei consumi energetici e delle principali variabili durante il periodo pre-intervento;
2. Sviluppo di un modello matematico di baseline, che correla i consumi di gas naturale alle sole variabili esogene;
3. Rilevazione dei consumi energetici e delle variabili influenzati nelle condizioni post-intervento;

4. Proiezione del modello di baseline alle condizioni al contorno post-intervento al fine di stimare il consumo dell'edificio in assenza di interventi (definito approccio “*model to point*”);
5. Calcolo del risparmio energetico effettivo, ottenuto come differenza tra il consumo stimato (baseline proiettata) e il consumo reale misurato nel periodo post-riqualificazione.

Questo approccio permette di valutare con maggiore accuratezza l'efficacia degli interventi eseguiti, minimizzando l'influenza di variabili esterne non legate direttamente alla riqualificazione e che modificano i consumi energetici.

Si è deciso quindi di adottare un modello supervisionato di firma energetica inverso monovariato, cioè a singola variabile influenzante, nelle sue versioni a due e tre parametri, per la valutazione dei risparmi energetici conseguiti a seguito degli interventi realizzati.

Si conclude specificando che è stato utilizzato anche un secondo metodo basato sulla normalizzazione dei consumi mediante i GG, ed è stato impiegato con lo stesso obiettivo di stimare il risparmio energetico ottenuto in condizioni climatiche standard, neutralizzando l'effetto del clima. Tale metodologia consente di valutare il risparmio energetico in un contesto standard. L'uso della firma energetica attraverso l'approccio “*model-to-point*”, permette di stimare il risparmio energetico effettivamente conseguito nell'anno 2023-2024, confrontando i consumi reali post-intervento con quelli stimati che si sarebbero avuti, nelle medesime condizioni climatiche, in assenza di interventi. Utilizzando parallelamente questi due approcci, si ottengono due prospettive sinergiche: una riferita a condizioni climatiche standard dettate da normativa UNI 10349 e l'altra alle condizioni reali misurate nell'anno 2023-2024.

◆ Normalizzazione sui GG

Il primo approccio consiste nella normalizzazione dei consumi mensili di solo riscaldamento in funzione dei gradi giorno. Per ciascun mese, i consumi vengono divisi per i gradi giorno effettivamente registrati nel periodo di riferimento e poi moltiplicati per i gradi giorno standard previsti dalla norma UNI 10349 parte 3 per la località di Udine. In questo modo è possibile ottenere un consumo energetico “normalizzato” che consenta il confronto tra anni con condizioni climatiche differenti. L'**Equazione 3.3** verrà utilizzata per eseguire la normalizzazione dei consumi:

$$\text{Consumi}_{\text{normalizzati}} = \frac{\text{Consumi}_{\text{effettivi}}}{\text{GG}_{\text{effettivi}}} \text{GG}_{\text{riferimento}} \quad (3.3)$$

dove:

- Consumi normalizzati: rappresentano i consumi di gas metano normalizzati per il solo servizio di RSC, ossia stimati come se si fossero verificati in condizioni climatiche standard, così da permettere un confronto consistente tra periodi diversi;
- Consumi effettivi: indicano i consumi reali di combustibile rilevati nel periodo mensile considerato, riferiti esclusivamente al servizio di riscaldamento;

- GG effettivi: sono i gradi giorno effettivi del mese di analisi, relativi alla località in esame e ottenuti dai dati storici pubblicati da ARPA;
- GG riferimento: sono i gradi giorno di riferimento definiti dalla norma UNI 10349-3, che stabilisce i valori standard mensili su base climatica trentennale. Il calcolo è basato su una temperatura interna convenzionale di 20°C, coerente con le reali condizioni di utilizzo riscontrate negli edifici oggetto di analisi.

Tale metodo si basa su un'assunzione semplificativa, cioè sulla proporzionalità diretta tra consumo di energia termica e gradi giorno, ipotesi che non tiene conto della reale risposta termica dell'edificio e dell'impianto né delle variabili operative. In pratica, i consumi mensili per il riscaldamento nel periodo pre-retrofit vengono normalizzati dividendo il consumo effettivo per i GG registrati nel mese corrispondente e moltiplicandolo successivamente per i GG di riferimento, ricavati dalla norma UNI 10349 per la località di riferimento, cioè Udine.

Successivamente, si calcola la media mensile dei consumi normalizzati nel periodo pre-intervento, e la si confronta con i dati mensili normalizzati post-intervento per stimare il risparmio energetico ottenuto, si effettua la differenza tra i consumi mensili. Infine, si sommano i risparmi conseguiti nei vari mesi e si calcola il totale annuale di risparmio energetico ottenuto in condizioni climatiche standard, valutando poi anche il risparmio percentuale conseguito.

Il vantaggio principale di questa metodologia è la semplicità di applicazione: il metodo è rapido da implementare. I limiti sono che l'accuratezza è bassa in quanto non si tiene conto della reale risposta dell'edificio, né delle dinamiche impiantistiche. Per questo motivo si è scelto di non limitarsi alla sola normalizzazione mensile tramite i GG, ma di adottare un approccio più robusto e rappresentativo: il metodo della firma energetica. Il metodo della firma energetica rappresenta un approccio più accurato per la valutazione dei risparmi, basato su un modello di regressione lineare. Il modello comporterà una capacità predittiva più robusta consentendo di stimare con buona attendibilità i risparmi energetici, riducendo gli errori introdotti da ipotesi semplificative.

◆ La Firma Energetica

La firma energetica ha diverse funzionalità: da un lato può essere utilizzata come indagine energetica per valutare i risparmi in seguito ad interventi di retrofit e per evidenziare eventuali malfunzionamenti, dall'altro rappresenta un utile strumento per sensibilizzare gli utenti finali al fine di diminuire i consumi. La firma energetica è un metodo analitico che descrive la relazione tra la temperatura esterna (asse x) e la potenza termica media del generatore considerato (asse y): rappresenta il comportamento energetico reale del sistema edificio-impianto. Essa si basa sul principio secondo cui, al diminuire della temperatura esterna, aumenta il fabbisogno termico dell'edificio, e di conseguenza cresce la potenza termica richiesta dall'impianto di riscaldamento. Come descritto nell'Allegato B della norma EN 15603, l'uso di energia per il riscaldamento e il raffrescamento può essere correlato ai dati climatici su un determinato periodo di tempo. L'adozione della firma energetica consentirà di valutare l'efficacia degli interventi di riqualificazione, e, i suoi vantaggi sono un'individuazione di anomalie e, inoltre, fornisce indicazioni utili sulle prestazioni energetiche dell'edificio, facendo un confronto tra i valori calcolati e quelli effettivamente rilevati. Ulteriormente, è un metodo indicato per edifici che possiedono apporti interni stabili e guadagni solari passivi contenuti.

La costruzione della firma energetica avviene a partire dai dati mensili di consumo di gas metano per il servizio di RSC e dalle corrispondenti temperature esterne medie mensili, ottenute tramite le misurazioni fornite da ARPA per la stazione meteorologica più vicina agli edifici oggetto di studio. Per ciascun mese, si calcola la potenza termica media erogata dal generatore. A tal fine, il volume di gas consumato viene convertito in energia espressa in kWh mediante il potere calorifico del combustibile; successivamente, il valore ottenuto viene diviso per il numero di ore di attivazione dell'impianto nel mese di riferimento. I punti ottenuti dall'analisi si dispongono lungo una retta che evidenzia una risposta lineare del sistema edificio-impianto alle variazioni della temperatura esterna. Tale andamento può essere rappresentato mediante una retta di regressione, ottenuta attraverso un'interpolazione lineare dei dati, che descrive in modo efficace il comportamento energetico dell'edificio in funzione del clima. Negli edifici esistenti la potenza termica richiesta si azzerava generalmente tra i 16 e i 18 °C, mentre negli edifici di nuova costruzione, con un migliore isolamento, questo valore tende a scendere verso i 14-15 °C.

Sebbene la letteratura suggerisca che la frequenza ottimale per l'elaborazione della firma energetica sia settimanale, poiché consente di mediare efficacemente gli effetti dei transitori giornalieri e di sfruttare la ciclicità climatica e la gestione dell'edificio, nel presente studio si è lavorato con i soli dati disponibili, sfortunatamente i consumi di gas metano aggregati su base mensile. Questo implica una minore correlazione rispetto alle variazioni climatiche di breve periodo, ma consente comunque una valutazione del comportamento energetico dell'edificio nel lungo termine affidabile, soprattutto perché l'obiettivo è la quantificazione del risparmio energetico e non l'adozione di provvedimenti per la risoluzione di eventuali anomalie in tempi brevi.

Quando si dispone di una firma energetica annuale, i parametri caratteristici del modello che forniscono informazioni utili sul comportamento dell'edificio sono identificati in **Figura 3.2**:

- Pendenza della retta H_{tot} [kW/K]: rappresenta l'influenza lineare della temperatura esterna sui consumi energetici. Questo parametro è fisicamente interpretabile con il coefficiente di scambio termico globale dell'edificio, ovvero dalla somma dei coefficienti di perdita per trasmissione attraverso l'involucro edilizio, per ventilazione e delle perdite proporzionali dell'impianto. Indica quindi quanto aumenta la potenza termica richiesta all'impianto per ogni grado centigrado di abbassamento della temperatura esterna. Il coefficiente H_{tot} dipende quindi dalla trasmittanza termica dell'involucro edilizio, dal numero di ricambi d'aria orari e dall'efficienza dell'impianto considerando tutti i suoi sottosistemi;
- Temperatura di attivazione $T_{r, on}$ [°C]: rappresenta la temperatura esterna al di sotto della quale è necessario attivare l'impianto di riscaldamento; è influenzata dagli apporti gratuiti (solari e interni), dalla temperatura di set-point interna e dal grado di isolamento termico. Questa temperatura corrisponde alla condizione in cui le dispersioni termiche dell'edificio sono compensate dagli apporti gratuiti, ovvero dai guadagni solari, dal calore generato dagli occupanti e dal funzionamento delle apparecchiature elettriche;
- Potenza costante P_{nr} [kW]: esprime la potenza termica indipendente dalla temperatura esterna, dipende da consumi energetici diversi dal riscaldamento, quali la produzione di acqua calda sanitaria e le perdite fisse dell'impianto, come quelle dovute alla circolazione nei circuiti primari.

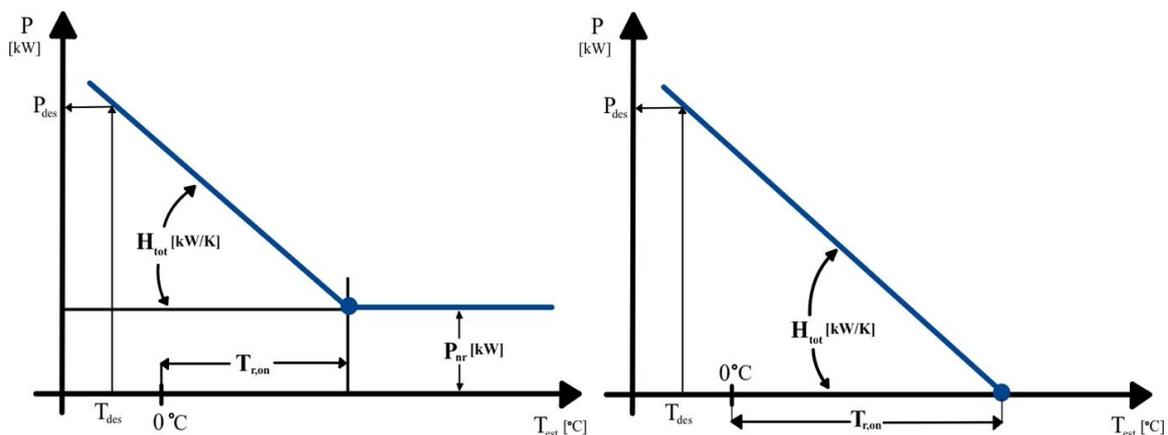


Figura 3.2 - A sinistra è riportato un esempio di firma energetica a tre parametri, mentre a destra è mostrato un esempio di firma energetica a due parametri, basata esclusivamente sui consumi per riscaldamento nei mesi invernali.

L'Equazione 3.4 che descrive il modello di firma energetica a tre parametri è la seguente:

$$P = P_{nr} + H_{tot} * \max(0, T_{r,on} - T_{est}) \quad (3.4)$$

Grazie alla disponibilità dei dati reali di consumo suddivisi tra riscaldamento e acqua calda sanitaria, è superflua l'adozione di un modello di firma energetica a tre parametri, consentendo invece l'impiego di un modello più semplice ma altrettanto efficace: la firma energetica a due parametri. Siccome, nel caso in esame, i consumi costanti e indipendenti dalla temperatura esterna sono noti e coincidono esattamente con i consumi per la produzione di acqua calda sanitaria, i quali sono stati misurati separatamente e stimati per il solo condominio Blu con buona affidabilità grazie alla documentazione scientifica. Di conseguenza, non è necessario stimare tale quota attraverso un'interpolazione: essa è già nota e può essere trattata come dato reale, naturalmente per i dati pre-retrofit dovrà essere mediata mensilmente in modo da effettuare un confronto più consistente. Tuttavia, nei primi due casi studio verrà riportata anche l'elaborazione di un modello a tre parametri, al fine di offrire una visione più ampia e olistica dell'andamento dei consumi annuali complessivi prima e dopo gli interventi di riqualificazione.

Si è dunque scelto di utilizzare per la valutazione dei risparmi un modello a due parametri, che considera unicamente i consumi per riscaldamento nei mesi invernali, escludendo i periodi in cui l'impianto di climatizzazione invernale è disattivato.

La retta risultante della regressione lineare descrive la risposta dell'edificio alle variazioni di temperatura esterna attraverso i due parametri H_{tot} e $T_{r,on}$ (Figura 3.2). Questa scelta risulta vantaggiosa non solo per la semplicità del modello, ma anche per la migliore affidabilità statistica dei parametri stimati, in quanto si riduce il rischio di errori nella stima del termine costante P_{nr} , spesso influenzato da variabilità non climatiche quando non è noto con certezza. L'Equazione 3.5 descrive il modello di firma energetica a due parametri.

$$P = P_0 - H_{tot} T_{est} \quad (3.5)$$

dove:

- P_0 rappresenta la potenza termica da fornire in corrispondenza di una temperatura esterna di $0\text{ }^\circ\text{C}$;
- T_{est} indica la temperatura esterna media.

È importante sottolineare che la firma energetica non fornisce indicazioni sull'utilizzo ottimale dell'edificio, ma costituisce uno strumento di analisi qualitativa. Le eventuali deviazioni dalla curva di progetto permettono di individuare anomalie sui consumi rispetto a quelli stimati, fornendo indicazioni utili per migliorare le modalità di funzionamento degli impianti.

Esistono tre principali tipologie di firme energetiche, ciascuna con una funzione specifica nell'analisi del comportamento energetico di un edificio:

- Firma energetica reale (RES), è la curva che interpola i dati di consumo energetico realmente misurati, rappresentando il comportamento effettivo del sistema edificio-impianto. Per costruire una RES affidabile è necessario disporre di un set di dati rappresentativo;
- Firma energetica di progetto (DES): questa firma rappresenta l'andamento previsto dei consumi dell'edificio secondo le specifiche ipotizzate in fase di progetto. Il confronto tra la DES e la RES può essere utilizzato per identificare possibili scostamenti tra il progetto (design) e il funzionamento effettivo (as-built);
- Firma energetica secondo i requisiti di legge (LES): è una firma teorica costruita sulla base delle prestazioni minime richieste dalla normativa vigente, come le trasmittanze limite degli elementi opachi e trasparenti, e i rendimenti minimi dei generatori di calore. Rispetto alla DES, la LES utilizza parametri normativi da rispettare al posto di quelli progettuali, e consente anche di poter valutare il potenziale efficientamento energetico dell'edificio reale rispetto agli standard di legge.

Nel seguente lavoro, la firma energetica verrà creata adottando un approccio RES per la valutazione dell'efficacia degli interventi di riqualificazione energetica, basandosi sull'analisi dei consumi energetici reali misurati. Sono stati utilizzati dati mensili aggregati, ma occorre considerare che una frequenza di misura più elevata avrebbe garantito una maggiore precisione: le letture con frequenza settimanale sono ritenute il compromesso ottimale per l'analisi dei consumi di riscaldamento, in quanto riducono l'influenza delle variazioni climatiche improvvise e riducono le fluttuazioni giornaliere. Misure più frequenti, come quelle giornaliere o orarie, assicurano un'elevata precisione e permettono di individuare anche anomalie di funzionamento, ma presuppongono la disponibilità di dispositivi in grado di trasmettere i dati ad un sistema di monitoraggio centralizzato. Sebbene le firme energetiche create utilizzando i consumi riferiti ad un time-step inferiore siano più accurate, le uniche misure disponibili sono riferite a intervalli mensili; queste genereranno un risultato meno preciso ma comunque accettabile ai fini dello studio.

Prima di stimare i risparmi energetici attraverso l'approccio model-to-point, è stato necessario procedere alla validazione del modello pre-retrofit, andando a verificare l'affidabilità delle previsioni e la consistenza del modello. A tal fine, sono state adottate alcune delle principali metriche di performance per valutare la bontà del modello di regressione.

Tra queste si trovano il coefficiente di correlazione di Pearson R^2 , il quale consente di valutare il grado di correlazione lineare tra le temperature esterne medie mensili (variabile indipendente) e i consumi energetici mensili di gas metano per il solo RSC (variabile dipendente); ci da una valutazione della dispersione tra la predizione e i valori reali. Il suo valore varia tra 0 e +1: valori prossimi a +1 indicano una forte correlazione, a dimostrazione che l'andamento dei consumi è fortemente dipendente linearmente con la variabilità climatica, invece, valori prossimi a 0 indicano una scarsa correlazione.

Inoltre, è stato utilizzato il MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*): rappresenta l'errore percentuale assoluto medio, ovvero la media degli scostamenti assoluti tra i valori stimati e quelli osservati, rapportati ai valori reali; un valore ottimale deve essere inferiore al 15-20%. È un indicatore di quanto, in media, il modello si discosta percentualmente dai dati reali e si ottiene con la seguente **Equazione 3.6**.

$$\text{MAPE \%} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| * 100 \quad (3.6)$$

dove:

- y_i è il valore di consumo reale per il mese i -esimo considerato;
- \hat{y}_i è il valore di consumo stimato per il medesimo mese i -esimo dal modello di pre-retrofit nelle condizioni post-retrofit;
- n è il numero di mesi considerati all'interno del modello di regressione pre-retrofit.

Al fine di valutare l'*Accuratezza* percentuale del modello pre-retrofit, è sufficiente eseguire la differenza tra cento e il valore del MAPE % ottenuto.

Infine, è stato calcolato il valore di CV-RMSE (Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error), mediante l'**Equazione 3.7**: è l'espressione percentuale dell'RMSE, diviso la media reale della variabile che si vuole predire. È una metrica molto utilizzata in ambito energetico perché consente il confronto tra dataset differenti, piccoli valori del CV-RMSE indicano un miglior adattamento dei valori predetti ai valori reali.

$$\text{CV - RMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|^2}}{\bar{y}} \quad (3.7)$$

L'utilizzo combinato di queste metriche consente di valutare la capacità del modello di stimare con buona accuratezza l'andamento dei consumi in funzione delle condizioni climatiche, garantendo delle stime di risparmio energetico precise.

Infine, per valutare il risparmio energetico percentuale, per ciascuna fonte energetica "i" si utilizza l'**Equazione 3.8**, fornita dalle linee guida del Ministero dell'Economia e delle Finanze.

$$R_{Fi\%} = 100 \left(1 - \frac{Q_{Ei,POST}}{Q_{Ei,ANTE}} \right) \quad (3.8)$$

dove:

- $R_{Fi\%}$ rappresenta il risparmio percentuale atteso della fonte energetica “i”, nel calcolo del nostro caso studio sarà il gas naturale;
- $Q_{Ei,POST}$ è la quantità di consumo standard annuo reale per la situazione post-retrofit (2023-2024);
- $Q_{Ei,ANTE}$ è la quantità di consumo standard annuo stimato dal modello pre-retrofit nelle condizioni post-retrofit.

È stato possibile approfondire l’andamento delle regressioni, estendendo lo studio oltre la semplice interpolazione lineare e considerando anche modelli di regressione polinomiale di secondo grado, grazie all’applicazione dell’approccio MESH (Holistic and Multidisciplinary Approach of Energy Signature^[39]).

Questo approccio si rivela utile per individuare fenomeni non lineari legati al funzionamento reale del sistema edificio-impianto, che la sola regressione lineare non è in grado di trovare. Ad esempio, alcune caratteristiche peculiari del funzionamento impiantistico, come la riduzione dei consumi alle basse temperature di lavoro, dovuta all’aumento di efficienza del generatore, possono essere individuate solo attraverso una regressione polinomiale. La curvatura che la firma energetica assumerà, sia concava che convessa, ci darà alcune informazioni qualitative importanti: la convessità può indicare un aumento dell’efficienza a temperature esterne più alte, mentre la concavità può suggerire un incremento dell’efficienza a temperature esterne più basse.

Inoltre, l’applicazione dell’approccio MESH consentirà di verificare la coerenza tra il comportamento reale dei consumi di gas metano (RES) e quanto previsto in fase progettuale (DES), come verrà approfondito nel **Capitolo 5**.

Un ulteriore studio^[40] ha confermato l’efficacia del metodo della firma energetica come strumento di analisi per valutare gli effetti degli interventi di riqualificazione energetica e per confrontare i consumi di energia per il riscaldamento su ampi set di dati. Tale approccio, grazie alla sua solidità metodologica, è stato anche riconosciuto a livello normativo, venendo adottato come standard europeo nella norma EN 15603 del 2008. Per la validazione delle firme energetiche ottenute, sono state impiegate le metriche di performance precedentemente descritte, al fine di garantire l’affidabilità dei modelli creati.

Si conclude che la firma energetica è stata elaborata considerando esclusivamente i consumi mensili di gas naturale per il solo RSC, ovvero limitatamente a tale vettore energetico. In particolare, nel caso del condominio Verde, trattandosi dell’unica fonte energetica utilizzata per il servizio di riscaldamento, l’analisi è interamente basata sui dati di consumo di gas naturale. Per quanto riguarda invece il condominio Blu e il condominio Arancione, entrambi sono stati oggetto di interventi che hanno previsto l’installazione di sistemi ibridi, con l’integrazione di pompe di calore elettriche. Tuttavia, dal momento che il contributo della pompa di calore è risultato molto contenuto rispetto al fabbisogno complessivo, si è scelto di limitare l’analisi della firma energetica al solo consumo di gas naturale e non all’intero edificio. La valutazione complessiva del risparmio energetico, comprensiva anche dell’energia elettrica assorbita, verrà fatta successivamente considerando la variazione dei consumi elettrici. Inoltre, si evidenzia nuovamente che, trattandosi di consumi riferiti al mese, non sarà possibile cogliere le variazioni

di consumo legate a eventi climatici di breve durata, come i picchi di temperatura improvvisi, o le differenze tra il giorno e la notte.

3.4 Norme per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici (riferimento alla norma UNI/TS 11300-1, 2, 4 e 5 e al DM del 26/06/15)

Per la modellazione energetica degli edifici è stato utilizzato il software Edilclima EC700, uno strumento conforme alla normativa tecnica UNI/TS 11300, che rappresenta il riferimento metodologico nazionale per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici esistenti e di nuova costruzione attraverso il metodo mensile (semi-stazionario). Il programma applica i criteri previsti dalla serie UNI/TS 11300:2008 e dai successivi aggiornamenti. Le parti della normativa utilizzate per la determinazione dei fabbisogni energetici e per l'esecuzione dei calcoli di progetto sono le seguenti:

- UNI/TS 11300-1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione invernale ed estiva;
- UNI/TS 11300-2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali;
- UNI/TS 11300-4: Utilizzo di fonti energetiche rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e la produzione di acqua calda sanitaria;
- UNI/TS 11300-5: Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili.

L'applicazione della normativa UNI/TS 11300 ha permesso di:

- calcolare i fabbisogni energetici degli edifici in condizioni climatiche e di utilizzo standard;
- redigere la relazione tecnica ex Legge 10/1991 e produrre gli APE in conformità ai requisiti stabiliti dal Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015;
- infine, verificare il doppio salto di classe energetica, necessario per accedere alle agevolazioni fiscali previste dal Superbonus 110%.

La serie di norme UNI/TS 11300 definisce i metodi per il calcolo dei fabbisogni di energia termica utile, dell'energia fornita e dell'energia primaria per i vettori energetici considerati all'interno dell'edificio dei seguenti servizi:

- il riscaldamento invernale;
- la produzione di acqua calda sanitaria;
- il raffrescamento estivo;
- la ventilazione;
- l'illuminazione.

Nei casi studio analizzati, non viene preso in considerazione il servizio di climatizzazione estiva, né eventuali variazioni legate a tale utilizzo dopo gli interventi. L'analisi si concentra esclusivamente su tre servizi: il riscaldamento degli ambienti, la produzione di ACS, e

solamente per i condomini Blu e Arancione, dove è stato installato un impianto FTV, sul risparmio di energia elettrica dell'illuminazione dovuta all'autoconsumo.

La valutazione energetica realizzata rientra in una delle classificazioni standard: A1 (Design Rating), A2 (Asset Rating) o A3 (Tailored Rating), come definite nella UNI EN 15603. Essa si avvicina maggiormente alla tipologia A3 con alcune differenze. In particolare, l'analisi è stata effettuata utilizzando dati reali di consumo energetico pre e post-retrofit, riferiti all'edificio reale e all'effettivo comportamento degli utenti. Al tempo stesso, i dati sono stati normalizzati rispetto alle condizioni climatiche (temperatura esterna e radiazione solare), al fine di isolare il contributo del solo comportamento d'uso e delle caratteristiche dell'impianto.

Tale approccio consente di stimare l'efficacia degli interventi di efficientamento in condizioni di utilizzo reali, ma indipendenti dalle variazioni meteorologiche, permettendo una valutazione più oggettiva e accurata per una valutazione economica. Si tratta quindi di una valutazione energetica che rappresenta uno strumento utile per determinare il performance gap tra progetto e realtà.

All'interno del software Edilclima, ai fini della valutazione energetica dell'edificio, è necessario inserire una serie di dati che descrivono in maniera completa le caratteristiche del sistema edificio-impianto. Tali dati comprendono:

- le caratteristiche tipologiche dell'edificio, ovvero la geometria, la volumetria, la superficie utile riscaldata e l'orientamento dell'edificio;
- le caratteristiche termiche e costruttive dell'involucro edilizio: la stratigrafia delle strutture opache e trasparenti, la trasmittanza di energia solare dei componenti trasparenti, la trasmittanza lineica dei ponti termici;
- le informazioni relative ai sottosistemi presenti, quali generatori di calore e relativi rendimenti, tipologie dei sistemi di emissione, distribuzione e regolazione, nonché impianti per la produzione di energia da fonte rinnovabile;
- i dati climatici, ossia i valori climatici medi contenuti nella norma UNI 10349-1 per la località considerata, che includono gradi giorno, temperatura media mensile e irradianza solare;
- i dati relativi all'occupazione e all'utilizzo degli edifici, definiti tramite l'impostazione della destinazione d'uso, la temperatura interna di set-point fissata a 20 °C, il tasso di ricambio d'aria.

È importante sottolineare che tutti i calcoli eseguiti dal software si basano su condizioni operative di uso e clima standard. In particolare, la UNI/TS 11300 si fonda sui principi della norma europea UNI EN ISO 13790, che definisce un metodo semplificato mensile per il calcolo del fabbisogno energetico per il riscaldamento. Questo approccio si basa su modelli statici che assumono condizioni di esercizio standard, indipendenti dal comportamento effettivo degli utenti e dalle condizioni meteorologiche reali. Tale standardizzazione, è utile per confrontare edifici diversi con unico parametro aggregato, per la classificazione energetica (APE), però non è rappresentativa del comportamento reale dell'edificio, motivo per cui è fondamentale, come avviene nel presente lavoro, integrare le valutazioni di Asset Rating con analisi sui consumi reali e normalizzati rispetto alle condizioni climatiche effettive, per valutare il performance gap e l'effettiva efficacia degli interventi di riqualificazione.

La parte 4 della UNI/TS 11300 disciplina il calcolo dell'energia termica prodotta da impianti rinnovabili, come i collettori solari, le pompe di calore e gli impianti fotovoltaici. Nel nostro

caso studio, sono proprio questi i sistemi considerati, installati nei condomini durante la ristrutturazione e, sono importanti per determinare i risparmi di energia primaria non rinnovabile. Nei sistemi di generazione polivalenti, l'ordine di intervento dei generatori deve seguire una priorità, finalizzata a minimizzare il fabbisogno di energia primaria. In assenza di specifiche progettuali, la norma prevede un ordine standard: al primo posto si colloca il solare termico, seguito dalla cogenerazione, dalla biomassa, dalle pompe di calore e infine dai generatori a combustibili fossili. Ne consegue che la pompa di calore ha una priorità di funzionamento superiore rispetto alle caldaie a gas, e vengono attivate quando le sole fonti rinnovabili non sono in grado di soddisfare il fabbisogno termico utile o quando le temperature di funzionamento non consentono rendimenti operativi ottimali.

◆ UNI/TS 11300-5

La norma fornisce la procedura per stimare il fabbisogno di energia primaria degli edifici basandosi su quanta energia viene consegnata e, se ciò avviene, su quanta ne viene esportata all'esterno. Inoltre, indica come calcolare correttamente la produzione di energia rinnovabile e il contributo che questa fornisce sul bilancio energetico complessivo dell'edificio.

La prestazione energetica di un edificio viene rappresentata tramite due indicatori:

- l'indice di energia primaria globale totale EP_{tot} ;
- l'indice di energia primaria globale non rinnovabile EP_{nren} .

Entrambi sono espressi in kWh/m² all'anno, e si ottengono facendo il rapporto tra il fabbisogno annuale di energia primaria, rispettivamente totale e non rinnovabile, e la superficie utile climatizzata dell'edificio. Questi calcoli sono estesi anche ai singoli servizi energetici presenti all'interno dell'edificio.

Il fabbisogno annuale globale di energia primaria si calcola sommando i fabbisogni annui di energia primaria di tutti i servizi energetici presenti nell'edificio: climatizzazione invernale (H), climatizzazione estiva (C), acqua calda sanitaria (W), ventilazione (V), illuminazione (L) e trasporto di persone (T). Questo fabbisogno viene distinto nei tre componenti: totale, non rinnovabile e rinnovabile. Viene riportata nell'*Equazione 3.9* la sola formula relativa al fabbisogno di energia primaria non rinnovabile per uno specifico k servizio, le espressioni relative agli altri due indicatori (tot e ren) seguono la stessa struttura.

$$EP_{p,gl,nren} = \sum_k EP_{p,k,nren} = EP_{p,H,nren} + EP_{p,C,nren} + EP_{p,W,nren} + EP_{p,V,nren} + EP_{p,L,nren} + EP_{p,T,nren} \quad (3.9)$$

L'indice di prestazione energetica non rinnovabile per il riscaldamento $EP_{H,nren}$, si calcola partendo dal fabbisogno in ingresso alla generazione, il fabbisogno elettrico degli ausiliari, e i relativi fattori di conversione in energia primaria non rinnovabile, riferiti agli stessi vettori energetici, come riportato nell'*Equazione 3.10*.

$$EP_{H,nren} = \frac{Q_{H,gn,in} * f_{p,nren} + Q_{H,aux} * f_{p,nren}}{S_u} \quad (3.10)$$

Infine, la norma fornisce indicazioni per calcolare la quota di energia coperta da fonti rinnovabili sia considerando un singolo servizio dell'edificio, sia considerando un insieme di servizi. Tale valore, definito con l'acronimo QR è adimensionale, e viene ottenuto attraverso il rapporto tra il fabbisogno di energia primaria rinnovabile annuale riferita a uno o più servizi e il fabbisogno globale dell'energia primaria annuale totale, utilizzata per coprire gli stessi servizi energetici dell'edificio.

◆ DM del 26 giugno 2015

Nelle analisi successive si è fatto riferimento al Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015, che costituisce uno dei principali riferimenti normativi in materia di prestazione energetica degli edifici. Tale decreto si articola in tre documenti distinti; tuttavia, per l'analisi condotta nei nostri casi studio, sono risultate rilevanti la prima e la terza parte. La prima parte, intitolata "*Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*", stabilisce i criteri metodologici e i requisiti prestazionali minimi che devono essere rispettati nei progetti di nuova costruzione, ristrutturazione importante di primo e secondo livello, e riqualificazione energetica. La terza parte, invece, riguarda le "*Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*" e definisce i criteri per la redazione dell'APE, con l'obiettivo di fornire una valutazione oggettiva delle prestazioni energetiche degli edifici, secondo dei criteri standard nazionali.

Con il Decreto Rilancio, è stato introdotto un nuovo tipo di attestato di prestazione energetica: l'APE convenzionale. Questo documento è stato creato specificatamente per effettuare le verifiche tecniche necessarie all'accesso al Superbonus 110% per i condomini residenziali, in particolare per dimostrare il doppio salto di classe energetica, condizione indispensabile per usufruire della detrazione fiscale.

La prestazione energetica di un edificio è definita come la quantità annua di energia primaria necessaria a soddisfare, in condizioni standard di utilizzo, i fabbisogni relativi ai servizi fondamentali. Questi includono il riscaldamento invernale, il raffrescamento estivo, la produzione di acqua calda sanitaria e la climatizzazione estiva. Per gli edifici non residenziali, si prevedono anche i fabbisogni per l'illuminazione, che però, nel presente studio, non vengono modificati poiché non sono stati eseguiti interventi di riqualificazione all'impianto di tale servizio; i valori relativi all'illuminazione vengono mantenuti invariati rispetto a quelli ottenuti in fase di certificazione con il software Edilclima. Il fabbisogno energetico globale annuale viene calcolato su base mensile, esprimendolo in termini di energia primaria necessaria per ciascun servizio energetico. Lo stesso calcolo mensile viene adottato per l'energia prodotta da fonte rinnovabile, purché avvenga all'interno dei confini del sistema. La normativa stabilisce infatti che l'energia rinnovabile prodotta in situ può essere considerata nella determinazione della prestazione energetica dell'edificio solo se sono rispettate entrambe le condizioni:

- è destinata a coprire fabbisogni energetici dello stesso vettore, cioè non è ammesso compensare energia elettrica con energia termica o viceversa;
- viene utilizzata entro i limiti del fabbisogno mensile corrispondente: la quota eccedente prodotta rispetto al consumo, non può essere accumulata e non concorre alla riduzione del fabbisogno in mesi diversi.

L'energia elettrica esportata, cioè quella non autoconsumata e immessa in rete, non viene considerata nel calcolo della prestazione energetica dell'edificio. Questo significa che, anche se l'impianto fotovoltaico è in grado di produrre energia in eccesso nei mesi estivi, tale surplus non contribuisce a migliorare la classe energetica né a ridurre il fabbisogno energetico annuo dell'edificio. La valutazione si basa esclusivamente sull'energia autoconsumata e impiegata per coprire i servizi energetici interni, in coerenza con i vincoli normativi.

Ai fini delle verifiche progettuali per il rispetto dei requisiti minimi, la normativa prevede il calcolo sia dell'energia primaria totale sia dell'energia primaria non rinnovabile. Invece, per quanto riguarda la classificazione energetica degli edifici, viene considerata esclusivamente l'energia primaria non rinnovabile. Il fattore di conversione in energia primaria totale si calcola mediante l'*Equazione 3.11*, mentre i fattori di conversione da utilizzare sono quelli indicati nella *Tabella 3.2*. Il fattore di conversione in energia primaria è un coefficiente che serve a trasformare l'energia fornita all'edificio, in energia primaria, tenendo conto di tutte le fasi necessarie per renderla disponibile: estrazione, lavorazione, trasporto, trasformazione e distribuzione. Questo fattore può riferirsi sia all'energia primaria non rinnovabile, sia a quella rinnovabile, oppure all'energia primaria totale come somma di entrambe.

$$f_{P,tot} = f_{P,nren} + f_{P,ren} \quad (3.11)$$

Vettore energetico	$f_{P,nren}$	$f_{P,ren}$	$f_{P,tot}$
Gas naturale ⁽¹⁾	1,05	0	1,05
GPL	1,05	0	1,05
Gasolio e Olio combustibile	1,07	0	1,07
Carbone	1,10	0	1,10
Biomasse solide ⁽²⁾	0,20	0,80	1,00
Biomasse liquide e gassose ⁽²⁾	0,40	0,60	1,00
Energia elettrica da rete ⁽³⁾	1,95	0,47	2,42
Teleriscaldamento ⁽⁴⁾	1,5	0	1,5
Rifiuti solidi urbani	0,2	0,2	0,4
Teleraffrescamento ⁽⁴⁾	0,5	0	0,5
Energia termica da collettori solari ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia elettrica prodotta da fotovoltaico, mini-eolico e mini-idraulico ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – free cooling ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – pompa di calore ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00

Tabella 3.2 - Fattori di conversione in energia primaria dei vettori energetici. Fonte: DM 26/06/2015.

Gli interventi realizzati ricadono nelle seguenti categorie previste: ristrutturazione importante di secondo livello e riqualificazione energetica. La prima interessa oltre il 25% della superficie disperdente dell'involucro edilizio, e può interessare anche l'impianto termico. In tal caso devono essere rispettati i requisiti di trasmittanza termica limite delle sole porzioni oggetto di intervento, quelli impiantistici e il valore del coefficiente globale di scambio termico per trasmissione H_T' . La seconda categoria, invece, comprende gli interventi su elementi opachi o trasparenti dell'involucro, sugli infissi, o sull'impianto destinato al riscaldamento o produzione di ACS, nel rispetto anche in questo caso dei valori limite di trasmittanza termica e delle efficienze stagionali di impianto.

La prestazione energetica dell'edificio viene espressa attraverso l'indice $EP_{gl, nren}$, ovvero l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile. Questo indice rappresenta la quantità complessiva di energia primaria non rinnovabile richiesta annualmente dall'edificio per soddisfare i servizi energetici precedentemente nominati. L' $EP_{gl, nren}$ è un parametro aggregato, espresso in kWh/m² anno, ed è calcolato rispetto la superficie utile dell'edificio. Tra i vari indici, uno dei più significativi è L' $EP_{H, nren}$, che descrive la prestazione energetica per il servizio di climatizzazione invernale. Questo parametro tiene conto sia delle caratteristiche dell'involucro edilizio, sia delle prestazioni dell'impianto di riscaldamento. Lo stesso valore di $EP_{H, nren}$ può essere ottenuto con combinazioni diverse tra rendimento dell'impianto e prestazione dell'involucro edilizio. Per questo motivo, è fondamentale avere a disposizione informazioni sull'edificio, così da comprendere dove si trovano i margini di miglioramento maggiori.

La classe energetica di un edificio si basa sul confronto tra l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio reale $EP_{gl, nren}$ e quello dell'edificio di riferimento $EP_{gl, nren, rif, standard}$. Con edificio di riferimento si intende un edificio fittizio che possiede le stesse caratteristiche geometriche e dell'edificio reale: stesso volume, superficie utile, orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d'uso e contesto edilizio. La differenza risiede però nelle caratteristiche prestazionali: l'edificio di riferimento è dotato di componenti edilizi e impiantistici aventi prestazioni stabilite dai criteri riportati nell'Appendice all'Allegato 1 del DM 26 giugno 2015. In sintesi, l'edificio di riferimento rappresenta un termine di confronto normativo, che permette di verificare se l'edificio reale soddisfa i requisiti minimi di efficienza energetica, confrontandolo con un edificio "standard" dotato di soluzioni conformi agli standard di legge.

L' $EP_{gl, nren}$ viene confrontato con una scala di classi predefinite, ottenute applicando coefficienti moltiplicativi al valore di $EP_{gl, nren, rif, standard}$.

Le classi energetiche vanno dalla classe G, che rappresenta il livello minimo di efficienza, fino alla classe A4, che indica il massimo livello di prestazione energetica raggiungibile. La classe G identifica gli edifici con i consumi energetici più elevati, al contrario la classe A rappresenta gli edifici con elevata efficienza energetica. All'interno di questa classe si distinguono quattro sottoclassi: A1, A2, A3 e A4. La classe A4 rappresenta edifici di nuova costruzione o completamente riqualficati secondo severi criteri di sostenibilità e prestazione energetica. Infine, è previsto anche un simbolo specifico per identificare gli edifici a energia quasi zero (nZEB) e degli indicatori che valutano la prestazione energetica dell'involucro edilizio sia d'inverno che d'estate.

3.5 Calcolo del risparmio di energia primaria non rinnovabile annuale.

La valutazione del risparmio energetico complessivo effettuata con i dati reali, neutralizzando l'effetto del clima, è stata confrontata seguendo un approccio coerente con quanto indicato dalle linee guida per la rendicontazione e la trasmissione degli indicatori comuni, pubblicate dal Ministero dell'Economia e delle Finanze in data 6 dicembre 2022, sulla base delle indicazioni fornite dalla Commissione europea. In particolare, tali linee guida forniscono un riferimento per il calcolo del risparmio annuo di energia primaria non rinnovabile (REP), espresso in MWh/anno, relativo agli interventi di efficientamento energetico sugli edifici. Tale valutazione è resa possibile grazie alla disponibilità di dati reali di consumo pre-retrofit, che hanno

consentito una valutazione del risparmio più accurata, superando i limiti di un'analisi esclusivamente basata sugli APE.

◆ Valutazione del risparmio REP in presenza di dati sui consumi reali pre-retrofit

La procedura adottata per la valutazione del risparmio di energia primaria non rinnovabile annuale si sviluppa in cinque fasi operative principali.

1. Definizione dei consumi standard pre-retrofit (APE ante)

Disponendo di un APE precedente agli interventi, i consumi energetici annuali in condizioni d'uso standard vengono identificati direttamente all'interno della sezione dedicata alla stima dei consumi di energia, nei casi in esame saranno i consumi di gas naturale ed energia elettrica da rete.

2. Definizione dei consumi standard post-retrofit (APE post)

Analogamente, al termine dei lavori viene prodotto un nuovo APE, nel quale viene riportata la stima dei consumi energetici in uso standard aggiornati alla configurazione del sistema post-intervento, per ciascuna delle fonti energetiche utilizzate.

3. Determinazione del risparmio percentuale atteso $R_{Fi\%}$

Il risparmio percentuale per fonte energetica viene stimato come rapporto tra i consumi standard ex post e quelli ex ante per la stessa fonte i -esima, secondo l'*Equazione 3.12*.

$$R_{Fi\%} = 100 * \left(1 - \frac{Q_{Ei(post)}}{Q_{Ei(ante)}} \right) \quad (3.12)$$

4. Calcolo del risparmio assoluto atteso R_{Fi}

Moltiplicando la percentuale di risparmio ai consumi annuali effettivi pre-retrofit, della stessa fonte energetica e mediando almeno tre anni precedenti, si ottiene il risparmio assoluto, espresso in unità energetiche coerenti con il vettore considerato, ad esempio Nm^3 per il gas e kWh_{el} per l'energia elettrica da rete.

5. Determinazione del risparmio annuale dell'energia primaria non rinnovabile REP

Per ciascuna fonte energetica, il risparmio assoluto viene convertito in energia primaria moltiplicandolo, se necessario per il potere calorifico inferiore, e poi per il relativo fattore di conversione in energia primaria non rinnovabile $f_{p,nren}$ secondo l'*Equazione 3.13*.

$$REP = \sum_i^n R_{Fi} (PCI * f_{p,nren})_i \quad (3.13)$$

Infine, il risultato viene convertito in MWh/anno e, al fine di ottenere un indicatore specifico utile per confrontare edifici diversi viene diviso per la superficie utile climatizzata.

◆ Valutazione del performance gap

La metodologia è stata applicata ai dati reali di consumo, disponibili sia per il periodo antecedente che per quello successivo agli interventi, con l'obiettivo di restituire una valutazione concreta dell'efficacia energetica degli interventi.

Il valore di energia primaria non rinnovabile risparmiata, calcolato attraverso i consumi reali pre e post-retrofit normalizzati rispetto alle condizioni climatiche esterne, al fine di garantire confrontabilità nel tempo, è stato confrontato con quello ottenuto secondo la metodologia appena descritta. Tale confronto ha permesso di evidenziare le differenze tra i consumi effettivi dell'edificio, rilevati nell'anno 2023-2024, e quelli previsti in sede di progetto in condizioni d'uso standard. Questa discrepanza tra comportamento atteso e comportamento reale, quantificata in termini di risparmio di energia primaria non rinnovabile, è stata assunta come uno degli indicatori per la valutazione del performance gap.

Inoltre, per analizzare in modo più completo il performance gap, si è deciso di ricalcolare le prestazioni energetiche dell'edificio dopo gli interventi, partendo dai consumi effettivi e neutralizzando l'effetto del clima. Questo ha permesso di ottenere un indice di prestazione energetica dell'edificio isolando le effettive modalità d'uso e delle abitudini degli occupanti. È stato poi confrontato anche il contributo delle fonti rinnovabili: da un lato quello previsto in fase di progetto, dall'altro quello effettivamente ottenuto nella realtà. Questo confronto ha reso possibile una valutazione più concreta dell'efficacia degli interventi, non solo in termini di energia risparmiata ma anche in termini di riduzione reale delle emissioni di CO₂.

Le differenze osservate tra progetto e realtà possono essere dovute a vari fattori, tra cui: regolazioni degli impianti diverse da quelle previste, funzionamenti non coerenti con il progetto oppure comportamenti degli occupanti diversi rispetto allo scenario standard e molte altre etc...

In letteratura ^[41] esistono diversi approcci per la quantificazione del performance gap, a seconda del riferimento utilizzato: c'è chi assume come base la prestazione reale e chi, come in questo caso, prende come riferimento la prestazione energetica ipotizzata in fase di progetto.

Il divario è stato calcolato con l'*Equazione 3.14*.

$$\text{Performance gap} = \frac{EP_{\text{reale}} - EP_{\text{progetto}}}{EP_{\text{progetto}}} \times 100 \quad (3.14)$$

Questo metodo consente di quantificare quanto la prestazione reale si discosti da quella di progetto. L'*Equazione 3.14*, utilizzata per il calcolo del performance gap, può essere generalizzata anche ad altri indicatori energetici, ad esempio la quota di energia rinnovabile QR, i rendimenti globali medi stagionali e molti altri.

In questa analisi, il riferimento scelto è rappresentato dalla prestazione energetica di progetto, ovvero dagli indicatori ricavati dal software Edilclima in condizioni operative standard. Il

valore percentuale ottenuto rappresenta il divario prestazionale e indica quanto la prestazione reale si discosti da quella determinata in fase progettuale. Il valore percentuale ottenuto indica quanto i consumi reali siano superiori, indicandoli con il segno +, o inferiori, indicandoli con il segno -, rispetto alle stime progettuali.

Ad esempio, un performance gap di +10% indica che il valore realmente misurato è superiore del 10% rispetto al consumo ipotizzato.

3.6 Analisi costi-benefici

L'analisi costi-benefici è stata condotta al fine di valutare la convenienza economica degli interventi di efficientamento energetico effettuati sui tre condomini. A differenza degli impianti destinati alla vendita di energia, il ritorno economico in questo caso non deriva dalla vendita, ma principalmente dalla riduzione dell'energia acquistata rispetto alla situazione pre-retrofit.

Per valutare attualmente i benefici futuri in termini economici, i risparmi energetici annuali sono stati attualizzati utilizzando un tasso di sconto reale pari al 3%, coerente con la natura dei flussi di cassa considerati. Questo valore è stato scelto attraverso le linee guida di ENEA e della Commissione europea, che suggeriscono tassi compresi tra il 2% e il 5%. Tuttavia, poiché gli interventi analizzati riguardano infrastrutture stabili con rischi molto bassi, benefici prevedibili e orizzonti temporali di lungo termine, si è ritenuto opportuno adottare un valore leggermente inferiore al valore medio. Inoltre, non è presente il rischio di un investimento finanziario volatile. Il tasso reale considera esclusivamente il costo di opportunità del capitale e il rischio dell'investimento, escludendo l'effetto dell'inflazione. Infatti, i risparmi energetici annuali sono stati ipotizzati costanti nel tempo, ovvero espressi a prezzi invariati lungo tutta la vita utile degli impianti.

L'attualizzazione dei flussi di cassa tiene conto della preferenza temporale, ovvero del fatto che le persone preferiscono ottenere benefici oggi piuttosto che in futuro. Tiene anche conto dell'incertezza legata ai risparmi futuri, del valore alternativo che il capitale potrebbe avere se investito in altre attività e dell'obsolescenza tecnica degli impianti, che può comportare una riduzione dei benefici nel tempo.

La vita utile considerata per l'analisi economica è pari a 25 anni, in conformità con le indicazioni fornite da ENEA e dalla norma UNI EN 15459-1. Poiché gli interventi realizzati hanno previsto l'installazione di diverse tecnologie, tra cui l'isolamento termico dell'involucro, sistemi ibridi composti da pompe di calore e caldaie a condensazione, impianti fotovoltaici e impianti solari termici, si è scelto di assumere come riferimento la vita utile dell'elemento con durata inferiore. In particolare, si osserva che l'isolamento termico può raggiungere una durata utile anche superiore ai 40 anni, mentre i generatori di calore come caldaie e pompe di calore presentano in genere una vita utile stimata di circa 20 anni o poco più. Pertanto, per uniformare l'orizzonte temporale di analisi e mantenere un approccio conservativo, si è adottata una vita utile pari a 25 anni, ritenuta rappresentativa del nuovo sistema edificio-impianto riqualificato.

L'attualizzazione dei flussi di cassa è stata effettuata applicando il fattore di attualizzazione definito attraverso l'*Equazione 3.15*, riportando così ogni risparmio energetico annuale futuro al suo valore attuale, tenendo conto dell'anno di riferimento e del tasso di sconto reale adottato.

$$FA = \frac{1}{(1+r)^t} \quad (3.15)$$

dove:

- FA è il fattore di attualizzazione;
- r è il tasso di attualizzazione reale;
- t è l'anno di riferimento.

◆ Principali indicatori di valutazione della convenienza economica degli investimenti

Tra gli indicatori economici analizzati, è stato calcolato innanzitutto il tempo di ritorno dell'investimento, noto come payback period. In questo lavoro è stato calcolato il payback finanziario, che si basa sui flussi di cassa attualizzati. Questo indicatore rappresenta il numero di anni necessari a recuperare il capitale investito, e corrisponde anche al numero di anni in cui per la prima volta i risparmi attualizzati cumulati compensano l'investimento iniziale, cioè quando il VAN è uguale a 0. Esistono due tipi di payback time:

- Il payback semplice si calcola senza considerare l'attualizzazione dei flussi di cassa (tasso di sconto $r = 0$), fornisce una stima approssimativa e non tiene conto dell'interesse e della durata utile dell'investimento.
- Il payback finanziario, adottato in questa analisi, utilizza invece flussi di cassa attualizzati (tasso di sconto $r > 0$), ed è più preciso poiché considera l'andamento temporale del valore dei flussi di cassa.

Un investimento si considera conveniente se il tempo di ritorno attualizzato risulta inferiore rispetto alla vita utile dell'intervento, naturalmente più basso è il payback time maggiore sarà la convenienza dell'investimento. Nell'*Equazione 3.16* si riporta il calcolo del suddetto indicatore economico.

$$\sum_{t=1}^{PBT} \frac{FC_t}{(1+r)^t} - I_0 = 0 \quad (3.16)$$

dove:

- FC_t è il flusso di cassa riferito al tempo t;
- I_0 è l'investimento iniziale;
- PBT è il tempo di ritorno attualizzato nel momento in cui l'equazione si annulla.

Il valore attuale netto (VAN) rappresenta la differenza tra il valore attualizzato dei benefici futuri generati da un investimento e il costo iniziale sostenuto per realizzarlo. È un indicatore economico fondamentale per valutare la convenienza di un progetto: se il VAN risulta positivo, significa che l'investimento genera un guadagno netto rispetto al capitale investito, considerando il tempo e il tasso di attualizzazione.

Il calcolo si basa sull'idea che il denaro disponibile oggi abbia un valore superiore rispetto allo stesso importo disponibile in futuro. Per questo motivo, tutti i flussi di cassa futuri vengono riportati al valore presente attraverso l'attualizzazione. In altre parole, il VAN consente di stimare oggi il valore netto del progetto, come se tutti i benefici attesi fossero immediatamente disponibili.

Trascurando l'effetto dell'inflazione (già escluso utilizzando un tasso reale), il VAN è stato calcolato come la somma dei flussi di cassa annui attualizzati meno l'investimento iniziale sostenuto nell'anno zero (*Equazione 3.17*), in cui T è la vita utile media dei nuovi sistemi energetici installati (25 anni).

$$VAN = \sum_{t=1}^T \frac{FC_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (3.17)$$

Infine, l'ultimo indicatore economico che viene calcolato è l'indice di profitto (IP). Questo parametro rappresenta il rapporto tra il VAN e l'investimento iniziale (*Equazione 3.18*), e consente di valutare l'efficienza economica di un intervento, indicando quanto rende ogni euro investito.

$$IP = \frac{VAN}{I_0} \quad (3.18)$$

L'indice di profitto è particolarmente utile quando si devono confrontare più progetti con VAN positivo, ma non si dispone delle risorse necessarie per realizzarli tutti. In questi casi, consente di stabilire una graduatoria di priorità: a parità di VAN, sarà conveniente l'intervento con IP più alto, in quanto garantisce un ritorno maggiore in proporzione al capitale investito. Risulta dunque uno strumento efficace per individuare la soluzione economicamente più vantaggiosa tra diverse alternative.

3.7 Redazione del questionario di Post-occupancy evaluation (POE).

Il questionario di valutazione post-occupativa (POE) è stato sviluppato in modo da indagare la qualità del comfort ambientale degli ambienti interni, percepito dagli occupanti degli edifici in seguito agli interventi di riqualificazione energetica. Tale strumento è stato utilizzato per raccogliere variabili soggettive, non essendo stato possibile affiancare l'analisi con misurazioni oggettive dei parametri ambientali, come ad esempio la temperatura interna, l'umidità o la qualità dell'aria interna. Pertanto, i risultati ottenuti riflettono la percezione individuale degli utenti sul comfort generale degli spazi abitativi post-intervento. La costruzione del questionario si è basata sull'integrazione di due riferimenti fondamentali:

1. Protocollo WELL Building Standard, sviluppo del sondaggio post-occupativo per edifici residenziali.

Il WELL Building Standard rappresenta uno dei principali protocolli internazionali per la promozione del comfort ambientale negli ambienti, con un approfondimento specifico sul comfort termico e sulla qualità dell'aria in ambito residenziale. Il questionario di POE è stato sviluppato con l'obiettivo di adattare le linee guida del protocollo con il contesto specifico dell'indagine, cioè edifici residenziali riqualificati tramite il Superbonus 110%.

Il WELL Building Standard rappresenta il primo protocollo di certificazione edilizia che pone al centro la salute e il benessere psicofisico degli occupanti all'interno degli edifici. Si basa su un approccio olistico della progettazione, che supera il solo concetto di comfort termico per includere anche altri aspetti del benessere umano; ad esempio, il comfort acustico, quello visivo, la qualità dell'aria e dell'acqua, gli aspetti comportamentali e sociali. Sulla base di questi riferimenti è stato sviluppato un questionario post-occupativo, adattato al contesto della riqualificazione energetica degli edifici residenziali. L'obiettivo è stato quello di indagare, attraverso variabili soggettive, il livello di soddisfazione degli occupanti in relazione alle variazioni di percezione del comfort ambientale in seguito alla realizzazione di interventi di ristrutturazione.

2. Norma UNI EN ISO 10551, scelta delle scale soggettive per la valutazione della percezione ambientale.

Il secondo riferimento utilizzato è la norma UNI EN ISO 10551, la quale fornisce le linee guida per la costruzione di scale soggettive atte a valutare come gli occupanti percepiscono l'ambiente interno. Tali scale consentono di rilevare sensazione di caldo o freddo, percezione legato al rumore, e molti altri aspetti della qualità ambientale interna. L'utilizzo corretto di queste scale permette di ottenere informazioni precise in merito alla qualità ambientale percepita e può contribuire all'identificazione di malfunzionamenti e alla loro risoluzione. Infatti, l'obiettivo principale di queste scale è diminuire i pregiudizi e le soggettività, in modo da garantire l'affidabilità delle risposte fornite dagli occupanti.

Tuttavia, è importante sottolineare che la norma non fornisce indicazioni dirette sulla progettazione e sull'applicazione dei questionari, pur offrendo una base per la costruzione delle scale da includere al loro interno. Infatti, le scale proposte dalla UNI EN ISO 10551 sono state integrate nella costruzione del questionario post-occupativo. A tale scopo, si è fatto riferimento ai concetti del protocollo WELL Building Standard, il quale ha fornito una struttura generale per definire le domande del questionario.

La norma suggerisce l'utilizzo di quattro scale di giudizio, da applicare in ordine, al fine di ottenere una valutazione più completa. Le quattro scale sono:

- Scala percettiva o di sensazione: valuta l'intensità di una sensazione percepita (ad esempio troppo caldo o troppo freddo), è stata adottata una scala bipolare a nove punti;
- Scala valutativa: misura il livello di comfort della condizione percepita (ad esempio situazione confortevole o di disagio), è stata adottata una scala unipolare a cinque punti;
- Scala di preferenza: indica la preferenza soggettiva rispetto a una condizione diversa da quella percepita (ad esempio preferirebbe più caldo o più freddo), è stata adottata una scala bipolare a sette punti;

- Scala di tolleranza: permette di esprimere un giudizio sul grado di accettabilità della condizione percepita (ad esempio tollerabile o estremamente intollerabile), è stata adottata una scala unipolare a cinque punti.

Nelle scale bipolari, il punto centrale rappresenta la condizione di neutralità o indifferenza, cioè l'assenza di sensazione, mentre nelle scale unipolari è il primo punto della scala a indicare la condizione di assenza di sensazione.

Secondo quanto previsto dalla norma, i dati raccolti attraverso i questionari possono essere trattati mediante diverse tecniche di analisi statistica, tra cui indici di tendenza centrale (media, mediana e moda) e indici di dispersione (deviazione standard e varianza). Tuttavia, nel caso specifico, le risposte fornite dagli occupanti si sono dimostrate molto coerenti tra loro, senza mostrare contrapposizioni. Proprio per questa ragione, si è ritenuto opportuno utilizzare come principale indicatore il valore medio, ottenuto facendo la media aritmetica delle risposte, in quanto rappresentativo della soddisfazione generale percepita. La media consente di sintetizzare efficacemente il giudizio degli utenti in presenza di distribuzioni omogenee e senza outlier.

L'uso di queste scale combinato con le scale Likert garantisce una rappresentazione più completa della percezione soggettiva e supporta l'analisi comparativa tra i diversi casi studio. Nel questionario, infatti, sono state utilizzate anche le scale di valutazione di tipo Likert, spesso utilizzate nelle indagini soggettive. Le scale di Likert sono composte da una sequenza ordinata di risposte, che va nel caso in esame da 0 (condizione peggiore e negativa) a 10 (condizione migliore e positiva). Queste scale risultano utili per esprimere il grado di accordo e quantificare le proprie preferenze in modo semplice, consentendo l'elaborazione statistica delle risposte. Nel contesto del presente studio, le scale di Likert sono state utilizzate per raccogliere valutazioni soggettive relative alla qualità ambientale percepita.

4. PRESENTAZIONE DEI TRE CASI STUDIO

Nel presente capitolo verranno analizzati i tre casi studio relativi ad interventi di riqualificazione energetica eseguiti su tre edifici condominiali situati tutti all'interno della città di Udine. Ciascun caso rappresenta una configurazione diversa di intervento, dall'efficientamento degli impianti alla riqualificazione dell'involucro edilizio, fino alla combinazione di entrambe le strategie. In ciascun caso studio verrà fatta un'analisi comparativa tra la configurazione dell'edificio nello stato di fatto antecedente all'intervento e quella successiva alla riqualificazione energetica. L'analisi si concentrerà su due principali ambiti di intervento: da un lato, le soluzioni impiantistiche adottate per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria, e dall'altro, le misure di isolamento termico degli elementi dell'involucro edilizio. In particolare, saranno esaminate le modifiche apportate ai generatori di calore e agli strati di coibentazione delle pareti, delle coperture e degli infissi.

Per ragioni di riservatezza, i tre condomini non vengono identificati con il loro vero nome, ma vengono identificati con nomi simbolici basati su colori: condominio Blu, condominio Arancione e condominio Verde. Questa convenzione è stata mantenuta coerentemente in tutto l'elaborato, soprattutto nella rappresentazione grafica e tabellare dei dati, così da facilitarne la lettura all'interno della tesi.

Si effettuerà a valle un confronto diretto sull'efficacia delle diverse soluzioni adottate in termini di miglioramento delle prestazioni energetiche e riduzione delle emissioni di gas serra. La scelta di edifici appartenenti alla medesima area geografica e climatica consente di mantenere le stesse condizioni al contorno climatiche, semplificando il confronto tra i diversi interventi. I casi studio presi in esame sono:

- condominio Blu: 30 unità abitative, riqualificazione combinata di involucro edilizio e sostituzione del sistema di generazione;
- condominio Arancione: 19 unità abitative, intervento quasi esclusivamente sull'impianto di riscaldamento e piccolo intervento di isolamento del sottotetto;
- condominio Verde: 12 unità abitative, interventi mirati unicamente all'involucro edilizio.

L'analisi approfondita di questi tre esempi permetterà di valutare non solo i risparmi energetici conseguiti, ma anche il grado di coerenza tra le prestazioni previste in fase progettuale (APE convenzionale post-intervento) e quelle effettivamente rilevate a seguito della riqualificazione definendo la "classe energetica reale".

I dati riportati all'interno di questo capitolo, relativi ai casi studio analizzati, fanno riferimento ai valori di progetto definiti secondo le metodologie definite dalla norma UNI/TS 11300. Tali dati sono stati presi dalla relazione tecnica e rappresentano le condizioni previste in fase di progettazione degli interventi di riqualificazione energetica. Inoltre, si precisa che, i valori riportati servono a definire un riferimento per la verifica del salto di doppia classe energetica richiesto ai fini delle detrazioni fiscali.

◆ Inquadramento urbanistico, climatico e metodologico

Gli edifici oggetto di analisi si trovano all'interno del comune di Udine, in una zona urbana dove si alternano quartieri residenziali vetusti e nuove aree di espansione. La tipologia edilizia prevalente è quella del condominio pluripiano, tipico delle costruzioni urbane friulane realizzate nel secondo dopoguerra, generalmente costruiti in muratura di laterizio e caratterizzati da prestazioni energetiche scarse rispetto agli standard vigenti.

Tutti gli edifici analizzati sono stati modellati considerando condizioni climatiche e parametri di calcolo uniformi, in modo da garantire la coerenza dei confronti tra i diversi casi studio.

I dati climatici di riferimento sono definiti in conformità alla norma UNI 10349 del 2016, che fornisce i dati climatici italiani necessari per il calcolo mensile dei fabbisogni energetici degli edifici in regime standard. Udine è classificata in zona climatica E, poiché il valore dei gradi giorno si attesta a 2.323 GG (secondo il DPR 412/1993), rientrando così nella fascia compresa tra 2.101 e 3.000 GG. Infatti, a Udine è presente un clima relativamente freddo, con un periodo di accensione dell'impianto di riscaldamento consentito dal 15 ottobre al 15 aprile con 14 ore giornaliere, e un andamento delle temperature esterne medie mensili presentato in **Tabella 4.1**.

GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
2,9	4,6	7,9	12,4	18,3	21,7	23	22,4	18,3	13,9	7,8	4,7

Tabella 4.1 - Temperature esterne medie mensili in °C.

Secondo la normativa UNI 5364 e UNI EN 12831, i parametri climatici di progetto assunti per la modellazione energetica della città di Udine sono:

- Temperatura minima invernale di progetto: -5 °C;
- Temperatura massima estiva di progetto: 31 °C.

La temperatura interna di set-point nelle condizioni invernali è stata fissata a 20 °C, mentre il tasso di ventilazione è stato impostato a 0,5 ricambi d'aria all'ora, in linea agli standard di progetto per gli edifici residenziali.

La modellazione energetica degli edifici è stata realizzata mediante il software Edilclima EC700, che consente il calcolo delle prestazioni energetiche mediante approccio mensile, in accordo con le disposizioni della norma UNI/TS 11300.

Le verifiche di legge per ogni edificio sono state effettuate in conformità con il Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015, sia per quanto riguarda i requisiti minimi sia per la redazione della relazione tecnica ex legge 10. È stata inoltre effettuata la verifica FER secondo il Decreto Legislativo del 3 marzo 2011, relativa all'obbligo di integrazione delle fonti rinnovabili negli edifici di nuova costruzione o sottoposti a ristrutturazioni importanti.

Gli Attestati di Prestazione Energetica (APE) sono stati redatti anch'essi secondo le indicazioni del Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015, mantenendo una conformità normativa lungo l'analisi effettuata.

Inoltre, i parametri principali impostati nella modellazione sono stati:

- I ponti termici sono stati valutati mediante calcolo analitico;
- Le resistenze termiche liminari sono state determinate secondo l'appendice A della UNI EN ISO 6946;
- La capacità termica è stata calcolata con il metodo semplificato;
- La verifica delle condense interstiziali è stata condotta secondo quanto stabilito dal decreto interministeriale 26/06/2015, con l'applicazione dell'interpretazione più restrittiva.

4.1 Caso studio 1: condominio Blu

Il condominio Blu, costruito nel 1962, si sviluppa su 8 piani fuori terra ed è stato oggetto di un intervento di riqualificazione energetica condominiale, che ha previsto la realizzazione sia di opere edili che impiantistiche.

L'intervento ha comportato l'isolamento termico di oltre il 25% della superficie disperdente lorda dell'edificio e la sostituzione del generatore termico con un impianto ibrido composto da generatore di calore modulare a condensazione e pompa di calore ad alta efficienza. Siccome l'intervento ha coinvolto una porzione di involucro superiore al 25% della superficie disperdente lorda, è stato classificato come ristrutturazione importante di secondo livello. Non è stato effettuato un rinnovo complessivo dell'impianto di climatizzazione invernale, infatti, non è stato eseguito nessun intervento sui terminali di emissione mantenendo quelli antecedenti alla realizzazione degli interventi. Come previsto dall'articolo 1.4.1 punto b del DM 26 giugno del 2015, la verifica dei requisiti di trasmittanza termica dei componenti edilizi e dei rendimenti degli impianti, è stata limitata esclusivamente alle porzioni oggetto di intervento.

L'edificio è composto complessivamente da 30 unità immobiliari, prevalentemente destinate ad uso residenziale denominate categoria E.1 (1) (ai sensi del DPR 412/1993), cioè abitazioni adibite a residenza con carattere continuativo. La rappresentazione del modello 3D digitale è riportata in **Figura 4.1**, l'assenza della copertura consente di visualizzare la disposizione interna degli appartamenti per ogni piano. Sono inoltre presenti:

- 3 unità immobiliari con destinazione d'uso E.5: edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili;
- un'unità immobiliare con destinazione d'uso E.4 (3): edifici adibiti ad attività ricreative, corrispondente, nel caso specifico, ad un bar.

Le caratteristiche geometriche principali dell'edificio sono:

- Volume lordo riscaldato: 13.601,52 m³;
- Superficie utile riscaldata: 3.743,05 m²;
- Superficie lorda disperdente: 5.497,50 m².

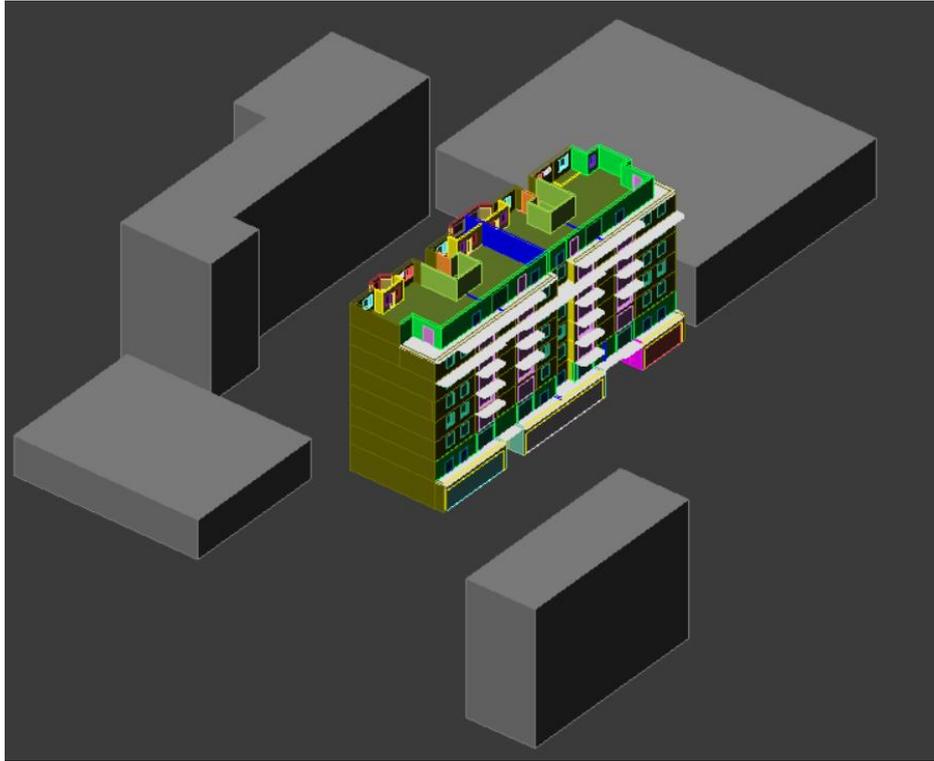


Figura 4.1 - Modello 3D del condominio Blu realizzato in ambiente Edilclima EC700.

4.1.1 Caratterizzazione dell'involucro edilizio: confronto tra lo stato di fatto e lo stato riqualificato

Prima di procedere alla descrizione degli interventi di riqualificazione effettuati sull'involucro edilizio, si vogliono definire le motivazioni che hanno guidato le decisioni progettuali.

L'involucro opaco dell'edificio, antecedente agli interventi, presentava condizioni di basso isolamento termico. I materiali costruttivi impiegati, tipici dell'epoca edilizia friulana degli anni '60, erano caratterizzati da elevati valori di trasmittanza termica e da un'assenza di coibentazione. Le perdite complessive attribuibili ai componenti opachi dell'involucro si attestavano a circa 105 kW, rappresentando un'importante fonte di inefficienza essendo pari al 72,7 % delle perdite totali sulla superficie lorda disperdente.

In particolare, l'elemento edilizio etichettato con il codice M1 e corrispondente al muro esterno, costituiva e costituisce la superficie disperdente più estesa. Esso era composto da una doppia muratura in laterizio, con uno spessore totale di circa 35 cm. Partendo dall'interno erano presenti: una prima muratura da 25 cm, una seconda da 8 cm, e intonacate esternamente e internamente con un rivestimento a base di sabbia e cemento pari a 1 cm l'uno. Questa configurazione, priva di strati isolanti, determinava valori di trasmittanza termica molto elevati, comportando elevate dispersioni di calore attraverso l'involucro edilizio. Anche gli altri elementi opachi confinanti con l'esterno (soffitto copertura, muri esterni, soffitto verso rampa auto) presentavano analoghe caratteristiche costruttive, seppure con superfici inferiori rispetto al muro esterno codificato M1.

La situazione pre-intervento evidenziava un comportamento termico insoddisfacente, con dispersioni molto elevate e un significativo fabbisogno di energia termica per mantenere delle

condizioni di comfort interno accettabili. Grazie agli interventi di isolamento termico, oltre alla riduzione delle dispersioni, è stato possibile eliminare i problemi causati dalla presenza dei ponti termici. I ponti termici si verificano in corrispondenza di discontinuità geometriche o costruttive dell'involucro edilizio, come ad esempio tra le pareti e i solai, negli angoli o in prossimità degli elementi finestrati. In queste zone, a causa della maggior dispersione termica e della diminuzione delle temperature superficiali interne, si possono generare fenomeni di condensa e formazione di muffe, creando conseguenze negative sia sul comfort abitativo sia sulla durabilità dei materiali.

In particolare, come mostrato in **Figura 4.2**, prima della realizzazione degli interventi erano presenti problemi di condensa interna e formazione di muffa visibili lungo lo spigolo della parete esterna e sotto gli infissi.



Figura 4.2 - Formazione di muffa e condensa interna dovuta ai ponti termici nello stato pre-retrofit.

Le decisioni progettuali adottate hanno seguito una priorità: sono stati scelti gli elementi edilizi che maggiormente contribuivano alle dispersioni complessive. Infatti, si è scelto di intervenire isolando il muro esterno identificato con il codice M1 e il solaio verso la copertura identificato con il codice S2. Tali componenti rappresentavano da soli circa il 36% delle dispersioni termiche totali dell'intero involucro edilizio. Concentrando gli interventi su questi elementi edilizi principali, si è ottenuta la massima efficacia energetica rispetto al costo degli interventi, in linea con il principio di minimizzazione del rapporto costi/benefici, come previsto dalla normativa tecnica UNI EN 15459. Non sarebbe stato conveniente intervenire su una parete dell'involucro edilizio caratterizzata da basse dispersioni termiche, poiché il risparmio energetico non avrebbe giustificato l'elevato costo dell'intervento.

Le scelte adottate vengono descritte in seguito. Alla parete esterna identificata con il codice M1, è stato applicato sul lato esterno un sistema a cappotto termico, costituito da pannellature in EPS additivato con grafite, tipo PS Dammplatte, avente spessore di 12 cm. L'EPS ossia il polistirene espanso sinterizzato è un materiale isolante leggero, composto principalmente da

aria intrappolata in una matrice polimerica, che offre buone proprietà di isolamento termico. L'aggiunta di grafite migliora ulteriormente le sue prestazioni riducendo la conducibilità termica rispetto ai pannelli tradizionali. Il sistema di isolamento è stato completato con l'applicazione di un intonaco plastico specifico per cappotti, dello spessore trascurabile di circa 0,6 cm.

Analogamente, sul solaio della copertura (codice S2) è stato applicato un pannello termoisolante Elle Esse Treven di 16 cm di spessore, dotato di una barriera al vapore costituita da un foglio di alluminio dello spessore di 1 mm. La presenza della barriera al vapore è fondamentale per impedire la migrazione del vapore acqueo verso l'interno del pacchetto isolante, prevenendo così fenomeni di condensa interstiziale che potrebbero compromettere l'efficacia dell'isolamento e la durabilità dei materiali.

Come mostrato in **Tabella 4.2**, si possono osservare i cambiamenti apportati ai principali componenti opachi interessati dai lavori. L'intervento ha determinato una riduzione della trasmittanza termica superiore all'80% rispetto allo stato pre-retrofit. Di conseguenza, le perdite complessive attraverso l'involucro opaco si sono ridotte a circa 49 kW, con una riduzione superiore al 50% rispetto alla situazione iniziale. L'intervento ha coinvolto l'isolamento del 47,41% del totale delle superfici disperdenti lorde dell'edificio. Inoltre, le verifiche di condensa superficiale e di condensa interstiziale, eseguite su tutti i componenti dell'involucro edilizio dopo l'intervento di riqualificazione, hanno dato esito positivo, confermando il rispetto dei requisiti normativi dettati dal DM 26/06 del 2015.

L'effetto dell'isolamento dei soli componenti opachi ha permesso di ridurre in maniera significativa le perdite complessive per trasmissione attraverso l'involucro: queste sono passate da 144 kW nello stato pre-intervento a 88 kW dopo l'intervento, con una riduzione pari al 38,89%, confermando l'efficacia dell'intervento.

Dispersioni per componente delle strutture opache					
Codice componente	Descrizione componente	Superficie totale [m ²]	Trasmittanza termica pre-retrofit [W/m ² K]	Trasmittanza termica post-retrofit [W/m ² K]	Miglioramento trasmittanza termica [%]
M1	Muro esterno sp. 35 cm (iso 12)	1.768,99	0,904	0,195	78,4
M2	Muro esterno sp. 35 cm (iso 2,6)	266,76	0,904	0,123	86,4
M14	Muro esterno sp. 20 cm	62,13	1,341	0,210	84,3
P3	Solaio verso rampa auto sp. 30 cm	51,87	1,670	0,217	87,0
S2	Solaio copertura sp. 30 cm	456,88	1,784	0,188	89,5

Tabella 4.2 - Miglioramento della trasmittanza termica dei componenti opachi.

Nelle seguenti figure (**Figure 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6**) sono riportate le modifiche apportate alle facciate dell'edificio, osservabili da differenti prospettive e orientamenti, a sinistra è mostrato lo stato dell'edificio prima degli interventi di riqualificazione, mentre a destra è visibile la situazione attuale post-retrofit.



Figura 4.3 - Vista della facciata est dell'edificio: a sinistra lo stato pre-retrofit, a destra lo stato post-riqualificazione rispetto all'angolo nord-est.



Figura 4.4 - Vista della facciata ovest dell'edificio: a sinistra lo stato pre-retrofit, a destra lo stato post-riqualificazione rispetto all'angolo nord-ovest.



Figura 4.5 - Vista d'angolo della facciata sud-est: a sinistra lo stato pre-retrofit, a destra lo stato post-riqualificazione.



Figura 4.6 - Vista della facciata ovest: a sinistra lo stato pre-retrofit, a destra lo stato post-retrofit.

4.1.2 Caratterizzazione delle soluzioni impiantistiche: confronto tra lo stato di fatto e lo stato riqualificato

L'edificio prima della realizzazione degli interventi di riqualificazione energetica era servito da un impianto centralizzato per la produzione combinata di riscaldamento e acqua calda sanitaria. Il sistema era costituito da una caldaia tradizionale con bruciatore ad aria soffiata, installata nel 1999, di marca Ecoflam e modello Ecomax, alimentata a gas metano e caratterizzata da una

potenza utile nominale di 315 kW. Il rendimento utile del generatore di calore alla potenza nominale era pari al 96%, mentre il fluido termovettore utilizzato era acqua calda avente temperatura di mandata variabile in base alla compensazione climatica, impostata fino ad un massimo di 80°C, con una differenza di temperatura tra mandata e ritorno di 20°C.

Nella situazione attuale post-riqualificazione, l'impianto di generazione del calore è stato completamente sostituito con un sistema ibrido certificato, composto da un generatore di calore modulare a condensazione e da una pompa di calore aria-acqua per installazione esterna. Il sistema ibrido in modalità di funzionamento contemporaneo, operante insieme per fornire calore in modo combinato, comprende:

- Due caldaie murali a condensazione, identiche tra loro, di marca Viessmann, serie Vitodens, modello 200 W B2HA 120 kW, alimentate a gas metano. Entrambe le caldaie impiegano un bruciatore ad aria soffiata e possiedono una potenza utile nominale pari a 110,9 kW, con un rendimento termico utile al 100% della potenza nominale pari al 97,9%. Inoltre, l'assorbimento elettrico degli ausiliari delle caldaie è stato ridotto rispetto alla situazione pre-retrofit, passando da 712 W a 431 W, a potenza nominale;
- Una pompa di calore aria-acqua di marca Viessmann, serie Vitocal, modello 200-A Pro AA-BB 26, per installazione esterna. La pompa di calore è in grado di fornire in condizioni nominali, con temperatura della sorgente fredda pari a 7°C e temperatura della sorgente calda di 35°C, una potenza termica utile in riscaldamento pari a 30,2 kW e un coefficiente di prestazione COP pari a 4,36. Inoltre, sfrutta come vettore energetico l'energia elettrica ed è dotata di funzionamento modulare, ovvero varia la potenza in funzione del carico termico richiesto (non con funzionamento di tipo on-off).

Anche dopo l'intervento di riqualificazione, la logica di regolazione della temperatura di mandata del sistema centralizzato è stata mantenuta invariata, con un rendimento di regolazione pari al 98%. L'impianto sarà gestito tramite un sistema PLC, che controlla l'accensione e lo spegnimento dei generatori, la gestione delle temperature avviene attraverso la regolazione climatica in funzione della temperatura esterna.

La regolazione continua con attenuazione notturna prevede due livelli di controllo:

- Regolazione per singolo ambiente: ogni spazio è dotato di valvole termostatiche, che consentono agli utenti di gestire autonomamente la temperatura di ogni ambiente in base alle proprie esigenze;
- Regolazione climatica centralizzata: il sistema adatta automaticamente la temperatura dell'acqua di mandata in funzione della temperatura esterna rilevata, ottimizzando il rendimento degli impianti e riducendo gli sprechi energetici, soprattutto durante i periodi di carico parziale.

Nella situazione antecedente ai lavori, i terminali di emissione del calore erano radiatori installati sulle pareti esterne non isolate, una configurazione che comportava elevate dispersioni termiche verso l'esterno. A seguito dell'intervento di isolamento termico delle superfici disperdenti esterne, si è scelto di mantenere i terminali esistenti per evitare interventi invasivi all'interno degli appartamenti e limitare i disagi per i residenti. Tuttavia, grazie al miglioramento dell'isolamento delle pareti, il rendimento di emissione è aumentato parecchio, passando dal 91,3% nella situazione pre-retrofit al 96,3% nello stato post-retrofit. Questo miglioramento ha consentito una riduzione della temperatura di mandata di progetto, che è passata da 80 °C a 65

°C, con una temperatura di mandata massima di 70°C. È stata mantenuta la stessa differenza di temperatura tra mandata e ritorno ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$).

Il circuito di distribuzione è configurato come impianto bitubo con valvole termostatiche. In questa configurazione, ogni radiatore è collegato ad una rete di mandata e ad una rete di ritorno distinte, consentendo un controllo indipendente della temperatura di ciascun ambiente tramite valvole termostatiche, che modulano automaticamente il flusso del fluido termovettore in base al calore richiesto dal determinato ambiente.

Anche il sistema di distribuzione dell'acqua calda ha beneficiato di un significativo miglioramento a seguito degli interventi di riqualificazione. Nella configurazione originaria, la distribuzione avveniva tramite montanti non isolati, posati in traccia sul lato interno delle pareti esterne. Grazie all'applicazione del cappotto termico sulle superfici esterne, il rendimento della distribuzione è passato dal 93,7% al 99,2% nello stato riqualificato.

Inoltre, l'intervento ha portato anche ad una diminuzione dei fabbisogni elettrici degli ausiliari di centrale, con una riduzione della potenza assorbita da 500 W a 200 W, contribuendo all'incremento dell'efficienza energetica dell'intero sistema edificio-impianto.

Di seguito sono riportate alcune immagini della centrale termica, che documentano lo stato dell'impianto prima e dopo gli interventi di riqualificazione in **Figura 4.7** e **4.8**.



Figura 4.7 - A sinistra sono visibili due immagini della caldaia tradizionale pre-retrofit, a destra sono presenti le due caldaie modulari a condensazione installate dopo la riqualificazione.



Figura 4.8 - La centrale termica nello stato antecedente agli interventi è visibile a sinistra, mentre a destra è riportata la configurazione successiva alla riqualificazione.

All'interno della centrale termica è stato installato un serbatoio di accumulo inerziale di tipo "puffer", di colore grigio, a servizio sia della pompa di calore sia dei due generatori di calore a condensazione. Il puffer è un serbatoio che consente di accumulare energia termica, stabilizzando il funzionamento degli impianti e migliorando l'efficienza del sistema, in quanto riduce il numero di accensioni e spegnimenti dei generatori. La pompa di calore aria-acqua funziona con dei limiti di temperatura operativi precisi:

- La temperatura di cut-off della sorgente fredda, cioè dell'aria esterna, è compresa tra 0°C e 35°C: al di fuori di questo intervallo, la pompa di calore si arresta automaticamente per motivi di efficienza e protezione;
- La temperatura di cut-off della sorgente calda, cioè dell'acqua di impianto, è compresa tra 20°C e 55°C: se il ritorno dal puffer verso la pompa di calore supera i 55°C, quest'ultima interrompe il funzionamento in quanto non si trova più in condizioni di efficienza.

La regolazione da progetto della pompa di calore è stata impostata a temperatura di mandata fissa e pari a 40°C, con un salto termico di 5°C all'interno del generatore. Questa scelta progettuale è finalizzata a garantire il funzionamento efficiente della pompa di calore, che opera in modo ottimale a basse temperature, massimizzando il coefficiente di prestazione e riducendo i consumi elettrici.

◆ **Interventi trainati: installazione di impianti a fonte rinnovabile**

Tra gli interventi trainati realizzati sono presenti l'installazione di un impianto fotovoltaico composto da 34 moduli, destinato a supportare il fabbisogno energetico del sistema ibrido e l'installazione di un impianto solare termico costituito da 16 collettori solari, dedicati al preriscaldamento dell'ACS, **Figura 4.9**.

Per la produzione di ACS, è stato previsto un preparatore rapido da 500 litri, dotato di scambiatore di calore per la produzione semi-istantanea dell'acqua calda sanitaria, garantendo così un'elevata efficienza e un rapido reintegro proveniente dal puffer. Completano il sistema

due bollitori di accumulo da 500 litri ciascuno, marca Pacetti, evidenti in colore giallo in **Figura 4.8**, alimentati direttamente dall'impianto solare termico, che consentono di sfruttare al meglio l'energia solare, riducendo il consumo di energia primaria non rinnovabile per la produzione di ACS. La temperatura di erogazione dell'ACS è impostata a 40°C, con un rendimento di erogazione pari al 100%. La temperatura media dell'accumulo, in conformità alle ipotesi definite dalla UNI/TS 11300-2, è fissata a 60°C.



Figura 4.9 - A sinistra è visibile l'impianto fotovoltaico, mentre a destra sono mostrati i collettori solari termici, entrambi installati sulla copertura del condominio.

◆ Solare fotovoltaico

L'impianto fotovoltaico è suddiviso in due sottocampi:

- Sottocampo sud: composto da 15 moduli, potenza di picco complessiva pari 6.075 W_p e producibilità pari a 6.303 kWh;
- Sottocampo ovest: composto da 19 moduli, potenza di picco complessiva pari 7.695 W_p e producibilità pari a 7.475 kWh.

I moduli sono prodotti dalla Viessmann, ciascuno con una potenza di picco pari a 405 W_p. L'impianto fotovoltaico è destinato a coprire i seguenti servizi energetici dell'edificio:

- Climatizzazione invernale;
- Produzione di acqua calda sanitaria;
- Usi comuni (illuminazione e trasporti).

La produzione annua di energia elettrica stimata per l'impianto fotovoltaico, come riportato nella relazione ex legge 10, è pari a 13.777 kWh elettrici. Il calcolo della produzione fotovoltaica segue le indicazioni della UNI/TS 11300 parte 4, che riguarda l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili per la determinazione dei fabbisogni di energia primaria negli edifici.

◆ Solare termico

L'intervento di riqualificazione ha previsto anche l'installazione di un impianto solare termico costituito da 16 collettori solari della Viessmann, ciascuno con una superficie lorda pari a 2,51 m². L'impianto, anch'esso installato sulla copertura dell'edificio, è visibile a destra in **Figura 4.9** ed è destinato al preriscaldamento dell'acqua calda sanitaria. Secondo la relazione tecnica, l'impianto solare termico è in grado di produrre annualmente circa 9.809 kWh termici, coprendo l'11,3% del fabbisogno totale di energia primaria in uscita dalla generazione per l'ACS. Poiché non sono stati installati contatori di energia termica dedicati all'impianto solare, non è stato possibile misurare l'effettiva producibilità dei collettori solari. Pertanto, si farà riferimento alla producibilità stimata in fase di progetto, come riportato nella relazione tecnica.

Infine, i consumi elettrici annuali associati al funzionamento dell'impianto (pompe di circolazione e ausiliari) sono pari a 590 kWh.

4.2 Caso studio 2: condominio Arancione

Il condominio Arancione, edificato nel 1966, si sviluppa su cinque piani fuori terra ed è stato interessato da un intervento di riqualificazione energetica condominiale, comprendente sia opere edili sia opere impiantistiche. L'intervento ha riguardato:

- l'isolamento termico del solo sottotetto;
- la sostituzione del generatore termico con un sistema ibrido composto da un generatore di calore modulare a condensazione e da una pompa di calore ad alta efficienza.

In conformità al DM 26/06/2015, l'intervento è stato classificato come riqualificazione energetica e non come ristrutturazione importante di secondo livello, in quanto non è stato effettuato né un isolamento su più del 25% della superficie disperdente lorda, né un rinnovo complessivo del sistema di climatizzazione invernale (distribuzione, emissione e regolazione). Infatti, anche in questo caso i terminali di emissione preesistenti sono stati mantenuti, senza alcuna sostituzione o modifica.

L'edificio è costituito complessivamente da 19 unità immobiliari, di cui:

- 18 unità a destinazione residenziale, categoria E.1 (1), ai sensi del DPR 412 del 1993, ossia abitazioni adibite a residenza con carattere continuativo, quali abitazioni civili e rurali;
- 1 unità con destinazione d'uso E.2, relativa a edifici adibiti a uffici e assimilabili.

Le principali caratteristiche geometriche dell'edificio sono:

- Volume lordo riscaldato: 9.039,13 m³;
- Superficie utile riscaldata: 2.517,64 m²;
- Superficie lorda disperdente: 3.745,05 m².

La rappresentazione digitale del modello dell'edificio è riportata in **Figura 4.10**. Inoltre, in **Figura 4.11** è riportata la pianta del primo piano con le disposizioni dei quattro appartamenti.

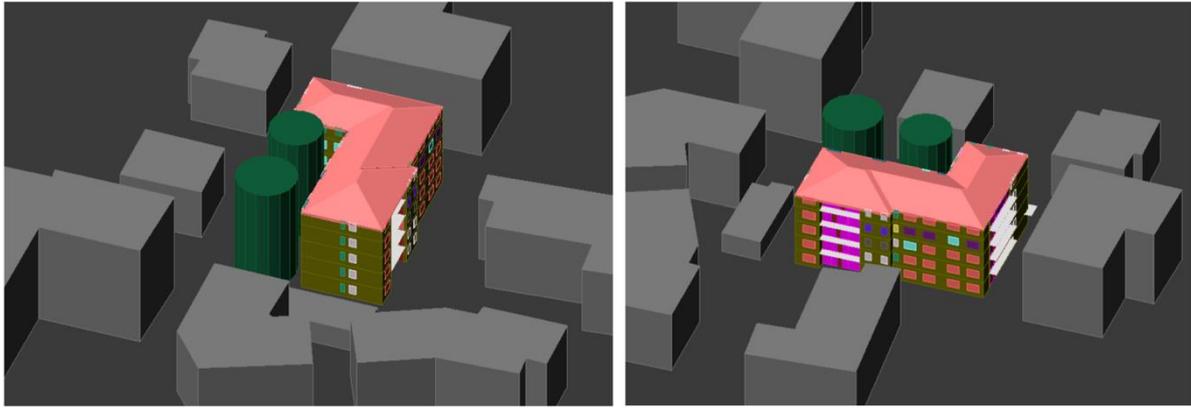


Figura 4.10 - Modello 3D del condominio Arancione realizzato con il software Edilclima EC700, a sinistra è visibile la vista assometrica SE, a destra quella NE.

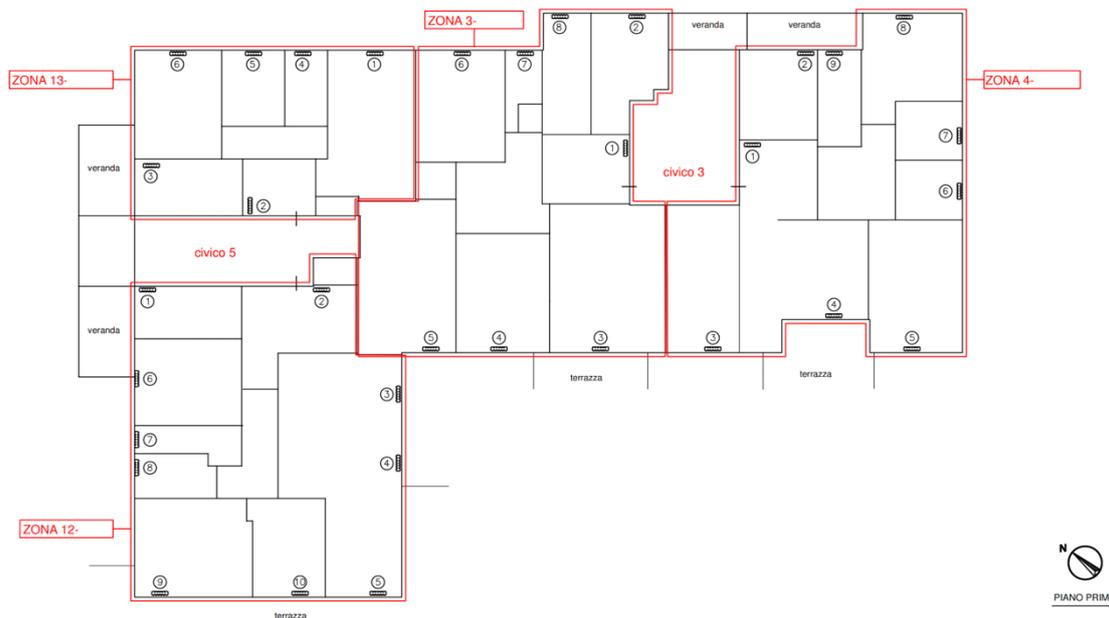


Figura 4.11 - Pianta del primo piano del condominio Arancione.

4.2.1 Caratterizzazione dell'involucro edilizio: confronto tra lo stato di fatto e lo stato riqualificato

Nel condominio Arancione gli interventi di miglioramento dell'isolamento termico sono stati limitati e hanno interessato esclusivamente una parte dell'involucro edilizio e dei componenti finestrati. Non sono stati eseguiti interventi di coibentazione sulle pareti verticali perimetrali né sui pavimenti tra i locali riscaldati. L'unico intervento effettuato ha riguardato l'isolamento del solaio interpiano tra il locale sottotetto, non climatizzato, e i locali climatizzati del piano sottostante, cioè l'ultimo. Questo solaio presenta una superficie disperdente complessiva pari a $580,2 \text{ m}^2$, e l'interventi di isolamento ha coinvolto il 15,51% della superficie disperdente lorda totale dell'edificio.

Come si può osservare in **Tabella 4.3**, l'intervento ha comportato una sostanziale riduzione della trasmittanza termica del solaio, che è passata dal valore iniziale di $1,582 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ a un valore post-intervento pari a $0,192 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, ottenendo una riduzione pari all'87,9%.

Dispersioni per componente delle strutture opache					
Codice componente	Descrizione componente	Superficie totale [m ²]	Trasmittanza termica pre-retrofit [W/m ² K]	Trasmittanza termica post-retrofit [W/m ² K]	Miglioramento trasmittanza termica [%]
S2	Soffitto verso non climatizzato	580,82	1,582	0,192	87,9

Tabella 4.3 - Miglioramento della trasmittanza termica del soffitto verso l'ambiente non climatizzato.

L'isolamento è stato realizzato mediante la posa di una doppia pannellatura in polistirene estruso (XPS), modello Styrodur 5000 CS, con uno spessore di 8 centimetri ciascuno e una conducibilità termica dichiarata di 0,035 W/(mK), **Figura 4.12**.



Figura 4.12 - Posa della doppia pannellatura in XPS nel sottotetto.

Dal punto di vista energetico, l'intervento ha comportato un miglioramento delle dispersioni termiche complessive attraverso l'isolamento delle strutture opache dell'edificio. Le perdite complessive si sono ridotte passando da un valore di 54,36 kW, rilevato nello stato pre-retrofit, a 44,67 kW dopo l'intervento per i soli componenti opachi. In particolare, il contributo alle dispersioni del solaio del sottotetto, che inizialmente rappresentava il 12,4% delle perdite complessive totali dell'intero involucro edilizio, si è ridotto fino a raggiungere l'1,6% dopo l'isolamento. Dal punto di vista igrometrico, le verifiche di condensa superficiale e interstiziale sono state eseguite in conformità a quanto previsto dal DM 26 giugno del 2015, con esito positivo: infatti, sulla superficie S2, oggetto dell'intervento, non sono stati riscontrati problemi né di condensazione superficiale né di formazione di condensa interstiziale.

Inoltre, è stato realizzato un intervento di sostituzione di 14 elementi finestrati appartenenti all'involucro edilizio. I nuovi serramenti installati sono caratterizzati da triplo vetro, con valori di trasmittanza termica compresi tra 1,1 e 0,97 W/m² K. L'intervento ha comportato una riduzione delle dispersioni termiche attribuibili alle superfici vetrate, passando da un valore complessivo pre-retrofit di 31,21 kW a un valore post-retrofit pari a 28,79 kW. Il miglioramento ottenuto è risultato contenuto poiché i serramenti sostituiti possiedono superfici disperdenti di

dimensioni ridotte rispetto alle altre e la sostituzione ha coinvolto solo 3 unità immobiliare sulle 19 totali.

L'effetto combinato dell'isolamento dei componenti opachi e della sostituzione degli elementi finestrati ha permesso di ridurre in maniera significativa le perdite complessive per trasmissione attraverso l'involucro: queste sono passate da 92,8 kW nello stato pre-intervento a 80,67 kW dopo l'intervento, con una riduzione pari al 17,01 %, confermando l'efficacia dell'intervento.

4.2.2 Caratterizzazione delle soluzioni impiantistiche: confronto tra lo stato di fatto e lo stato riqualificato

Prima degli interventi di riqualificazione energetica, l'edificio era dotato di un impianto centralizzato per la produzione combinata di riscaldamento e ACS. Il sistema era costituito da due caldaie tradizionali con bruciatore ad aria soffiata, installate nel 1998, prodotte da Ecoflam, modello Ecomax 14 HT, alimentate a gas metano e caratterizzate da una potenza utile nominale di 154 kW cadauna. Il rendimento utile dei generatori di calore alla potenza nominale era pari all'87%. Il fluido termovettore utilizzato era acqua calda, e lo è tuttora, con una temperatura di mandata variabile in base alla regolazione climatica, impostata fino a un massimo di 85°C, e una differenza di temperatura tra mandata e ritorno pari a 20°C.

In seguito agli interventi di riqualificazione, l'impianto di generazione è stato completamente sostituito con un sistema ibrido certificato, adottando una configurazione analoga a quella realizzata per il condominio Blu. Il nuovo sistema è composto da:

- due generatori di calore modulari a condensazione;
- una pompa di calore aria-acqua per installazione esterna.

Le due caldaie murali a condensazione, identiche tra loro, prodotte da Viessmann, serie Vitodens, modello 200-W, sono alimentate a gas metano. Entrambe le caldaie sono equipaggiate con un bruciatore ad aria soffiata e presentano una potenza utile nominale pari a 90,9 kW, con un rendimento termico utile al 100% della potenza nominale pari al 97,8%.

Rispetto alla situazione pre-retrofit, l'assorbimento elettrico degli ausiliari delle caldaie è diminuito, passando da 505 W a 392 W per ciascuna caldaia, con riferimento al funzionamento a carico nominale. Dal punto di vista della configurazione in centrale, mentre precedentemente il circuito era diretto, dotato di una pompa anticondensa, nella configurazione post-intervento è stato introdotto uno scambiatore di calore con potenza nominale di 300 kW, che separa il circuito primario dei generatori dal circuito secondario dell'impianto di distribuzione per il riscaldamento.

Il sistema è completato da una pompa di calore aria-acqua, anch'essa di marca Viessmann, serie Vitocal 200-A Pro AA-BB 42, installata all'esterno. La pompa di calore, che utilizza energia elettrica come vettore energetico, è in grado di fornire una potenza termica utile in riscaldamento pari a 50,4 kW in condizioni nominali (temperatura della sorgente fredda di 7°C e temperatura della sorgente calda di 35°C), con un COP pari a 4,33. Il funzionamento della pompa di calore è modulante, ovvero la macchina è in grado di adattare la propria potenza in funzione del carico termico richiesto, evitando un funzionamento di tipo on-off.

Per quanto riguarda la regolazione, anche a seguito degli interventi di riqualificazione è stata mantenuta la medesima logica: la regolazione continua con attenuazione notturna continua a prevedere due livelli di controllo: regolazione per singolo ambiente e regolazione climatica centralizzata. Il sistema sarà controllato tramite PLC, che regola l'accensione e lo spegnimento dei generatori, la gestione delle temperature e la compensazione climatica sulla base delle condizioni esterne. Il rendimento del sistema di regolazione nelle condizioni post-retrofit è pari al 98%.

Nella situazione antecedente agli interventi di riqualificazione energetica, i terminali di emissione del calore erano costituiti da radiatori installati sulle pareti esterne non isolate. Dal momento che l'isolamento ha riguardato esclusivamente il solaio del sottotetto e alcuni componenti finestrati, il rendimento di emissione è rimasto pressoché invariato, passando dal 91,0% nella situazione pre-retrofit al 92,3% nello stato post-retrofit. Anche la temperatura di mandata di progetto è stata ridotta: è passata da 85°C a 65°C, mantenendo una temperatura massima di mandata pari a 65°C. È stata inoltre conservata la stessa differenza di temperatura tra mandata e ritorno, pari a $\Delta T = 20^\circ\text{C}$.

Il circuito di distribuzione dell'impianto di riscaldamento è configurato come impianto bitubo con valvole termostatiche, permettendo il controllo indipendente della temperatura interna in ogni ambiente. Come nella configurazione originaria, la distribuzione continua ad avvenire tramite montanti non isolati, correnti in traccia nel lato interno delle pareti esterne. Poiché gli interventi di isolamento dell'involucro sono stati limitati, il rendimento di distribuzione è migliorato solo marginalmente, passando dal 92,0% al 92,6% nello stato post-riqualificazione.

L'intervento ha inoltre portato ad una lieve riduzione dei fabbisogni elettrici degli ausiliari di centrale, con una diminuzione della potenza assorbita da 572 W a 500 W.

In **Figura 4.13** sono riportate tre immagini della centrale termica: a sinistra è visibile lo stato pre-intervento, dove si può osservare nell'immagine superiore la presenza di un accumulo di acqua calda di colore rosso abbinato a uno scambiatore a piastre, mentre a destra è mostrato lo stato post-intervento con le nuove caldaie a condensazione.

In **Figura 4.14** è invece rappresentata la nuova pompa di calore installata all'esterno dell'edificio, dove è visibile, nell'immagine di destra, la barriera acustica di protezione.



Figura 4.13 - Centrale termica: confronto tra stato pre (a sinistra) e post riqualificazione (a destra).



Figura 4.14 - Pompa di calore esterna con barriera acustica (a destra).

All'interno della centrale termica è stato installato un serbatoio di accumulo inerziale di tipo "puffer", a servizio del riscaldamento e della produzione di ACS, e di tutti i generatori di calore, i quali operano in modalità simultanea.

La pompa di calore è configurata per funzionare entro specifici limiti operativi:

- La temperatura di cut-off della sorgente fredda, rappresentata dall'aria esterna, è compresa tra 5°C e 35°C; al di fuori di questo intervallo la macchina si arresta automaticamente per motivi di efficienza e di protezione;
- La temperatura di cut-off della sorgente calda, ovvero dell'acqua di impianto, è compresa tra 18°C e 55°C; qualora il ritorno dal puffer superi i 55°C, la pompa di calore si spegne per mantenere le condizioni operative efficienti.

La regolazione della pompa di calore è stata impostata a temperatura di mandata fissa pari a 45°C, con un salto termico interno al generatore di circa 5°C. Questa scelta progettuale consente

di massimizzare il COP della macchina, favorendo il funzionamento a basse temperature e riducendo i consumi elettrici. Nella configurazione post-intervento, la produzione di ACS è affidata contemporaneamente alle caldaie a condensazione e alla pompa di calore.

Il sistema di produzione di acqua calda sanitaria funziona in modalità continua, con un funzionamento giornaliero di 24 ore, ed è costituito da un preparatore rapido da 300 litri dotato di scambiatore a piastre, con una potenza nominale di 115 kW, in grado di garantire la produzione semi-istantanea di ACS. Inoltre, il sistema solare termico svolge la funzione di preriscaldamento dell'acqua sanitaria attraverso un bollitore dotato di scambiatore fisso a serpentino maggiorato, che precede il preparatore rapido, contribuendo così a ridurre i consumi energetici complessivi grazie allo sfruttamento delle fonti rinnovabili.

◆ **Interventi trainati: installazione di impianti a fonte rinnovabile**

Tra gli interventi trainati realizzati, rientrano l'installazione di un impianto fotovoltaico composto da 52 moduli, destinato a supportare il fabbisogno energetico del sistema ibrido, e l'installazione di un impianto solare termico costituito da 12 collettori solari, dedicati al preriscaldamento dell'acqua calda sanitaria. Infatti, come definito precedentemente, è stato installato un bollitore che precede il preparatore rapido, di capacità pari a 500 litri, prodotto dalla ditta Pacetti.

La temperatura di erogazione dell'acqua calda sanitaria è impostata a 40°C, con un rendimento di erogazione pari al 100%. La temperatura media dell'accumulo, in conformità con le ipotesi assunte dalla norma UNI/TS 11300 parte 2, è fissata a 60°C.

◆ **Solare fotovoltaico**

L'impianto fotovoltaico installato sulla copertura dell'edificio è suddiviso in due sottocampi:

- sottocampo sud-ovest, composto da 26 moduli con una potenza di picco complessiva pari a 10.010 Wp e producibilità annua di 10.399 kWh;
- sottocampo sud-est, costituito anch'esso da 26 moduli con la medesima potenza di picco pari a 10.010 Wp e producibilità dei pannelli pari 10.399 kWh.

Ogni modulo fotovoltaico presenta una potenza di picco pari a 385 Wp. L'impianto fotovoltaico è destinato a coprire i seguenti servizi energetici dell'edificio:

- climatizzazione invernale;
- climatizzazione estiva;
- produzione di acqua calda sanitaria;
- illuminazione;
- trasporto di persone o cose.

La produzione annua di energia elettrica stimata, come riportato nella relazione tecnica ex Legge 10, è pari a 20.799 kWh.

◆ **Solare termico**

Infine, l'intervento realizzato sul condominio Arancione ha incluso anche l'installazione di un impianto solare termico composto da 12 collettori, ciascuno con una superficie lorda pari a

2,51 m². L'impianto, posizionato sulla copertura dell'edificio, è destinato al preriscaldamento dell'acqua calda sanitaria e risulta visibile in **Figura 4.15**.

In base ai dati riportati nella relazione tecnica, la producibilità annua stimata dell'impianto solare termico è pari a 13.578 kWh termici, corrispondente a una copertura del 23,8% del fabbisogno totale di energia primaria in uscita dalla generazione richiesta per la produzione di ACS. Anche in questo caso, non essendo stati installati contacalorie dedicati al solare termico, non è stato possibile misurarne direttamente la producibilità effettiva.

I consumi elettrici annui associati al funzionamento dell'impianto (principalmente dovuti a pompe di circolazione e dispositivi ausiliari) sono pari a 474 kWh.

In **Figura 4.15** sono riportate le immagini relative ai due impianti a fonte rinnovabile installati in copertura. A sinistra è visibile l'impianto fotovoltaico dalla copertura, mentre a destra sono presenti due fotografie scattate tramite un drone, che consentono di osservare l'intera copertura dell'edificio, mettendo in evidenza sia la disposizione dell'impianto fotovoltaico nei due sottocampi, sia la presenza dell'impianto solare termico.



Figura 4.15 - Vista della copertura con impianto fotovoltaico e impianto solare termico nei due sottocampi.

4.3 Caso studio 3: condominio Verde

Il condominio Verde, realizzato nel 1963, si sviluppa su quattro piani fuori terra ed è stato interessato da un intervento di ristrutturazione importante di secondo livello, incentrato esclusivamente su opere di tipo edilizio. In particolare, gli interventi hanno riguardato

l'isolamento termico delle pareti perimetrali opache, della copertura inclinata e la parziale sostituzione dei serramenti esistenti a uso condominiale.

La verifica dei requisiti prestazionali di trasmittanza termica è stata circoscritta esclusivamente alle porzioni dell'involucro edilizio oggetto di intervento.

L'edificio è composto da un totale di 12 unità immobiliari, tutte adibite a uso residenziale continuo e rientranti nella categoria E.1(1), ai sensi del DPR 412/1993. In **Figura 4.16** è rappresentato il modello tridimensionale dell'edificio sviluppato con Edilclima: a sinistra è visibile l'assonometria con vista sud-est, mentre a destra è mostrata la prospettiva nord-ovest.

Dal punto di vista geometrico, l'edificio presenta:

- un volume lordo riscaldato pari a 3.451,56 m³;
- una superficie utile riscaldata di 898,27 m²;
- una superficie lorda disperdente pari a 1.936,89 m².

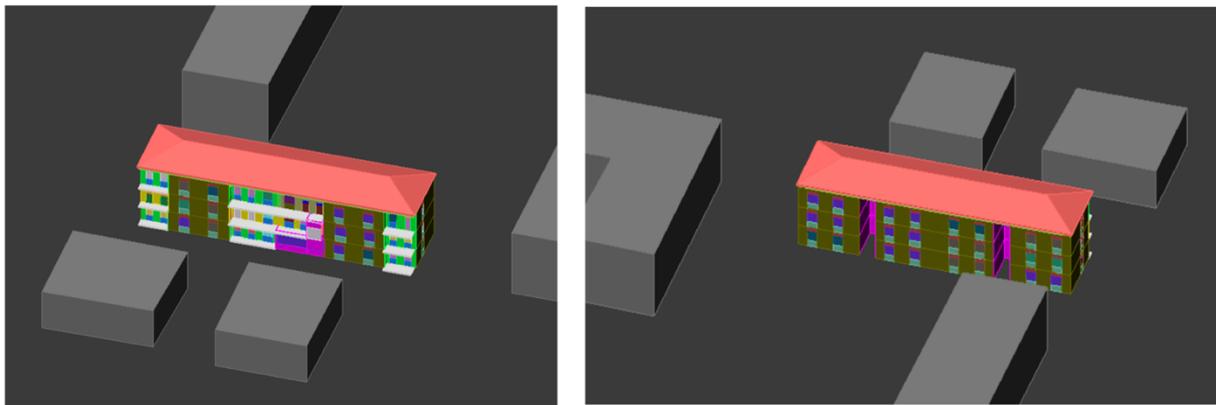


Figura 4.16 - Modello 3D del condominio Verde in ambiente Edilclima.

4.3.1 Caratterizzazione dell'involucro edilizio: confronto tra lo stato di fatto e lo stato riqualificato

Il principale intervento effettuato sull'involucro edilizio del condominio Verde ha riguardato la parete esterna identificata con il codice M1, la quale presenta una superficie disperdente pari a 517,03 m². Prima della riqualificazione, la parete era costituita da una muratura in laterizio dello spessore di 27 cm, rivestita su entrambi i lati da uno strato di intonaco di calce e sabbia dello spessore di 1,5 cm. La stratigrafia esistente risultava caratterizzata da una trasmittanza termica elevata, pari a 1,042 W/m²K.

Per migliorare le prestazioni energetiche dell'involucro opaco, si è deciso di intervenire mediante l'applicazione di un isolamento termico esterno realizzato con pannelli in EPS dello spessore di 16 cm, aventi una conducibilità termica dichiarata pari a 0,036 W/mK. A seguito dell'intervento, la trasmittanza termica della parete si è ridotta fino a raggiungere un valore di 0,184 W/m²K, con una diminuzione dell'82,3% rispetto alla condizione pre-retrofit.

Come riportato in **Tabella 4.4**, sono stati eseguiti ulteriori interventi di isolamento su altri componenti dell'involucro edilizio, ma per semplicità vengono riportati esclusivamente quelli che incidono in modo significativo sulla superficie disperdente complessiva.

Un altro componente rilevante oggetto di intervento è la copertura inclinata (codice S4), la cui stratigrafia originale era composta, procedendo dall'interno verso l'esterno, da uno strato di intonaco di gesso e sabbia, una soletta in laterizio dello spessore di 16 cm, uno strato di calcestruzzo di sabbia e ghiaia e infine una copertura in tegole di argilla. La trasmittanza termica iniziale era pari a 2,157 W/m²K. Durante l'intervento, tra lo strato in calcestruzzo e le tegole è stato posato un isolante costituito da due strati sovrapposti di pannelli smartroof top, per uno spessore totale pari a 18 cm e avente conducibilità termica pari a 0,038 W/mK. Sopra l'isolante sono stati inoltre inseriti dei pannelli di legno di truciolo pressato, con funzione protettiva per evitare l'appoggio diretto delle tegole sull'isolante, che altrimenti potrebbe danneggiarsi sotto l'azione di carichi puntuali. A seguito di tali interventi, la trasmittanza termica della copertura si è ridotta fino a 0,183 W/m²K.

Le tegole utilizzate sono del tipo tradizionale in argilla, in quanto la copertura delimita un sottotetto non climatizzato: di conseguenza, l'adozione di materiali ad alta riflettanza solare non avrebbe portato benefici significativi. Non si è pertanto resa necessaria l'introduzione di tecnologie di climatizzazione passiva.

In **Tabella 4.4** si evidenzia come, nel calcolo delle superfici disperdenti, siano escluse quelle porzioni dell'involucro che non delimitano ambienti riscaldati e che quindi non concorrono alle dispersioni termiche dell'edificio.

Dispersioni per componente delle strutture opache e trasparenti					
Codice componente	Descrizione componente	Superficie totale [m ²]	Trasmittanza termica pre-retrofit [W/m ² K]	Trasmittanza termica post-retrofit [W/m ² K]	Miglioramento trasmittanza termica [%]
M1	Parete esterna	517,03	1,042	0,184	82,3
M6	Cassonetto M1	35,60	1,130	0,187	83,5
M8	Sottofinestra	52,69	1,408	0,198	85,9
M10	Muro sottotetto	/	1,042	0,184	82,3
M11	Muro su terrazza isolato Alloggio 5	16,37	1,042	0,189	81,9
M12	Cassonetto M11	2,50	1,130	0,191	83,1
M13	Sottofinestra su M11	1,32	1,408	0,198	85,9
S4	Copertura isolata	/	2,157	0,183	91,5
W_	Componenti finestrate	104,02	4,500	1,200	73,3

Tabella 4.4 - Miglioramento della trasmittanza termica dei componenti opachi e trasparenti

La maggior parte delle superfici finestrate dell'edificio sono state oggetto di intervento: in totale, sono stati sostituiti 32 elementi, per una superficie complessiva pari a 104,02 m². Nella configurazione pre-retrofit, i serramenti erano caratterizzati da un singolo vetro dello spessore di 4 mm e da una trasmittanza termica complessiva, inclusiva del telaio, pari a 4,5 W/m²K. A seguito dell'intervento, tali elementi sono stati rimpiazzati con infissi dotati di doppi vetri da 4 mm ciascuno con intercapedine d'aria e una trasmittanza termica totale, vetro più telaio, pari a 1,2 W/m²K. Questo ha comportato una riduzione della trasmittanza del 73,3%, migliorando sensibilmente le prestazioni dei componenti trasparenti.

Complessivamente, sono stati isolati 729,53 m² di superficie disperdente, pari al 37,67% della superficie disperdente totale dell'intero involucro edilizio comprensiva sia dei componenti opachi che trasparenti.

L'effetto combinato dell'isolamento dei componenti opachi e della sostituzione degli elementi finestrati ha permesso di ridurre in maniera significativa le perdite complessive per trasmissione attraverso l'involucro: queste sono passate da 52,12 kW nello stato pre-intervento a 24,30 kW dopo l'intervento, con una riduzione pari al 53,38%, confermando l'efficacia dell'intervento.

Le **Figure 4.17** e **4.18** mostrano i cambiamenti apportati alle facciate del condominio Verde a seguito degli interventi di riqualificazione energetica, inquadrati da due differenti prospettive e orientamenti. In entrambe le figure, l'immagine a sinistra rappresenta lo stato dell'edificio prima della riqualificazione, mentre quella a destra evidenzia la situazione dopo l'intervento, nella quale è evidente il cappotto termico.



Figura 4.17 - Vista della facciata nord dell'edificio: a sinistra lo stato pre-retrofit, a destra lo stato post-retrofit rispetto all'angolo nord-ovest.



Figura 4.18 - Vista della facciata laterale con orientamento a ovest

Nelle successive **Figure 4.19** e **4.20** è possibile osservare il cambiamento della facciata esposta a sud dell'edificio, confrontando lo stato pre-retrofit (**Figura 4.19**) con quello post-intervento (**Figura 4.20**).



Figura 4.19 - Vista della facciata sud del condominio prima degli interventi di riqualificazione



Figura 4.20 - Vista della facciata sud del condominio dopo gli interventi di riqualificazione

4.3.2 Caratterizzazione delle soluzioni impiantistiche: confronto tra lo stato di fatto e lo stato riqualificato

Alle soluzioni impiantistiche del condominio Verde, non è stato previsto nessun intervento migliorativo in fase di riqualificazione energetica. Pertanto, in questa sezione viene riportata un'analisi della configurazione generale degli impianti, con particolare attenzione ai principali sottosistemi. Il riscaldamento degli ambienti è garantito da due generatori termici a condensazione, installati in cascata e alimentati a gas metano, entrambi installati nel 2016. Le caldaie sono della Buderus, modello Logamax Plus GB 162, dotate di bruciatore atmosferico. La prima caldaia presenta una potenza utile nominale pari a 46,5 kW con un rendimento del 97,4% a carico nominale, mentre la seconda possiede una potenza utile di 62,6 kW con lo stesso rendimento termico. Gli ausiliari elettrici a potenza nominale assorbono complessivamente 612 W.

Il circuito di generazione è collegato al circuito di distribuzione tramite uno scambiatore di calore a piastre, con potenza nominale di 118 kW. I terminali di emissione del calore sono costituiti da radiatori installati sulle pareti esterne isolate; la temperatura di mandata di progetto è pari a 70°C, e il rendimento di emissione è pari al 96%.

La regolazione del sistema avviene, come per i due condomini analizzati precedentemente, tramite centralina PLC per la modulazione della temperatura di mandata secondo la logica di compensazione climatica. Ogni unità abitativa è inoltre dotata di valvole termostatiche su ciascun corpo scaldante, per la gestione personalizzata del comfort interno. Il rendimento complessivo del sistema di regolazione è pari al 98%. A differenza degli altri due edifici

analizzati, in questo caso la regolazione è di tipo intermittente con due livelli di programmazione della temperatura nelle 24 ore.

Il circuito di distribuzione del fluido termovettore è realizzato secondo una configurazione bitubo, con colonne montanti verticali in acciaio non isolate, posate in traccia lungo il lato interno delle pareti esterne isolate nello stato riqualificato. Gli stacchi verso i radiatori avvengono direttamente dalle colonne montanti.

La produzione di acqua calda sanitaria non è centralizzata: ciascuna unità immobiliare è dotata di un proprio sistema autonomo costituito da scaldacqua a gas metano. Siccome i consumi di ACS sono indipendenti dalle caratteristiche dell'involucro edilizio, e non sono stati eseguiti interventi sulla centrale termica, vengono esclusi dai calcoli dei risparmi energetici i consumi di ACS, in quanto le valutazioni delle prestazioni energetiche dell'edificio per il servizio ACS rimangono invariate.

In **Figura 4.21** è riportata un'immagine della centrale termica nello stato attuale, che risulta invariato rispetto alla configurazione pre-retrofit. Sono visibili le due caldaie a condensazione, disposte in cascata.



Figura 4.21 - Centrale termica per il riscaldamento centralizzato del condominio Verde

5. RISULTATI

5.1 Analisi energetica dello stato di fatto

5.1.1 Determinazione dei consumi energetici per il riscaldamento degli ambienti e per la produzione di ACS pre-retrofit.

In questo paragrafo vengono presentati e analizzati i dati di consumo energetico di gas metano rilevati prima della realizzazione degli interventi di riqualificazione energetica. I dati si riferiscono ad annualità consecutive, comprese tra ottobre 2015 e dicembre 2021 a seconda dell'edificio considerato. L'analisi dei consumi pre-retrofit è fondamentale per costruire un confronto consistente rispetto ai consumi post-intervento, in modo da valutare l'efficacia delle soluzioni adottate.

Le letture dei contatori, disponibili su base casuale, sono state elaborate utilizzando due diversi metodi di interpolazione, quello lineare e mediante spline cubica, in modo da ottenere i consumi mensili. Per ciascun metodo sono stati calcolati i consumi energetici mensili, al fine di valutarne le differenze. Entrambi i metodi si sono dimostrati validi e hanno restituito risultati coerenti con l'andamento crescente dei dati misurati, inoltre, si è osservato che le differenze tra i due modelli, in termini di stima dei consumi, risultano trascurabili.

Poiché non sono disponibili i valori reali di consumo mensile precisi al mese, il confronto tra i due modelli di interpolazione è stato effettuato valutando lo scostamento tra le stime prodotte da ciascun metodo. Sono state calcolate alcune metriche di confronto (MAE, MAPE e ACC) tra i consumi mensili stimati dai due modelli, al fine di verificare se le differenze tra le due ricostruzioni fossero significative.

Inizialmente, è stato calcolato il MAE (*Errore Medio Assoluto*), una misura che indica in media quanto i valori stimati dai due modelli si allontanano tra loro, senza considerare se l'errore è positivo o negativo, in modo da evitare che gli errori si annullino l'uno con l'altro. Tuttavia, essendo un valore assoluto, il MAE non tiene conto della magnitudo della variabile misurata. Nel nostro caso, il MAE tra i due modelli è risultato pari a $41,3 \text{ Nm}^3$, che, se confrontato con un consumo medio mensile di circa 1.600 Nm^3 , rappresenta un errore molto contenuto.

Per una valutazione più robusta, si utilizza il MAPE (*Errore Percentuale Medio Assoluto*), una metrica che consente un confronto diretto tra modelli diversi ed è meno influenzata dai valori anomali rispetto ad altri indicatori in quanto media l'effetto. Tuttavia, presenta alcune limitazioni: tende a favorire le sottostime e non è definito quando il valore misurato è pari a zero. Il valore del MAPE calcolato tra i due modelli di interpolazione è risultato pari al 3,57%, da cui deriva un'Accuratezza complessiva del 96,43% secondo la relazione $ACC = 1 - MAPE$. Questo risultato evidenzia un'elevatissima coerenza tra le stime ottenute con l'interpolazione lineare e quelle con la spline cubica.

Pertanto, dall'analisi delle principali metriche, si può affermare che l'utilizzo dell'uno o dell'altro metodo di interpolazione non comporterebbe differenze significative nei risultati finali, rendendo l'interpolazione lineare la scelta utilizzata per l'analisi grazie alla sua

semplicità e alla sua consistenza con la natura del dataset, caratterizzato da un set di dati limitato.

Durante l'analisi dei consumi è emersa la difficoltà riguardante la ripartizione precisa dei consumi tra riscaldamento (RSC) e acqua calda sanitaria (ACS). Prima degli interventi di riqualificazione nel condominio Blu, infatti, non erano presenti sistemi di contabilizzazione separata, e i consumi di gas metano venivano rilevati come dato aggregato, comprendente entrambe le utenze. Questo ha reso necessaria una stima indiretta dei consumi distinti, introducendo una possibile fonte di incertezza.

Dopo un'analisi preliminare, si è scelto di non stimare il consumo di ACS nei mesi invernali attraverso l'approccio previsto dalla norma UNI/TS 11300-2, che assume consumi costanti di ACS durante l'intero anno, indipendentemente dal mese, poiché tale approccio non rispecchia le variazioni stagionali reali. Poiché l'obiettivo dell'analisi è quello di ottenere una stima più realistica dei consumi mensili di ACS, si è deciso di non adottare una semplice distribuzione costante dei consumi su base annua, ottenuta dalla media dei mesi estivi e spalmata su tutti i mesi dell'anno. Una tale semplificazione, anche se spesso utilizzata, non tiene conto delle effettive variazioni stagionali del fabbisogno di ACS, che risulta normalmente più elevato nei mesi invernali a causa della temperatura più bassa dell'acqua in ingresso e delle dispersioni termiche maggiori. Inizialmente si era pensato di utilizzare la ripartizione post-retrofit di cui si conoscono i consumi mensili di ACS, ma siccome è stato installato un impianto solare termico che, soprattutto nei mesi estivi, contribuisce significativamente alla copertura del fabbisogno di ACS; rende non coerente il confronto con la situazione pre-retrofit, in cui il solare termico era assente.

Per questa ragione, è stata adottata una metodologia mista: per i mesi estivi da maggio a settembre, i consumi di ACS sono stati assunti pari ai valori reali misurati dai contatori, per i restanti mesi dell'anno, è stata fatta una stima basata su un profilo mensile di utilizzo dell'ACS.

Si è quindi deciso di optare su un profilo stagionale di consumo dell'ACS, preso da un articolo in letteratura ^[38] in cui sono stati analizzati i consumi di acqua calda sanitaria di diversi edifici condominiali con le stesse tipologie impiantistiche, fornendo un modello molto più rappresentativo dell'andamento reale. Questo profilo, sulla base dei consumi noti nel periodo estivo, è stato utilizzato per valutare la ripartizione tra ACS e riscaldamento prima della realizzazione degli interventi, in cui era disponibile un solo dato aggregato per ogni mese. Nei mesi da maggio a settembre, in cui l'impianto di riscaldamento è spento, sono stati utilizzati i consumi misurati, esclusivamente attribuibili all'ACS. Nei mesi restanti si è applicato un fattore correttivo basato su profili normalizzati di consumo stagionali partendo dai valori misurati dei consumi estivi di ACS.

Infine, per stimare la componente di consumo attribuibile al riscaldamento, è stata eseguita una semplice differenza tra il consumo totale mensile e il corrispondente consumo di ACS stimato per lo stesso mese.

I consumi di gas metano sono stati espressi in Nm³, riferendosi alle condizioni di temperatura e pressione di 0°C e 1 atm, in conformità con quanto previsto dalla normativa UNI/TS 11300 e quindi con i valori riportati nella relazione tecnica. L'adozione di questa unità di misura consente un confronto consistente tra i dati reali e quelli di progetto.

Di seguito sono riportati i consumi reali di gas metano misurati per i diversi condomini, relativi ai periodi compresi tra ottobre 2015 e dicembre 2021. La disponibilità dei dati varia in

funzione del condominio: per il condominio Blu sono disponibili due anni di misura, per il condominio Arancione tre anni, mentre per il condominio Verde cinque anni. I consumi sono stati opportunamente suddivisi tra quelli destinati al riscaldamento e quelli relativi alla produzione di acqua calda sanitaria, includendo anche la ripartizione percentuale mensile rispetto al totale annuo.

Al fine di garantire una rappresentazione più chiara e meno dispersiva, di seguito nelle **Tabelle 5.1, 5.2 e 5.3** viene riportato, per ciascun condominio, un anno rappresentativo dei consumi mensili del periodo pre-retrofit, coerente con i consumi energetici medi e corrispondente all'anno che va da ottobre 2016 a settembre 2017, correttamente interpolati linearmente. Sotto ciascuna delle tabelle è riportato il confronto tra i consumi reali pre-intervento e l'andamento della temperatura media esterna mensile, corrispondente allo stesso condominio e per tutti gli anni a disposizione (**Figure 5.1, 5.2 e 5.3**). Dall'analisi si osserva come, al crescere della temperatura esterna, i consumi di gas naturale totali tendano a diminuire, evidenziando la correlazione tra fabbisogno energetico e condizioni climatiche. Si precisa tuttavia che per la creazione del modello di baseline sono stati utilizzati i consumi pre-retrofit di diversi anni, che vengono riportati sinteticamente nelle tabelle successive (**Tabella 5.4, 5.5 e 5.6**).

Anno di riferimento 2016-2017 - Condominio Blu				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	1.548	972	2.520	6,4
Novembre	3.416	1.094	4.510	11,4
Dicembre	5.157	1.155	6.312	15,9
Gennaio	7.838	1.216	9.054	22,9
Febbraio	4.951	1.155	6.106	15,4
Marzo	2.976	1.135	4.111	10,4
Aprile	1.601	1.054	2.655	6,7
Maggio	0	972	972	2,5
Giugno	0	851	851	2,2
Luglio	0	811	811	2,0
Agosto	0	745	745	1,9
Settembre	0	928	928	2,3
Totale anno	27.486	12.089	39.575	100

Tabella 5.1 - Consumi mensili di gas metano nel periodo pre-retrofit per il condominio Blu suddivisi tra RSC e ACS.

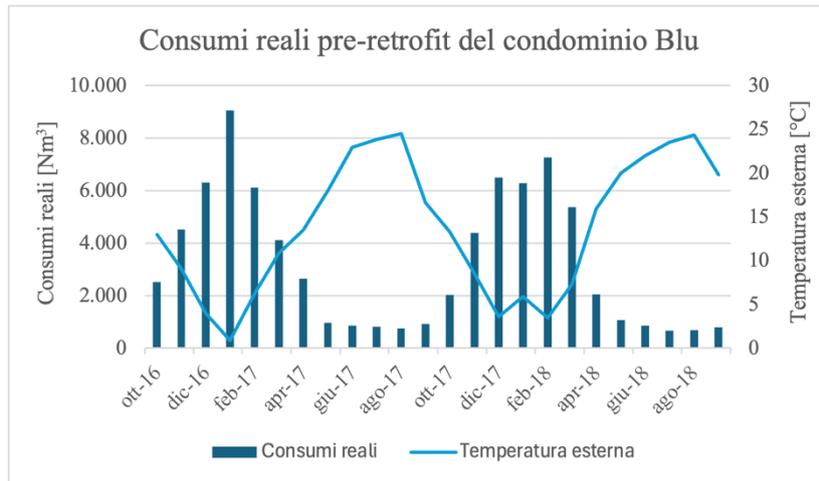


Figura 5.1 - Confronto consumi reali pre-retrofit e temperatura esterna per il condominio Blu.

Anno di riferimento 2016-2017 - Condominio Arancione				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	1.325	1.060	2.385	7,3
Novembre	2.730	1.193	3.923	11,9
Dicembre	4.240	1.259	5.499	16,7
Gennaio	5.323	1.325	6.648	20,2
Febbraio	3.467	1.259	4.726	14,4
Marzo	2.317	1.237	3.554	10,8
Aprile	1.035	1.148	2.183	6,6
Maggio	0	883	883	2,7
Giugno	0	822	822	2,5
Luglio	0	787	787	2,4
Agosto	0	795	795	2,4
Settembre	0	659	659	2,0
Totale anno	20.437	12.427	32.864	100

Tabella 5.2 - Consumi mensili di gas metano nel periodo pre-retrofit per il condominio Arancione suddivisi tra RSC e ACS.

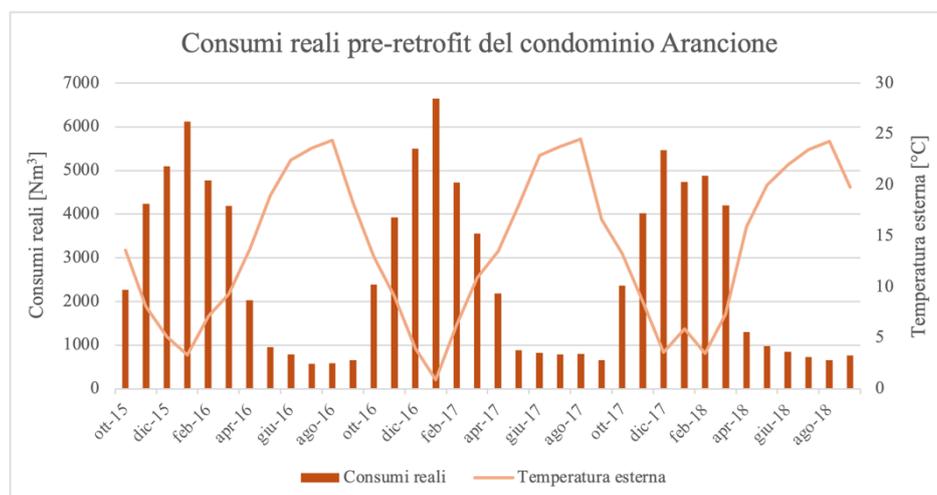


Figura 5.2 - Confronto consumi reali pre-retrofit e temperatura esterna per il condominio Arancione.

Anno di riferimento 2016-2017 - Condominio Verde				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	654	/	654	7,2
Novembre	1.135	/	1.135	12,4
Dicembre	1.954	/	1.954	21,4
Gennaio	2.330	/	2.330	25,5
Febbraio	1.607	/	1.607	17,6
Marzo	966	/	966	10,6
Aprile	489	/	489	5,4
Maggio	0	/	0	0,0
Giugno	0	/	0	0
Luglio	0	/	0	0
Agosto	0	/	0	0
Settembre	0	/	0	0
Totale anno	9.135	/	9.135	100

Tabella 5.3 - Consumi mensili di gas metano nel periodo pre-retrofit per il condominio Verde suddivisi tra RSC e ACS.

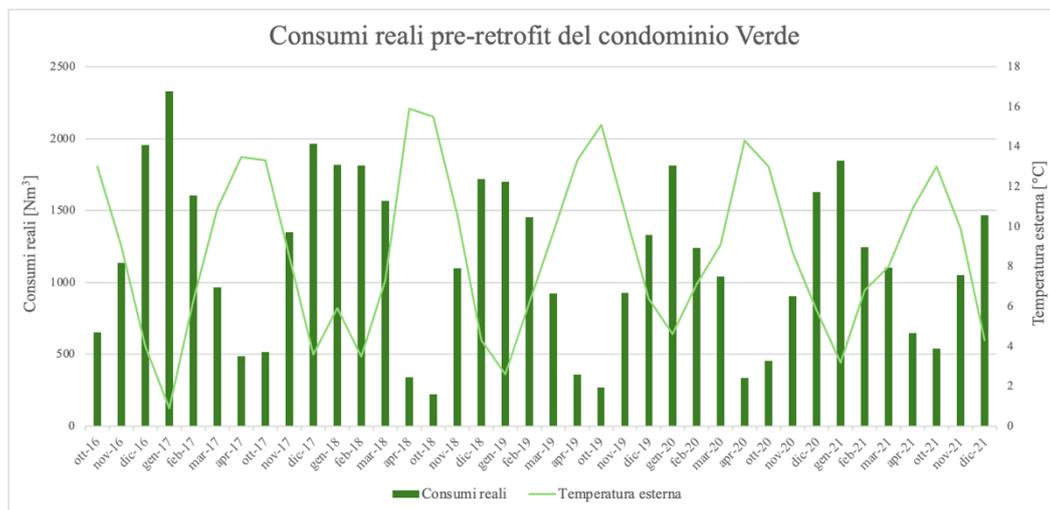


Figura 5.3 - Confronto consumi reali pre-retrofit e temperatura esterna per il condominio Verde.

Di seguito sono riportati i riassunti dei consumi annuali di gas metano disponibili, relativi ai periodi pre-retrofit per ciascun condominio, distinti tra quota destinata al riscaldamento e quella per la produzione di acqua calda sanitaria. A seguire, vengono presentati anche i consumi normalizzati rispetto ai GG annuali, in modo da considerare l'influenza delle condizioni climatiche sull'energia richiesta per il riscaldamento.

In particolare, oltre alla normalizzazione mensile che verrà discussa in seguito, è stata eseguita per maggiore completezza, anche una normalizzazione su base annuale, in modo da ottenere un'ulteriore valutazione efficace della variazione del comportamento energetico dell'edificio indipendentemente dalle condizioni esterne.

Per quanto riguarda il condominio Blu (**Tabella 5.4**), sono disponibili due anni di dati pre-retrofit: da ottobre 2016 a settembre 2018. I consumi normalizzati risultano omogenei e tra loro confrontabili, indicando un consumo costante nel tempo e mediamente pari a 38.802 Nm³ in condizioni climatiche standard. Inoltre, confrontando questi dati con i valori di fabbisogno energetico ottenuti dal modello di simulazione di Edilclima pre-retrofit necessario per la

redazione dell'APE convenzionale, si osserva una buona coerenza, infatti, Edilclima stima i consumi pre-retrofit a 39.202 Nm³, dividendo tra riscaldamento (29.378 Nm³) e produzione di ACS (9.824 Nm³). Si può osservare dalla **Tabella 5.4** come questi valori risultano consistenti rispetto ai valori reali; l'unica differenza riguarda la leggera sottostima da parte di Edilclima e quindi della normativa UNI/TS 11300 parte 2 della produzione di ACS.

Per il condominio Arancione (**Tabella 5.5**), i dati disponibili del periodo pre-retrofit coprono tre anni consecutivi, da ottobre 2015 a settembre 2018. Anche in questo caso, la normalizzazione dei consumi consente di evidenziare una buona coerenza tra i tre anni, con variazioni contenute che indicano un comportamento regolare con un consumo annuale medio normalizzato pari a 31.987 Nm³. Anche in questo caso, i consumi normalizzati risultano molto vicini ai valori forniti dal modello Edilclima, infatti i consumi pre-retrofit vengono stimati a 32.184 Nm³, dividendo tra riscaldamento (24.765 Nm³) e produzione di ACS (7.419 Nm³). Si ripresenta una leggera discrepanza della produzione di ACS rispetto a quella reale dovuta di nuovo, alla sottostima da parte della norma UNI/TS 11300 parte 2.

Infine, il condominio Verde dispone di un periodo di misura più esteso, pari a cinque anni: da ottobre 2016 a settembre 2021 (**Tabella 5.6**). Dall'analisi dei consumi normalizzati emerge una discontinuità nel comportamento energetico: nei primi due anni, da ottobre 2016 a settembre 2018, i consumi si attestano attorno ai 9.200 Nm³, mentre nei tre anni successivi risultano inferiori, intorno ai 7.800 Nm³. Questa variazione suggerisce un possibile cambiamento nelle condizioni di utilizzo dell'impianto o nelle regolazioni da parte degli occupanti a partire dalla stagione di riscaldamento 2018-2019. Nonostante tale differenza i valori rimangono comunque all'interno di un intervallo di confronto accettabile. Infatti, anche per questo edificio, i consumi pre-intervento risultano abbastanza confrontabili con quelli ottenuti dal modello Edilclima e risultano pari a 9.022 Nm³. Considerando anche la normalizzazione rispetto ai m² di superficie utile riscaldata, i risultati per il condominio Blu, Arancione e Verde sono rispettivamente 10,37, 12,7 e 9,36 Nm³/m², evidenziando come quello Arancione sia quello che determini maggiori consumi energetici specifici per m².

Anno di riferimento	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Consumi totali normalizzati [Nm ³]
2016-2017	27.486	12.089	39.575	40.266
2017-2018	26.657	11.297	37.954	37.337
Media totale	27.071	11.693	38.764	38.802

Tabella 5.4 - Consumi annuali normalizzati del condominio Blu (ottobre 2016 - settembre 2018).

Anno di riferimento	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Consumi totali normalizzati [Nm ³]
2015-2016	21.123	11.143	32.266	32.893
2016-2017	20.437	12.427	32.864	33.378
2017-2018	19.127	11.006	30.955	29.691
Media totale	19.782	11.717	32.028	31.987

Tabella 5.5 - Consumi annuali normalizzati del condominio Arancione (ottobre 2015 - settembre 2018).

Anno di riferimento	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Consumi totali normalizzati [Nm ³]
2016-2017	9.135	/	9.135	9.365
2017-2018	9.369	/	9.369	9.152
2018-2019	7.484	/	7.484	7.852
2019-2020	6.961	/	6.961	7.823
2020-2021	7.829	/	7.829	7.839
Media totale	8.156	/	8.156	8.406

Tabella 5.6 - Consumi annuali normalizzati del condominio Verde (ottobre 2016 - settembre 2021).

5.2 Analisi energetica dello stato di progetto

5.2.1 Determinazione dei fabbisogni energetici per il riscaldamento degli ambienti e per la produzione di ACS post-retrofit mediante Edilclima.

In questa sezione verranno analizzati i fabbisogni dei principali vettori energetici suddivisi per generatore, stimati attraverso il software Edilclima in fase di progetto, conformemente alla metodologia della norma UNI/TS 11300 parte 1-2-4 e 5. Per ciascun condominio, sono state distinte le diverse fonti di energia in ingresso ai sistemi impiantistici, al fine di consentire un successivo confronto con i consumi reali rilevati nel periodo 2023-2024, sia per il servizio di riscaldamento sia per quello di produzione di acqua calda sanitaria.

Nel caso del condominio Blu, dotato di impianto ibrido costituito da una pompa di calore e due caldaie a condensazione, vengono riportati in **Tabella 5.7** e **5.8** i fabbisogni dei vettori energetici in termini di portata di gas metano in ingresso alle caldaie e di energia elettrica assorbita dalla pompa di calore. La portata totale di gas naturale in ingresso alle caldaie risulta pari a 7.932 Nm³, mentre l'assorbimento di energia elettrica da parte della pompa di calore risulta essere pari a 41.499 kWh_{el}. In fase progettuale, la pompa di calore risulta essere il generatore principale del sistema ibrido con un'elevata operatività durante la stagione di riscaldamento e soprattutto per la produzione di ACS, infatti si può osservare che solamente 180 Nm³ concorrono alla produzione di acqua calda sanitaria. A progetto è stato inoltre previsto che la seconda caldaia installata in cascata non dovrebbe mai entrare in funzione.

Consumi della caldaia di progetto post-retrofit - Condominio Blu				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	0	0	0	0,0
Novembre	795	0	795	10,0
Dicembre	2.242	18	2.260	28,5
Gennaio	2.927	124	3.051	38,5
Febbraio	1.575	38	1.613	20,3
Marzo	213	0	213	2,7
Aprile	0	0	0	0,0
Maggio	0	0	0	0,0
Giugno	0	0	0	0,0
Luglio	0	0	0	0,0
Agosto	0	0	0	0,0
Settembre	0	0	0	0,0
Totale anno	7.752	180	7.932	100

Tabella 5.7 - Consumi di gas metano definiti da progetto post-retrofit.

Consumi elettrici della pompa di calore di progetto post-retrofit - Condominio Blu				
Mese	Consumi per riscaldamento [kWh _{el}]	Consumi per ACS [kWh _{el}]	Energia elettrica PDC [kWh _{el}]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	591	2.151	2.742	6,61
Novembre	3.630	2.460	6.090	14,68
Dicembre	3.584	2.714	6.298	15,18
Gennaio	3.267	2.394	5.661	13,64
Febbraio	3.186	2.368	5.554	13,38
Marzo	3.421	2.458	5.879	14,17
Aprile	408	1.944	2.352	5,67
Maggio	0	1.502	1.502	3,62
Giugno	0	1.230	1.230	2,96
Luglio	0	1.241	1.241	2,99
Agosto	0	1.324	1.324	3,19
Settembre	0	1.626	1.626	3,92
Totale anno	18.087	23.412	41.499	100

Tabella 5.8 - Consumi di energia elettrica definiti da progetto post-retrofit.

Un'analogia configurazione si riscontra nel condominio Arancione, anch'esso dotato di sistema ibrido. Anche in questo caso vengono distinti i fabbisogni per ciascun generatore: la portata annua di gas metano per le caldaie a condensazione è pari a 12.561 Nm³, in configurazione a cascata, e l'energia elettrica richiesta dalla pompa di calore è pari a 30.667 kWh_{el} (*Tabella 5.9* e *5.10*). Come per il condominio Blu, è stato previsto che solo la prima caldaia operi normalmente, mentre la seconda rimanga di riserva. In questa differente configurazione, però, la pompa di calore non viene sfruttata per la produzione di ACS: infatti, gli assorbimenti di energia elettrica per la produzione di ACS sono nulli.

Consumi della caldaia di progetto post-retrofit - Condominio Arancione				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	0	411	411	3,3
Novembre	320	459	779	6,2
Dicembre	2.240	476	2.716	21,6
Gennaio	3.395	477	3.872	30,8
Febbraio	1.848	407	2.255	18,0
Marzo	478	403	881	7,0
Aprile	0	336	336	2,7
Maggio	0	270	270	2,1
Giugno	0	230	230	1,8
Luglio	0	241	241	1,9
Agosto	0	259	259	2,1
Settembre	0	311	311	2,5
Totale anno	8.281	4.280	12.561	100

Tabella 5.9 - Consumi di gas metano definiti da progetto post-retrofit.

Consumi elettrici della pompa di calore di progetto post-retrofit - Condominio Arancione				
Mese	Consumi per riscaldamento [kWh _a]	Consumi per ACS [kWh _a]	Energia elettrica PDC [kWh _a]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	1.722	0	1.722	5,6
Novembre	7.780	0	7.780	25,4
Dicembre	5.606	0	5.606	18,3
Gennaio	3.624	0	3.624	11,8
Febbraio	4.569	0	4.569	14,9
Marzo	5.905	0	5.905	19,3
Aprile	1.461	0	1.461	4,8
Maggio	0	0	0	0,0
Giugno	0	0	0	0,0
Luglio	0	0	0	0,0
Agosto	0	0	0	0,0
Settembre	0	0	0	0,0
Totale anno	30.667	0	30.667	100

Tabella 5.10 - Consumi di energia elettrica definiti da progetto post-retrofit.

Infine, per quanto riguarda il condominio Verde, non essendo stato modificato l'impianto di generazione pre-retrofit, e, siccome l'unico generatore di calore presente è costituito da due caldaie a condensazione a cascata, l'analisi si concentra unicamente sul fabbisogno del gas metano; dove è stato previsto, anche in questo ennesimo caso, che solo la prima caldaia entra in funzione in condizioni normali. Il consumo della fonte energetica gas naturale nelle condizioni post-retrofit in fase di progetto, riportata in *Tabella 5.11*, è pari a 3.624 Nm³.

Consumi della caldaia di progetto post-retrofit - Condominio Verde				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	68	/	68	1,9
Novembre	530	/	530	14,6
Dicembre	849	/	849	23,4
Gennaio	989	/	989	27,3
Febbraio	689	/	689	19,0
Marzo	434	/	434	12,0
Aprile	65	/	65	1,8
Maggio	0	/	0	0,0
Giugno	0	/	0	0,0
Luglio	0	/	0	0,0
Agosto	0	/	0	0,0
Settembre	0	/	0	0,0
Totale anno	3.624	/	3.624	100

Tabella 5.11 - Consumi di gas metano definiti da progetto post-retrofit

Per i condomini Blu e Arancione, la pompa di calore risulta assumere un ruolo centrale nella copertura del fabbisogno termico globale sia per il riscaldamento sia per la produzione di ACS (escluso il condominio Arancione). Tuttavia, come sarà approfondito nel paragrafo successivo, tale comportamento non trova pieno riscontro nei consumi reali rilevati nel periodo post-retrofit.

5.3 Analisi energetica dello stato riqualificato

5.3.1 Determinazione dei consumi energetici per il riscaldamento degli ambienti e per la produzione di ACS post-retrofit nel 2023-2024.

La determinazione dei consumi dei principali vettori energetici nel periodo post-retrofit è più semplice rispetto alla fase pre-retrofit, soprattutto grazie alla presenza di contacalorie e di contatori di energia elettrica, installati in seguito agli interventi di riqualificazione. In particolare, sono stati installati contacalorie e contatori volumetrici separati per i due principali servizi energetici: riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria, consentendo una diretta identificazione dei fabbisogni di gas metano mensili suddivisi per ciascun servizio (**Tabella 5.12, 5.15 e 5.17**). Sopra ciascuna di queste tabelle è riportato il confronto tra i consumi reali post-retrofit e l'andamento della temperatura media esterna mensile, corrispondente allo stesso periodo (**Figure 5.4, 5.5 e 5.6**). Dall'analisi si osserva come, al crescere della temperatura esterna, i consumi di gas naturale totali tendano a diminuire, evidenziando la correlazione tra fabbisogno di gas naturale e condizioni climatiche esterne.

Nel periodo post-intervento, la possibilità di effettuare misurazioni dirette per ciascuna utenza, ha reso possibile l'utilizzo dei dati reali senza necessità di ulteriori elaborazioni e stime, a differenza della fase pre-retrofit in cui è stata necessaria, per il condominio Blu, una ripartizione tra i servizi di RSC e produzione di ACS.

In aggiunta, sia nel condominio Blu che nel condominio Arancione, sono stati installati contatori di energia elettrica dedicati alla misura dell'assorbimento elettrico della pompa di calore (**Tabella 5.13**) e della produzione dell'impianto fotovoltaico (**Tabella 5.14 e 5.16**). Il COP medio rilevato per il condominio Blu risulta essere pari a 3,41, mentre quelli stagionali sono pari a 3,11 e 3,84 rispettivamente nella stagione di RSC ed estiva. Per il condominio Arancione il COP medio risulta essere sensibilmente inferiore e pari a 0,62, rilevando delle condizioni operative reali molto inefficienti. Il COP per la stagione di RSC è nullo mentre per quella estiva è pari a 1.

Le tabelle riportate di seguito rappresentano i consumi mensili relativi ai principali vettori energetici, nel periodo compreso tra ottobre 2023 e settembre 2024, distinti tra RSC e ACS. In aggiunta, viene riportata una tabella riepilogativa annuale (**Tabella 5.18**), in cui i consumi sono espressi sia in forma assoluta, sia normalizzati rispetto ai GG annuali, al fine di consentire un confronto oggettivo con i valori di progetto. Tali consumi normalizzati saranno confrontati con quelli calcolati a progetto mediante il software Edilelima, riportati nella sezione precedente, per valutare la coerenza tra i consumi teorici stimati in fase di progettazione e i consumi reali misurati nell'anno successivo all'intervento (2023-2024).

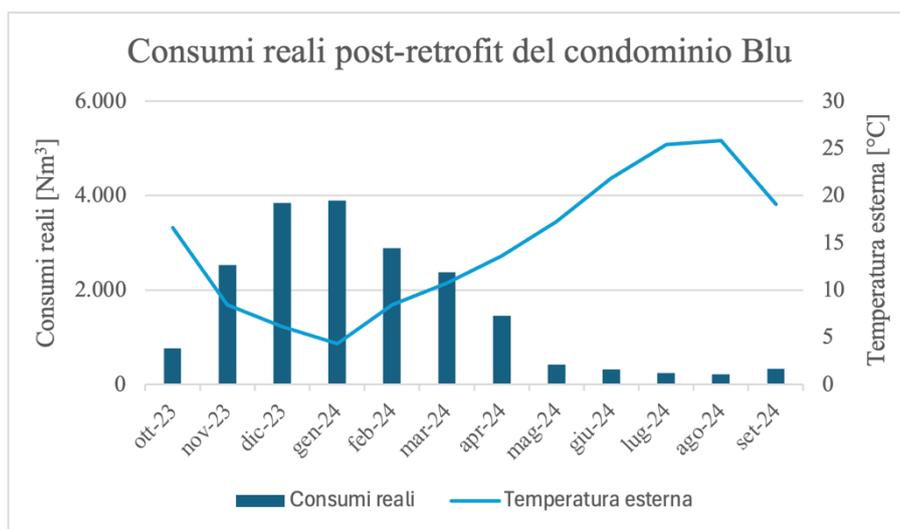


Figura 5.4 - Confronto consumi reali post-retrofit e temperatura esterna per il condominio Blu.

Anno di riferimento 2023-2024 - Caldaie - Condominio Blu				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm³]	Consumi per ACS [Nm³]	Consumi totali [Nm³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	376	383	759	3,9
Novembre	2.018	501	2.519	13,1
Dicembre	3.242	603	3.845	20,0
Gennaio	3.302	592	3.893	20,2
Febbraio	2.279	598	2.876	14,9
Marzo	1.784	594	2.378	12,4
Aprile	981	469	1.450	7,5
Maggio	0	425	425	2,2
Giugno	0	316	316	1,6
Luglio	0	242	242	1,3
Agosto	0	213	213	1,1
Settembre	0	329	329	1,7
Totale anno	13.981	5.264	19.245	100

Tabella 5.12 - Consumi di gas metano misurati post-retrofit nel periodo 2023-2024.

Anno di riferimento 2023-2024 - Pompa di calore - Condominio Blu				
Mese	Consumi per riscaldamento [kWh _a]	Consumi per ACS [kWh _a]	Energia elettrica PDC [kWh _a]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	240	245	485	31,5
Novembre	243	60	303	19,7
Dicembre	93	17	110	7,2
Gennaio	0	0	0	0,0
Febbraio	0	0	0	0,0
Marzo	0	0	0	0,0
Aprile	0	0	0	0,0
Maggio	0	161	161	10,5
Giugno	0	90	90	5,9
Luglio	0	0	0	0,0
Agosto	0	43	43	2,8
Settembre	0	344	344	22,4
Totale anno	576	961	1.536	100

Tabella 5.13 - Consumi di energia elettrica della PDC misurati post-retrofit nel periodo 2023-2024.

Anno di riferimento 2023-2024 - Condominio Blu			
Mese	Energia termica PDC [kWh]	Energia elettrica assorbita PDC [kWh _{el}]	Energia elettrica FTV [kWh _{el}]
Ottobre	1.624	485	741
Novembre	880	303	472
Dicembre	290	110	307
Gennaio	0	0	424
Febbraio	0	0	472
Marzo	0	0	888
Aprile	0	0	1.329
Maggio	606	161	1.538
Giugno	374	90	1.707
Luglio	0	0	1.930
Agosto	181	43	1.768
Settembre	1.290	344	1.028
Totale anno	5.245	1.536	12.604

Tabella 5.14 - Confronto tra assorbimenti della PDC e produzione FTV nel periodo 2023-2024.

Nel condominio Blu, il consumo elettrico reale normalizzato della pompa di calore nell'intero anno di riferimento post-retrofit risulta pari a circa 1.750 kWh_{el}, a fronte di un valore di progetto di circa 41.500 kWh_{el}. Questa differenza corrisponde a una riduzione di quasi 30 volte rispetto alla stima progettuale, evidenziando con certezza che la pompa di calore non stia svolgendo il ruolo previsto in fase di progetto. Questo è dovuto, come si vedrà successivamente, ad un'errata configurazione impiantistica e a delle conseguenti temperature di esercizio troppo elevate per la PDC. Conseguentemente, per soddisfare i fabbisogni dei diversi servizi, si osserva un consumo di gas metano di molto superiore rispetto a quello stimato, infatti, i consumi di gas metano normalizzati reali risultano pari a 21.247 Nm³ rispetto ai 7.932 Nm³ stimati in fase di progetto; confermando che le caldaie a condensazione sono di fatto i generatori principalmente in esercizio, in contrasto con la configurazione inizialmente prevista.

Per quanto riguarda l'impianto fotovoltaico, in fase di progetto era stata prevista una produzione annua di circa 13.777 kWh_{el}. I dati reali, ottenuti grazie ai contatori di energia elettrica installati sull'impianto, hanno invece mostrato una produzione effettiva di circa 12.604 kWh_{el}. Questo risultato indica che la stima iniziale è stata leggermente ottimistica ma, la differenza tra il valore previsto e quello misurato è molto contenuta e potrebbe essere dovuta a una radiazione solare reale diversa da quella di progetto.

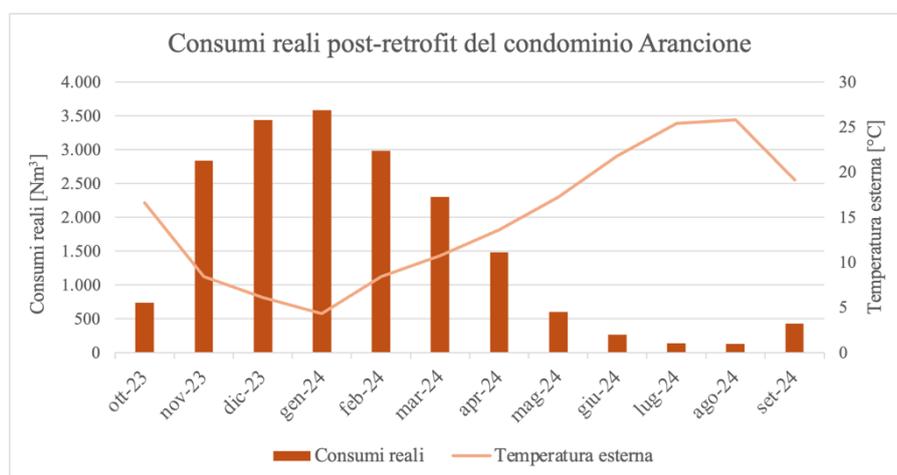


Figura 5.5 - Confronto consumi reali post-retrofit e temperatura esterna per il condominio Arancione.

Anno di riferimento 2023-2024 - Caldaie - Condominio Arancione				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm³]	Consumi per ACS [Nm³]	Consumi totali [Nm³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	446	287	733	3,9
Novembre	2.316	525	2.841	15,0
Dicembre	2.892	540	3.432	18,2
Gennaio	3.056	530	3.585	19,0
Febbraio	2.453	526	2.979	15,8
Marzo	1.812	483	2.296	12,1
Aprile	1.035	447	1.482	7,8
Maggio	0	600	600	3,2
Giugno	0	259	259	1,4
Luglio	0	139	139	0,7
Agosto	0	124	124	0,7
Settembre	0	427	427	2,3
Totale anno	14.011	4.886	18.897	100

Tabella 5.15 - Consumi di gas metano misurati post-retrofit nel periodo 2023-2024.

Anno di riferimento 2023-2024 - Condominio Arancione			
Mese	Energia termica PDC [kWh]	Energia elettrica assorbita PDC [kWh _{el}]	Energia elettrica FTV [kWh _{el}]
Ottobre	0	85	1.189
Novembre	0	79	878
Dicembre	0	85	652
Gennaio	0	83	889
Febbraio	0	76	806
Marzo	0	86	1.263
Aprile	100	90	1.626
Maggio	0	94	1.941
Giugno	100	145	2.097
Luglio	200	152	2.473
Agosto	200	148	2.500
Settembre	200	168	1.505
Totale anno	800	1.290	17.818

Tabella 5.16 - Confronto tra assorbimenti della PDC e produzione FTV nel periodo 2023-2024.

Nel condominio Arancione, la situazione è ancora più anomala. L'assorbimento di energia elettrica da parte della pompa di calore è estremamente basso e concentrato nei mesi estivi, quando il servizio di riscaldamento risulta disattivato. Secondo quanto previsto dalla configurazione impiantistica di progetto, la pompa di calore dovrebbe soddisfare esclusivamente il servizio di RSC. Nella realtà, invece, la configurazione è ben diversa e la pompa di calore produce esclusivamente ACS; infatti, i dati misurati mostrano che la pompa di calore risulta attiva elettricamente assorbendo mediamente circa 100 kWh_{el} al mese per tutto l'anno. Infatti, si registra una produzione di energia termica solo nei mesi estivi in cui si sa che l'impianto di riscaldamento è spento e, quindi, la pompa di calore eroga potenza quasi esclusivamente a servizio dell'ACS.

Conseguentemente, siccome gli assorbimenti elettrici della pompa di calore non sono minimamente confrontabili con quelli di progetto, per soddisfare i fabbisogni dei diversi servizi, si osserva un consumo di gas metano superiore rispetto a quello di progetto. Infatti, i consumi di gas metano normalizzati reali risultano pari a 20.903 Nm³ rispetto ai 12.561 Nm³ stimati in fase di progetto; confermando che le caldaie a condensazione sono di fatto gli unici generatori in esercizio, in contrasto con la configurazione inizialmente prevista nella quale si dava la priorità ai generatori di calore elettrici.

Per quanto riguarda l'impianto fotovoltaico, in fase di progetto era stata prevista una produzione annua di circa 20.799 kWh_{el} in condizioni standard. I dati reali, ottenuti grazie ai contatori di energia elettrica installati sull'impianto, hanno mostrato una produzione effettiva di circa 17.818 kWh_{el}. Questo risultato indica che la stima iniziale è stata leggermente ottimistica ma, la differenza tra il valore previsto e quello misurato è contenuta, e potrebbe essere dovuta ad una differenza tra radiazione globale effettiva misurata nel 2023-2024 e quella standard utilizzata per stimare la producibilità dell'impianto FTV, in seguito verificata.

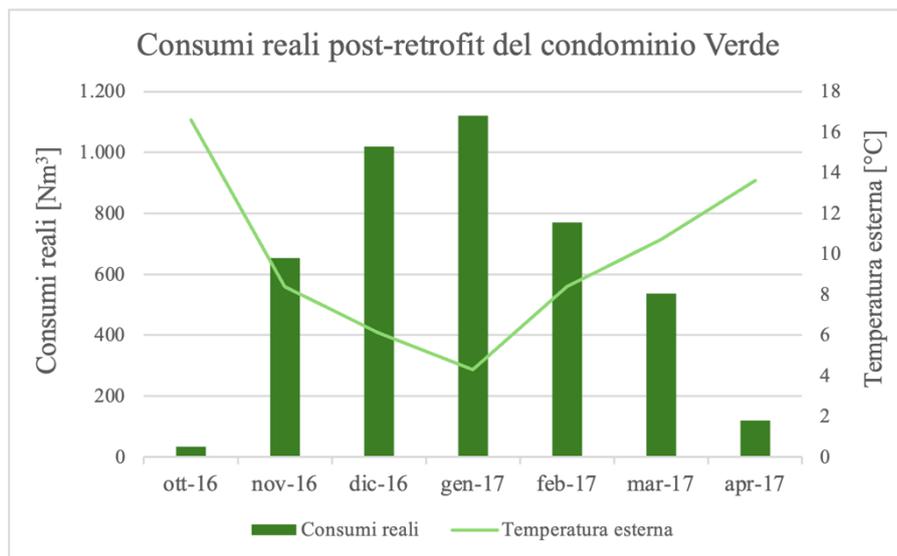


Figura 5.6 - Confronto consumi reali post-retrofit e temperatura esterna per il condominio Verde.

Anno di riferimento 2023-2024 - Condominio Verde				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	34	/	34	0,8
Novembre	653	/	653	15,4
Dicembre	1.020	/	1.020	24,0
Gennaio	1.121	/	1.121	26,4
Febbraio	770	/	770	18,1
Marzo	536	/	536	12,6
Aprile	120	/	120	2,8
Maggio	0	/	0	0
Giugno	0	/	0	0
Luglio	0	/	0	0
Agosto	0	/	0	0
Settembre	0	/	0	0
Totale anno	4.254	/	4.254	100

Tabella 5.17 - Consumi di gas metano misurati post-retrofit nel periodo 2023-2024.

Nel caso del condominio Verde, l'impianto centralizzato è destinato unicamente alla produzione di energia termica per il servizio di riscaldamento. La produzione di ACS avviene autonomamente per ciascuna unità abitativa, e quindi, non viene influenzata dagli interventi di riqualificazione energetica eseguiti sull'involucro edilizio. L'unico intervento realizzato è stato l'isolamento termico delle superfici opache e trasparenti, ed essendo la produzione di ACS autonoma e distribuita internamente ai singoli alloggi, l'isolamento dell'involucro non ha inciso né sulla generazione né sulla distribuzione dell'acqua calda sanitaria. Per tali ragioni non è stato considerato il calcolo del risparmio energetico relativo all'ACS, perché considerato inutile e trascurabile.

Per quanto riguarda il consumo di gas metano annuale legato al riscaldamento, la stima progettuale effettuata in condizioni climatiche normalizzate indicava un valore di circa 3.600 Nm³. Tuttavia, i dati reali rilevati nel periodo post-retrofit mostrano un consumo effettivo normalizzato pari a circa 4.800 Nm³, evidenziando una leggera differenza rispetto a quanto previsto. Anche in questo caso, la stima progettuale si è rivelata ottimistica, mentre i dati misurati suggeriscono un fabbisogno leggermente superiore rispetto alle ipotesi iniziali.

Anno di riferimento	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Consumi totali normalizzati [Nm ³]
2023-2024	13.981	5.264	19.245	21.247
Media totale	13.981	5.264	19.245	21.247
Anno di riferimento	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Consumi totali normalizzati [Nm ³]
2023-2024	14.011	4.886	18.897	20.903
Media totale	14.011	4.886	18.897	20.903
Anno di riferimento	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Consumi totali normalizzati [Nm ³]
2023-2024	4.254	/	4.254	4.863
Media totale	4.254	/	4.254	4.863

Tabella 5.18 - Riepilogo dei consumi di gas metano reali normalizzati post-retrofit nel periodo 2023-2024.

Si può riassumere che, già a seguito di una prima analisi dei dati misurati relativi all'anno 2023-2024, è possibile individuare delle criticità operative legate al comportamento reale dei

sistemi ibridi installati nel condominio Blu e in quello Arancione rispetto a quelli stimati in fase di progetto. In particolare, sono presenti discrepanze tra i dati progettuali, stimati attraverso il software Edilclima, e i consumi effettivamente misurati tramite i contatori dedicati. Tale differenza sarà dovuta ad un'errata configurazione impiantistica che non permette alla pompa di calore di funzionare correttamente.

Questa prima indagine costituisce un primo passo verso una diagnosi energetica, evidenziando delle variazioni tra le previsioni progettuali e il comportamento reale. Rappresenta inoltre un indicatore di malfunzionamento o di utilizzo scorretto, fondamentale per attivare azioni correttive e migliorare l'efficienza complessiva del sistema edificio-impianto.

5.4 Valutazione dei risparmi di gas naturale

In questa sezione verranno analizzate due metodologie distinte per la valutazione dei risparmi energetici in seguito agli interventi di riqualificazione.

La prima metodologia si basa sulla normalizzazione dei consumi mensili di riscaldamento rispetto ai GG mensili, al fine di stimare il risparmio ottenuto in condizioni climatiche standard, cioè indipendentemente dalle condizioni esterne del periodo post-retrofit. In questo caso, verrà prima costruito un modello di baseline pre-retrofit, utilizzando i consumi mensili di riscaldamento normalizzati e i consumi di ACS mediati nei diversi mesi. Successivamente, anche i consumi post-retrofit verranno normalizzati rispetto ai medesimi valori di riferimento (UNI 10349), e la differenza tra i due modelli permetterà di quantificare il risparmio energetico in termini assoluti e percentuali, in modo da poter effettuare confronti tra interventi diversi neutralizzando l'effetto del clima.

La seconda metodologia, invece, adotta un approccio di tipo “*model-to-point*” basato su un modello di regressione lineare: la firma energetica. In questo caso, si costruisce un modello di regressione lineare tra temperatura esterna media mensile e potenza media erogata dal generatore, utilizzando i dati pre-retrofit. Tale modello viene poi proiettato nelle temperature mensili rilevate nel periodo post-retrofit (2023-2024), così da stimare quanto sarebbero stati i consumi senza realizzare interventi, nelle condizioni climatiche realmente verificatesi. Il confronto tra questo valore stimato e i consumi reali misurati nel periodo post-retrofit, consente di determinare il risparmio energetico, in termini assoluti e percentuali, effettivamente ottenuto.

5.4.1 Normalizzazione rispetto ai GG mensili

Per rappresentare il comportamento energetico dell'edificio nel periodo pre-intervento, indipendentemente dalle condizioni climatiche reali, è stato costruito un modello di baseline pre-retrofit sfruttando la normalizzazione sui GG. Tale modello si basa sui dati storici reali di

consumo di gas metano, opportunamente normalizzati rispetto ai gradi giorno mensili effettivi, ottenuti dal portale di ARPA.

Per ciascun condominio è stato sviluppato un modello, utilizzando intervalli temporali diversi in funzione della disponibilità dei dati:

- Condominio Blu: 2 anni di dati, dal mese di ottobre 2016 a settembre 2018;
- Condominio Arancione: 3 anni di dati, da ottobre 2015 a settembre 2018;
- Condominio Verde: 5 anni di dati, da ottobre 2016 a dicembre 2021.

È opportuno sottolineare che la qualità del modello di baseline migliora con l'aumentare del numero di misurazioni: come indicato anche da ENEA, è raccomandabile disporre di almeno tre anni di misure per ottenere un modello energetico robusto e consistente. Per costruire il modello di baseline energetico, è stato necessario distinguere tra i consumi destinati per il RSC e quelli per la produzione di ACS. Solo i consumi per il riscaldamento sono stati sottoposti a normalizzazione climatica, in quanto strettamente dipendenti dalla temperatura esterna e, di conseguenza, dai GG come riportata dalla formula 3.3 nel terzo capitolo.

La normalizzazione dei consumi di riscaldamento è stata effettuata considerando i consumi effettivi mensili, dividendoli per i GG effettivi del mese considerato, ottenuti dal portale ARPA per la località di Udine, e successivamente, moltiplicandoli per i GG di riferimento normativi definiti dalla UNI 10349, per lo stesso mese di riferimento. Infine, i valori ottenuti per i vari mesi sono stati mediati nei vari anni in modo da ottenere il modello finale.

Siccome i consumi di ACS non sono influenzati direttamente dalle condizioni climatiche esterne, è stato adottato un'altra tipologia di approccio. Partendo dai dati mensili disponibili, è stata calcolata una media mensile utilizzando i valori dei diversi anni. Tali valori medi sono poi stati utilizzati come riferimento per il confronto all'interno del modello di baseline.

Lo stesso processo di normalizzazione è stato applicato anche ai consumi di riscaldamento nel periodo post-intervento avendo a disposizione un solo anno di riferimento: da ottobre 2023 a settembre 2024, in modo da rendere il confronto con il periodo pre-retrofit nelle stesse condizioni climatiche standard di riferimento.

Le tabelle successive riportano i consumi mensili normalizzati, distinguendo tra riscaldamento e ACS, e costituiscono i modelli di baseline pre-retrofit e post-retrofit per la valutazione dei risparmi energetici.

Modello di baseline pre-retrofit con normalizzazione sui GG mensili - Condominio Blu				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	1.190	938	2.128	5,4
Novembre	3.622	1.056	4.678	11,8
Dicembre	4.922	1.115	6.036	15,2
Gennaio	6.583	1.173	7.756	19,5
Febbraio	5.603	1.115	6.718	16,9
Marzo	3.983	1.095	5.078	12,8
Aprile	2.111	1.017	3.127	7,9
Maggio	0	1.019	1.019	2,6
Giugno	0	851	851	2,1
Luglio	0	742	742	1,9
Agosto	0	712	712	1,8
Settembre	0	863	863	2,2
Totale anno	28.014	11.693	39.707	100

Tabella 5.19 - Modello di baseline pre-retrofit: consumi normalizzati per il condominio Blu.

Modello di baseline post-retrofit con normalizzazione sui GG mensili - Condominio Blu				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	470	383	852	3,8
Novembre	2.094	501	2.595	11,7
Dicembre	3.521	603	4.124	18,6
Gennaio	3.566	592	4.158	18,7
Febbraio	2.891	598	3.489	15,7
Marzo	2.290	594	2.884	13,0
Aprile	2.125	469	2.594	11,7
Maggio	0	425	425	1,9
Giugno	0	316	316	1,4
Luglio	0	242	242	1,1
Agosto	0	213	213	1,0
Settembre	0	329	329	1,5
Totale anno	16.956	5.264	22.220	100

Tabella 5.20 - Modello di baseline post-retrofit: consumi normalizzati per il condominio Blu.

Modello di baseline pre-retrofit con normalizzazione sui GG mensili - Condominio Arancione				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	1.154	986	2.140	6,5
Novembre	3.095	1.105	4.200	12,8
Dicembre	3.994	1.182	5.176	15,8
Gennaio	4.694	1.211	5.905	18,0
Febbraio	3.828	1.156	4.984	15,2
Marzo	3.229	1.056	4.284	13,0
Aprile	1.345	1.004	2.349	7,1
Maggio	0	940	940	2,9
Giugno	0	820	820	2,5
Luglio	0	694	694	2,1
Agosto	0	680	680	2,1
Settembre	0	690	690	2,1
Totale anno	21.337	11.525	32.863	100

Tabella 5.21 - Modello di baseline pre-retrofit: consumi normalizzati per il condominio Arancione.

Modello di baseline post-retrofit con normalizzazione sui GG mensili - Condominio Arancione				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	558	287	845	3,8
Novembre	2.403	525	2.927	13,3
Dicembre	3.141	540	3.680	16,8
Gennaio	3.301	530	3.831	17,4
Febbraio	3.112	526	3.638	16,6
Marzo	2.327	483	2.810	12,8
Aprile	2.243	447	2.690	12,2
Maggio	0	600	600	2,7
Giugno	0	259	259	1,2
Luglio	0	139	139	0,6
Agosto	0	124	124	0,6
Settembre	0	427	427	1,9
Totale anno	17.084	4.886	21.970	100

Tabella 5.22 - Modello di baseline post-retrofit: consumi normalizzati per il condominio Arancione.

Modello di baseline pre-retrofit con normalizzazione sui GG mensili - Condominio Verde				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	421	/	421	4,9
Novembre	1.244	/	1.244	14,5
Dicembre	1.654	/	1.654	19,2
Gennaio	1.952	/	1.952	22,7
Febbraio	1.580	/	1.580	18,4
Marzo	1.212	/	1.212	14,1
Aprile	539	/	539	6,3
Maggio	0	/	0	0,0
Giugno	0	/	0	0
Luglio	0	/	0	0
Agosto	0	/	0	0
Settembre	0	/	0	0
Totale anno	8.601	/	8.601	100

Tabella 5.23 - Modello di baseline pre-retrofit: consumi normalizzati per il condominio Verde.

Modello di baseline post-retrofit con normalizzazione sui GG mensili - Condominio Verde				
Mese	Consumi per riscaldamento [Nm ³]	Consumi per ACS [Nm ³]	Consumi totali [Nm ³]	Ripartizione mensile dei consumi [%]
Ottobre	43	/	43	0,5
Novembre	678	/	678	7,9
Dicembre	1.107	/	1.107	12,9
Gennaio	1.211	/	1.211	14,1
Febbraio	976	/	976	11,4
Marzo	689	/	689	8,0
Aprile	260	/	260	3,0
Maggio	0	/	0	0,0
Giugno	0	/	0	0
Luglio	0	/	0	0
Agosto	0	/	0	0
Settembre	0	/	0	0
Totale anno	4.963	/	4.963	58

Tabella 5.24 - Modello di baseline post-retrofit: consumi normalizzati per il condominio Verde.

Ottenuti i consumi energetici normalizzati sia per il modello pre-retrofit che per quello post-retrofit, è stato possibile procedere al calcolo del risparmio energetico assoluto per il solo vettore gas naturale, con una semplice differenza tra consumo standard ante e consumo standard post, valutato distintamente per ciascun servizio e poi globalmente (*Tabella 5.25*).

Per la determinazione del risparmio energetico in termini percentuali, si è invece fatto riferimento all'*Equazione 3.8*, che consente di calcolare il risparmio percentuale come rapporto tra il risparmio assoluto e il valore di consumo del modello di baseline pre-retrofit.

Condominio	Risparmi assoluti di RSC [Nm ³]	Risparmi assoluti di ACS [Nm ³]	Risparmi assoluti totali [Nm ³]	Risparmio totale percentuale [%]
Blu	11.058	6.429	17.487	44,04
Arancione	4.253	6.639	10.893	33,15
Verde	3.638	0	3.638	42,29

Tabella 5.25 - Riepilogo dei risparmi assoluti e percentuali per i diversi interventi, utilizzando la normalizzazione dei consumi.

Il risparmio di gas naturale, ottenuto attraverso la metodologia dei GG, è riferito a condizioni climatiche standard, e consente di rispondere alla domanda: “Se avessimo avuto, per ogni anno, lo stesso clima medio standard, quanto avremmo consumato prima e quanto dopo l’intervento?”. Tale approccio permette di confrontare coerentemente i consumi energetici pre e post-retrofit, riportandoli alla medesima condizione climatica standard. Naturalmente questo risparmio si basa solo sulla fonte gas naturale, e non sull’energia elettrica, il cui risparmio verrà calcolato successivamente.

L’approccio basato sui GG si basa su una relazione lineare diretta tra i consumi di riscaldamento e la rigidità del clima, espressa appunto in GG. Tuttavia, questa semplificazione non tiene conto delle reali caratteristiche dell’involucro edilizio e dell’impianto, né delle dinamiche di funzionamento effettive: dell’inerzia termica, delle logiche di regolazione, del comfort termico reale, etc...

Pertanto, l’accuratezza nel rappresentare il comportamento reale del sistema edificio-impianto risulta limitata. Proprio per superare queste criticità, nella sezione successiva verrà adottato un approccio regressivo basato sulla firma energetica, che consente una stima più accurata del risparmio energetico; la quale tiene conto anche del comportamento del sistema, considerando la risposta termica dell’edificio in funzione della temperatura esterna.

◆ **Valutazione grafica dei risparmi di gas naturale normalizzati**

Vengono riportati i grafici di confronto tra la situazione pre e post-retrofit, relativi ai consumi di gas naturale. Sull’asse delle ascisse sono rappresentati i mesi dell’anno, mentre su quello delle ordinate i consumi totali normalizzati in Nm³ (*Figure 5.7, 5.8 e 5.9*).

Il confronto tra la curva dei consumi pre-intervento e quella post-intervento, entrambe ottenute normalizzando i consumi di RSC rispetto al clima (utilizzando i GG mensili) e mediando i consumi di ACS, consente di evidenziare il risparmio ottenuto, rappresentato dalla differenza tra le due curve. Si può facilmente osservare come i risparmi assoluti maggiori sono stati ottenuti nel condominio Blu.

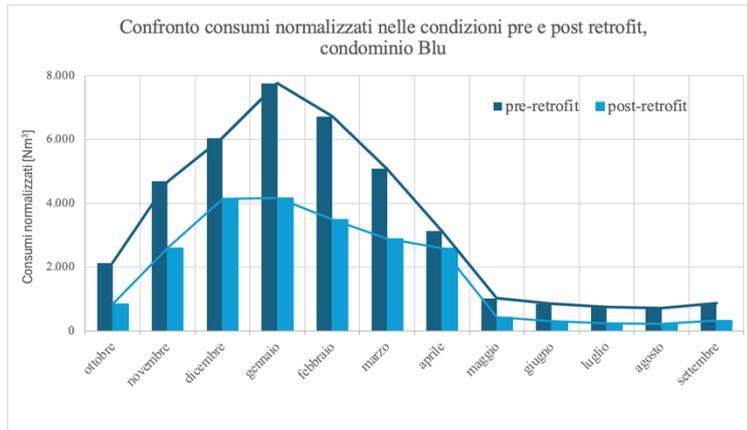


Figura 5.7 - Consumi normalizzati pre e post-retrofit nel condominio Blu.

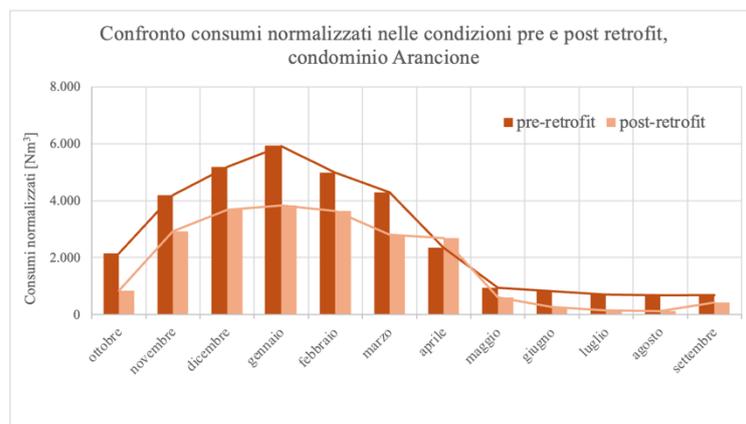


Figura 5.8 - Consumi normalizzati pre e post-retrofit nel condominio Arancione.

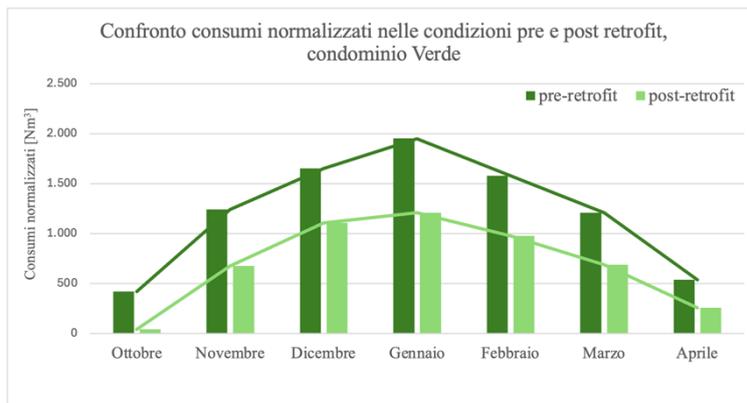


Figura 5.9 - Consumi normalizzati pre e post-retrofit nel condominio Verde.

5.4.2 Firma energetica

La seconda metodologia adottata si basa su un approccio analitico: la firma energetica. In particolare, viene costruito un modello di regressione lineare tra la temperatura esterna media mensile e la potenza media del generatore riferita allo stesso mese, utilizzando esclusivamente i dati reali pre-retrofit.

Per la determinazione dei parametri necessari alla costruzione della firma energetica è stato adottato il seguente approccio metodologico: a partire dai consumi mensili di gas naturale, espressi in Nm^3 e opportunamente separati per il solo servizio di RSC, si è proceduto alla conversione in energia termica fornita al sistema espressa in kWh_t , mediante l'utilizzo del potere calorifico inferiore del gas, assunto pari a $9,94 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$. Questo valore è stato scelto in coerenza con il software Edilclima, al fine di garantire la consistenza dei confronti con i risultati delle simulazioni progettuali. Successivamente, si è passati al calcolo della potenza media erogata dal generatore dividendo l'energia mensile per il numero di ore di attivazione effettive dell'impianto nel mese considerato. Infine, i valori di temperatura esterna media mensile sono stati scaricati dalla centralina meteorologica di ARPA situata presso la località di Sant'Ossvaldo, a pochi chilometri di distanza dai condomini analizzati.

Il modello così ottenuto, validato con le principali metriche definite nel capitolo 3.3, viene successivamente proiettato alle temperature medie effettivamente registrate nel periodo post-retrofit (2024-2025), al fine di stimare quali sarebbero stati i consumi in assenza di interventi, ma a parità di condizioni climatiche in modo da neutralizzarne l'effetto.

Il confronto tra il consumo teorico stimato e i consumi reali misurati nello stesso periodo consente di determinare il risparmio energetico effettivamente conseguito, neutralizzando l'influenza delle condizioni meteorologiche. In altre parole, il risparmio calcolato riflette esclusivamente l'effetto degli interventi di riqualificazione, visto che ci si riferisce allo stesso contesto climatico.

È opportuno osservare che, sebbene l'analisi sia stata effettuata su base mensile, la letteratura evidenzia come una firma energetica costruita con dati a maggiore risoluzione temporale, settimanali o giornalieri, avrebbe permesso di ottenere modelli più accurati, sia per la valutazione della potenza termica di progetto sia per l'analisi dinamica del comportamento termico dell'edificio. Tuttavia, per il presente studio sono stati utilizzati i dati disponibili, ritenuti comunque adeguati allo scopo dell'analisi.

Il modello di regressione lineare consente di stimare i consumi in funzione delle condizioni climatiche reali, tenendo conto delle caratteristiche termiche dell'involucro edilizio e dell'efficienza del sistema impiantistico.

A differenza dell'approccio basato sulla normalizzazione tramite GG, la firma energetica tiene conto anche della risposta termica dell'intero sistema edificio-impianto, offrendo una valutazione più accurata dei consumi e dei potenziali risparmi ottenibili in seguito alla realizzazione degli interventi di riqualificazione energetica, esclusivamente di gas naturale.

Successivamente verranno presentati i risultati ottenuti, riportando per ciascun condominio i grafici relativi alle firme energetiche a 2 e 3 parametri nelle condizioni pre e post-retrofit. Per la determinazione dei risparmi energetici associati al servizio del riscaldamento, è stato adottato un modello a 2 parametri, in quanto i consumi di riscaldamento e di ACS erano già separati. Solamente per il condominio Blu, nel caso pre-retrofit, si è reso necessario stimare il profilo di consumo dell'ACS in assenza di misure dirette, attraverso analogia con un profilo stagionale; per tale motivo, anche in questo caso si è preferito l'approccio a 2 parametri, così da garantire coerenza metodologica tra le diverse casistiche analizzate.

◆ Condominio Blu

In **Figura 5.10** è riportato il modello di firma energetica pre-retrofit a due parametri relativo al condominio Blu. Tutti i seguenti modelli pre-retrofit sono stati validati mediante le principali metriche. Dall'analisi della retta interpolante ottenuta dai dati mensili reali si può stimare una potenza termica di progetto pre-intervento, a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, pari a circa 230 kW. Questo valore risulta inferiore se lo confrontiamo con quello ottenuto dal software Edilclima, che fornisce una potenza di progetto pre-retrofit per il solo RSC di circa 295 kW. Invece, la potenza nominale della caldaia installata risulta essere pari a 315 kW, è correttamente dimensionata rispetto alla potenza termica di progetto relativa al solo RSC, in quanto deve anche coprire il fabbisogno di circa 20 kW per la produzione di ACS e deve garantire adeguati margini di sicurezza.

La temperatura di equilibrio $T_{r,on}$, pari alla temperatura minima esterna alla quale si prevede l'accensione dell'impianto di riscaldamento, risulta pari a $16,93\text{ }^{\circ}\text{C}$, un valore coerente con la scarsa qualità dell'isolamento termico e con la tipologia costruttiva dell'edificio. Inoltre, il coefficiente globale di scambio termico H_{tot} , rappresentato dalla pendenza della retta, è pari a $10,492\text{ kW/K}$, mentre il valore fornito da Edilclima si attesta attorno a $10,18\text{ kW/K}$. Questo confronto evidenzia che, nella condizione reale pre-retrofit, l'impianto presentava un comportamento di poco meno efficiente (pendenza maggiore) rispetto a quanto previsto in progetto, ad esempio per possibili perdite dell'impianto e/o per regolazioni diverse da quelle ipotizzate in fase di progetto.

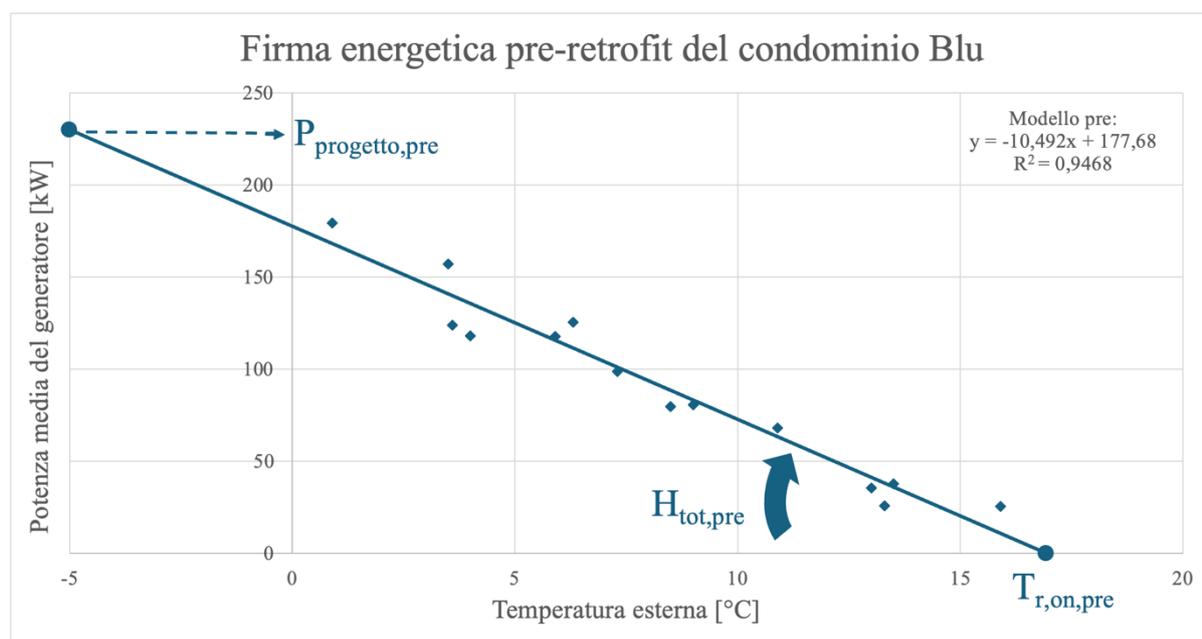


Figura 5.10 - Modello di firma energetica pre-retrofit a 2-P relativo al condominio Blu.

In **Figura 5.11** è rappresentata, tratteggiata, la firma energetica post-retrofit del condominio Blu, costruita a partire dai dati reali di consumo misurati nell'anno successivo all'intervento (2023-2024). Si può osservare come i punti relativi ai consumi reali post-retrofit si trovano più in basso rispetto alla curva di regressione costruita con i dati pre-retrofit. Questo comportamento conferma l'effettivo ottenimento di un risparmio energetico, in quanto, a parità

di temperatura esterna, si osservano consumi di gas naturale inferiori rispetto a quelli che si sarebbero verificati in assenza di interventi.

Sebbene sia disponibile un solo anno di dati per il periodo post-retrofit, è stato comunque possibile valutare le principali metriche della firma energetica, infatti, si evidenzia una bassa dispersione dei punti attorno alla retta di regressione e un coefficiente di determinazione molto alto. In particolare, il modello pre-retrofit presenta un valore di R^2 pari a 0,9468, mentre nel modello post-retrofit il valore raggiunge 0,9767, indicando in entrambi i casi una buonissima aderenza del modello ai dati osservati.

È opportuno, tuttavia precisare, che un confronto diretto tra le due firme non è completamente corretto, in quanto nel periodo post-intervento è presente una pompa di calore che contribuisce, seppur in modo marginale, alla copertura del fabbisogno termico. Come discusso in precedenza, tale contributo rappresenta meno del 3% dell'energia termica complessiva, e pertanto il suo impatto sul confronto risulta trascurabile ai fini dell'analisi.

La potenza di progetto post-retrofit stimata dalla regressione si attesta intorno a 134 kW, mentre il software Edilclima restituisce un valore di progetto complessivo pari a 171,5 kW. Tale discrepanza è attribuibile al fatto che nella nuova configurazione impiantistica è presente anche una pompa di calore e quindi in quei 134 kW si dovrebbe considerare anche la potenza termica erogata della pompa di calore; siccome la pompa di calore lavora marginalmente rispetto alla caldaia, questa discrepanza è minima ed è dovuta principalmente a garantire margini di sicurezza adeguati.

La potenza termica nominale complessiva delle caldaie installate è pari a 221,8 kW, come già indicato in precedenza; risultano sovradimensionate rispetto alla potenza termica di progetto relativa al solo RSC, perché deve coprire anche il fabbisogno di circa 10 kW per la produzione di ACS e deve garantire margini di sicurezza adeguati.

Il coefficiente globale di scambio termico H_{tot} , pari a 5,98 kW/K, è abbastanza simile al valore restituito da Edilclima, pari a 5,72 kW/K, dimostrando che il sistema edificio-impianto opera in linea con le prestazioni previste in fase di progetto; le perdite dei principali sottosistemi sono contenute.

Un aspetto particolarmente interessante riguarda la temperatura di equilibrio $T_{r, on}$, che risulta aumentata, passando a 17,44 °C. Questo comportamento non è assolutamente quello che ci si aspetterebbe: considerando che l'intervento ha coinvolto l'isolamento di circa il 50% della superficie disperdente dell'involucro, ci si aspetterebbe una diminuzione della temperatura di accensione dell'impianto, in quanto sono diminuite le dispersioni termiche attraverso l'involucro. Questa anomalia fornisce indicazioni sulla presenza di comportamenti non coerenti con le ipotesi di progetto. Ad esempio, molto probabilmente la temperatura interna di set-point è molto superiore rispetto a quella prevista da normativa (20°C). Si ipotizza la presenza di un possibile effetto rebound, ovvero quel fenomeno per cui, a seguito di un miglioramento dell'efficienza energetica e dell'introduzione di fonti rinnovabili, gli occupanti tendono ad aumentare il proprio livello di comfort, con conseguente incremento dei consumi energetici reali rispetto alle aspettative di progetto, vanificando i risparmi energetici. In questi casi, l'importanza di un controllo più accurato della regolazione impiantistica e dell'utilizzo da parte degli occupanti risulta di notevole importanza.

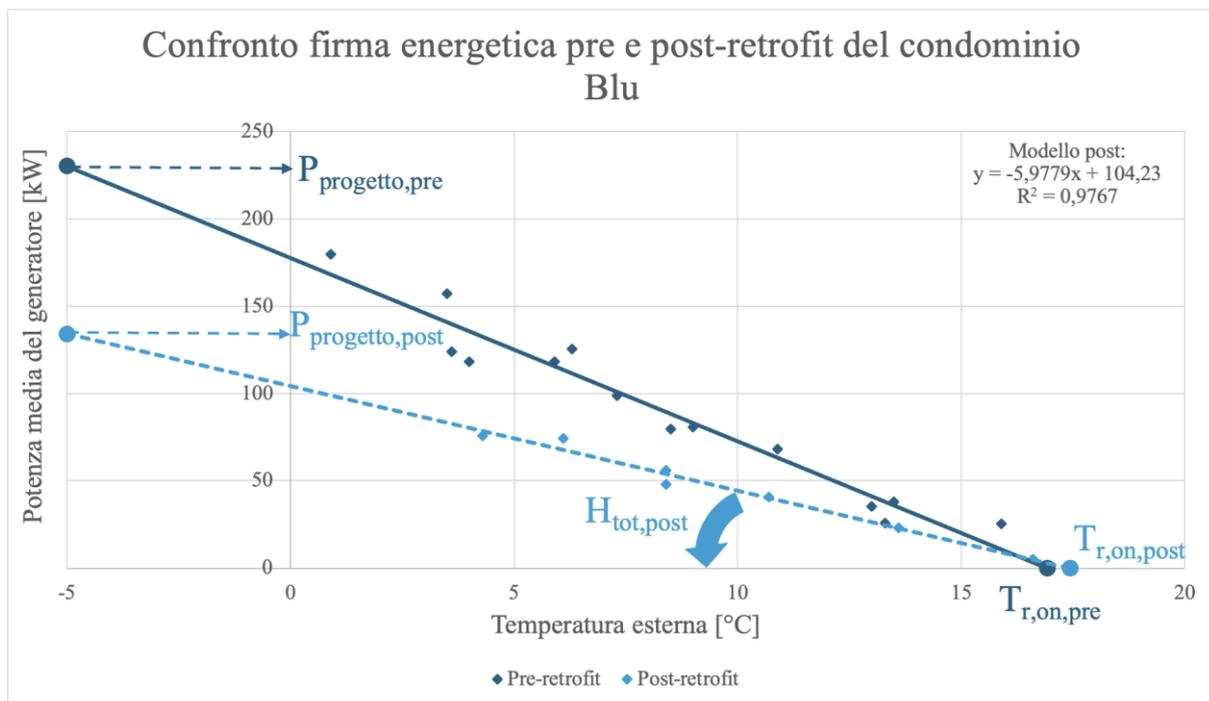


Figura 5.11 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit a 2-P relativo al condominio Blu.

L'utilizzo dell'approccio MESH ha consentito l'utilizzo di modelli di regressione polinomiale di secondo grado, al fine di individuare eventuali fenomeni non lineari nel comportamento dei consumi energetici. Come si può osservare in **Figura 5.12**, nel modello pre-retrofit la curva presenta un andamento convesso: l'efficienza dell'impianto è maggiore a temperature esterne più elevate. Al contrario, nel modello post-retrofit si osserva una leggera concavità: l'efficienza del sistema aumenta quando le temperature esterne sono minori.

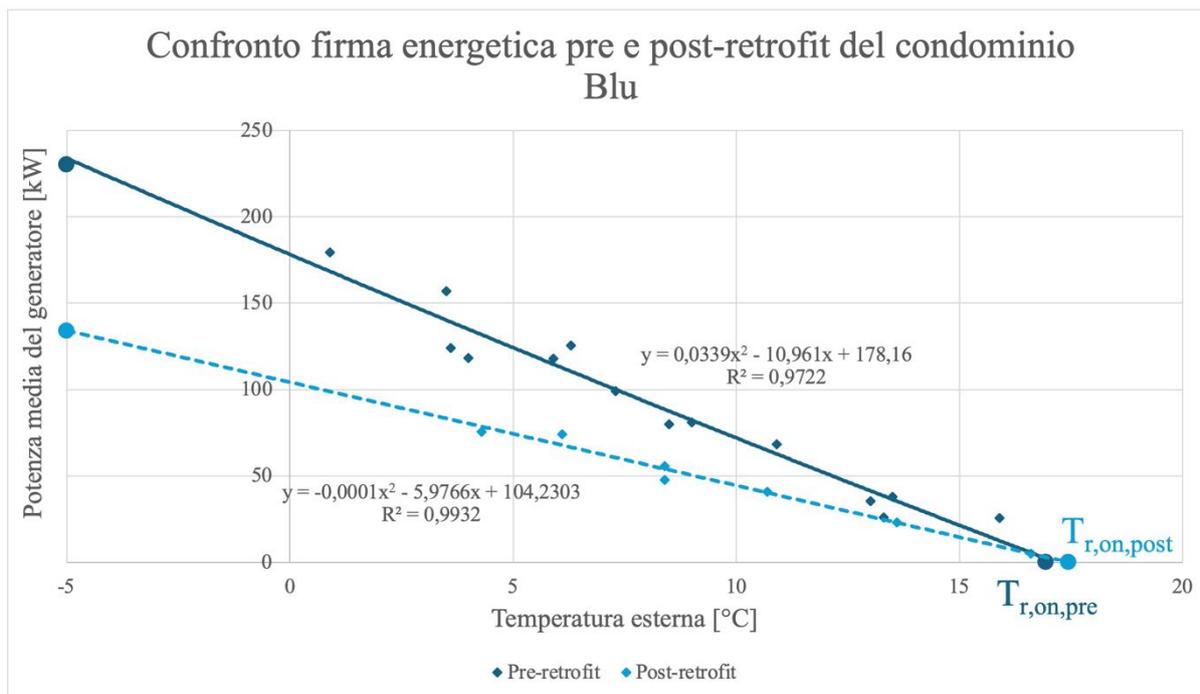


Figura 5.12 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit: evidenza della curvatura nei modelli di regressione polinomiale.

In **Figura 5.13** viene mostrato il confronto tra tre firme energetiche distinte: quella relativa al periodo pre-retrofit, quella post-retrofit basate sui dati reali misurati e, infine, quella post-retrofit derivante dalla relazione tecnica di progetto. Quest'ultima rappresenta il funzionamento atteso dalle stime progettuali solo per i consumi di gas naturale, simulate con il software Edilclima, secondo i criteri previsti dalla normativa UNI/TS 11300.

In fase di progetto, si prevedeva che la pompa di calore assumesse un ruolo prevalente nel sistema ibrido, con priorità rispetto alla caldaia, in conformità con la normativa stessa. In tale configurazione, la caldaia a condensazione avrebbe dovuto entrare in funzione solo in condizioni di basse temperature esterne, mentre la seconda caldaia, installata in cascata, non sarebbe neanche mai dovuta intervenire. La temperatura di accensione della caldaia prevista in fase di progetto è pari a circa 9 °C: ciò significa che, sopra i 9 °C avrebbe dovuto intervenire esclusivamente la pompa di calore, lasciando alla caldaia solo il compito di coprire i picchi di carico a temperature inferiori. Questa configurazione progettuale non si riflette nella firma energetica azzurra: si osservano consumi di gas naturale significativamente più alti, anche se, la pendenza della curva risulta inferiore, indicando una maggiore efficienza dell'impianto.

Confrontando la firma energetica reale post-retrofit e quella di progetto si osserva che le curve presentano andamenti molto differenti, sia in termini di pendenza che di distribuzione dei consumi. Si può constatare, quindi, la presenza di un divario prestazionale tra quanto previsto in fase progettuale e quanto effettivamente riscontrato nelle condizioni reali. Il funzionamento reale del sistema risulta diverso da quello ipotizzato, evidenziando possibili criticità nella gestione delle logiche di priorità tra i diversi generatori.

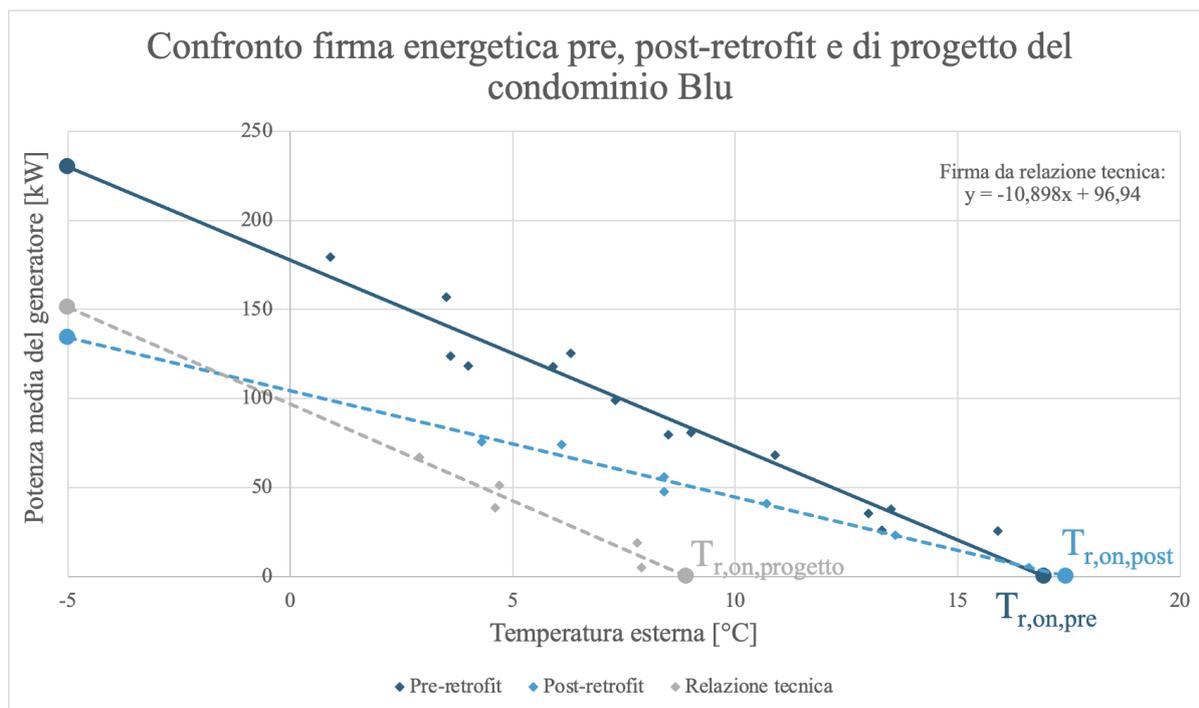


Figura 5.13 - Confronto tra firma energetica pre, post-retrofit reale e post-retrofit da relazione di progetto.

Per completezza, viene riportato in **Figura 5.14** il grafico della firma energetica a tre parametri. Il modello a 3-P è stato realizzato sia per il periodo pre-retrofit sia per quello post-retrofit. Analizzando il parametro associato ai consumi costanti P_{nr} , ovvero la potenza necessaria a coprire i fabbisogni indipendenti dalla temperatura esterna (consumo di ACS), si osserva un comportamento differente tra i due casi:

- nel modello pre-retrofit, tale valore risulta costante e pari a circa 20 kW, in un sistema in cui tutta la produzione di ACS avviene mediante caldaia;
- nel post-retrofit, invece, si evidenzia una diminuzione di tale valore, con un andamento decrescente di tale segmento. Questo fenomeno è attribuibile alla presenza di un impianto solare termico destinato al preriscaldamento dell'ACS; il contributo che fornisce l'impianto solare cresce all'aumentare della temperatura esterna, riducendo gradualmente il carico richiesto alla caldaia.

Infine, si sottolinea che in questo modello a 3P, le potenze di progetto risultano maggiori rispetto a quelle ottenute nel modello a 2P, in quanto comprendono anche i consumi di gas naturale relativi all'ACS.

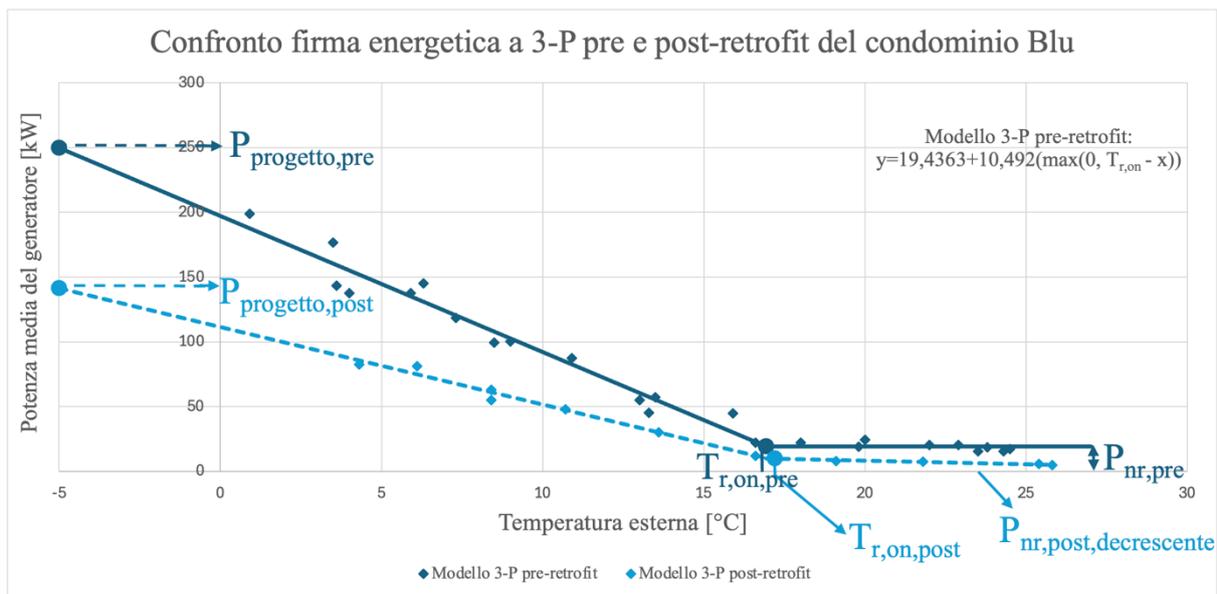


Figura 5.14 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit a 3-P relativo al condominio Blu.

◆ Condominio Arancione

In **Figura 5.15** è riportato il modello di firma energetica pre-retrofit a due parametri relativo al condominio Arancione. L'analisi della retta di regressione, costruita a partire dai dati mensili reali, consente di stimare una potenza termica di progetto pre-intervento per il solo RSC (a -5 °C) pari a circa 168 kW. Questo valore risulta inferiore rispetto a quello fornito dal software Edilclima, che stima una potenza di progetto per il solo RSC pari a 205 kW.

La potenza nominale complessiva delle caldaie installate, pari a 308 kW (due generatori da 154 kW ciascuno), risulta sovradimensionata rispetto alla potenza termica di progetto necessaria per il solo servizio di RSC. Tale sovradimensionamento è giustificato, in parte, sia dalla necessità di coprire il fabbisogno per la produzione di ACS, stimato in circa 18 kW, sia dall'esigenza di garantire adeguati margini di sicurezza.

La temperatura di equilibrio $T_{r,on}$ risulta pari a 17,56 °C. Tale valore è coerente con la scarsa qualità dell'involucro edilizio e con le caratteristiche costruttive dell'edificio analizzato.

Il coefficiente globale di scambio termico H_{tot} , rappresentato dalla pendenza della retta di regressione, è pari a 7,47 kW/K, mentre il valore stimato da Edilclima si attesta attorno a 7,93 kW/K. Il confronto tra i due valori suggerisce che, in condizioni reali pre-retrofit, il sistema edificio-impianto presentava un comportamento lievemente più efficiente rispetto a quanto previsto in fase progettuale.

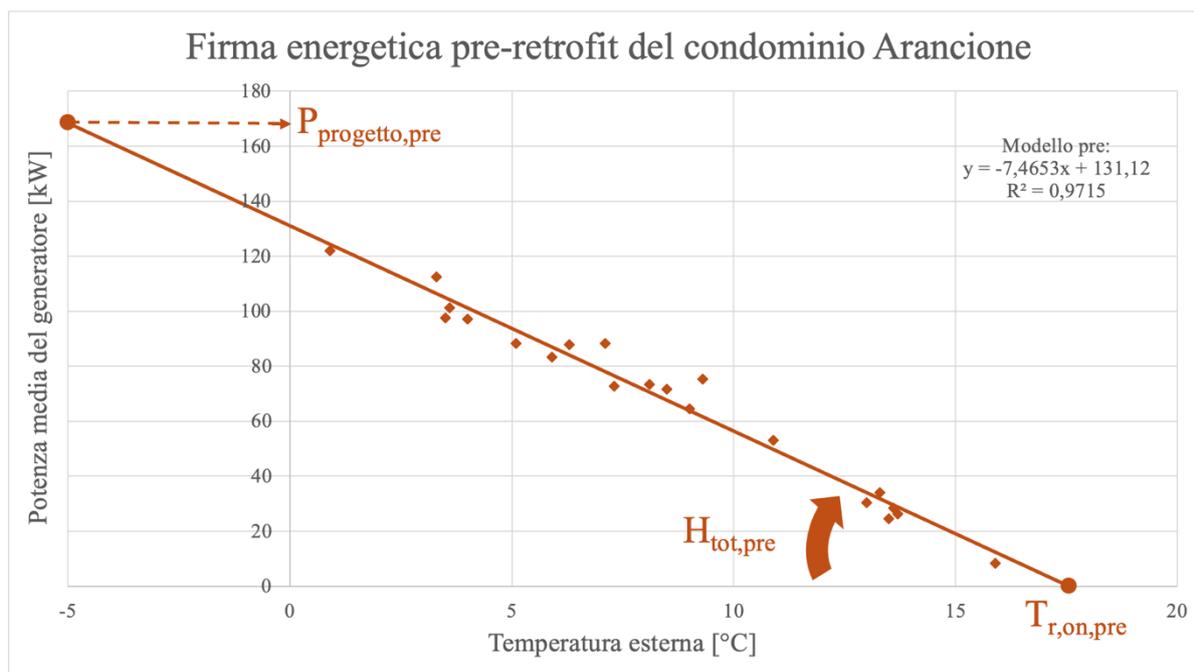


Figura 5.15 - Modello di firma energetica pre-retrofit a 2-P relativo al condominio Arancione.

In **Figura 5.16** è rappresentata, con una linea tratteggiata, la firma energetica post-retrofit del condominio Arancione, creata a partire dai dati reali di consumo relativi al periodo compreso tra ottobre 2023 e settembre 2024. È evidente come i punti corrispondenti ai consumi post-intervento risultino al di sotto della curva di regressione pre-retrofit, indicando un miglioramento in termini di efficienza energetica: a parità di temperatura esterna, i consumi di gas naturale risultano inferiori. Nonostante la disponibilità di un solo anno di dati post-retrofit, è stato possibile validare il modello. Si osserva infatti una bassissima dispersione dei punti attorno alla retta di regressione e un coefficiente di determinazione R^2 molto elevato. In particolare, il modello pre-retrofit presenta un valore di R^2 pari a 0,9715, mentre il modello post-retrofit raggiunge un valore di R^2 di 0,9977.

Va tuttavia precisato che un confronto diretto tra le due firme non può considerarsi del tutto preciso, poiché nel periodo post-retrofit è stata installata una pompa di calore che contribuisce al soddisfacimento del fabbisogno termico globale. Tuttavia, come discusso nei paragrafi precedenti, il contributo della pompa di calore risulta nullo, infatti dai dati sui consumi reali, emerge che, non fornisce calore per il servizio di RSC ma solo per la produzione di ACS.

Dal modello post-retrofit si stima una potenza di progetto (a -5 °C) pari a circa 129 kW, a fronte dei 180 kW restituiti dal software Edilclima. La potenza termica nominale delle caldaie installate risulta pari a 182 kW (due generatori da 90,9 kW l'uno), valore che risulta in linea rispetto al fabbisogno di riscaldamento. Per necessità di coprire anche il fabbisogno per la produzione di ACS, la presenza di adeguati margini di sicurezza, in caso di ulteriore richiesta di potenza termica è presente una pompa di calore, con potenza termica nominale pari a 50,4 kW.

Il coefficiente globale di scambio termico H_{tot} , stimato dal modello post-retrofit, è pari a 5,66 kW/K, molto simile al valore di progetto fornito da Edilclima, pari a 5,81 kW/K. Questo indica che il sistema edificio-impianto, dopo l'intervento, opera in linea con le prestazioni attese.

Un aspetto particolarmente interessante riguarda la temperatura di equilibrio $T_{r, on}$, ovvero la soglia al di sotto della quale si attiva il sistema di riscaldamento, che risulta leggermente aumentata, passando da $17,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $17,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Considerando che l'intervento ha interessato solo una porzione limitata dell'involucro edilizio (circa il 17% della superficie disperdente totale), ci si sarebbe aspettati comunque un leggero calo della temperatura di accensione, vista la riduzione delle dispersioni termiche. Al contrario, si osserva un lieve incremento, che potrebbe indicare comportamenti di utilizzo degli impianti diversi rispetto alle ipotesi progettuali. In particolare, anche in questo caso è ipotizzabile la presenza di un effetto rebound, ad esempio dovuto a maggiori temperature di set-point interno rispetto a quanto previsto, con conseguente incremento dei consumi e riduzione dei risparmi.

In ogni caso, la sostituzione dei generatori di calore obsoleti ha comportato un miglioramento complessivo dell'efficienza del sistema, come confermato dalla riduzione della pendenza della retta di regressione, che riflette una minore sensibilità dei consumi alla temperatura esterna.

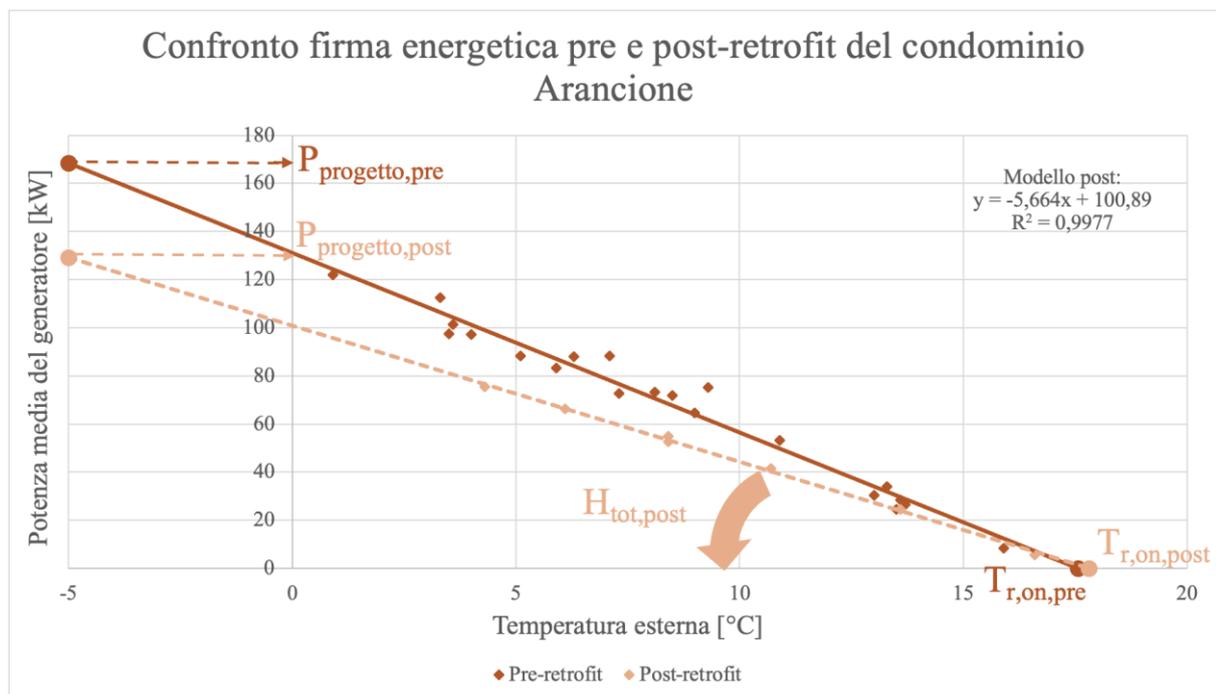


Figura 5.16 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit a 2-P relativo al condominio Arancione.

L'applicazione dei modelli di regressione polinomiale di secondo grado ha l'obiettivo di individuare eventuali comportamenti non lineari tra consumi energetici e temperatura esterna. Come illustrato in **Figura 5.17**, sia nel modello pre-retrofit che in quello post-retrofit, la curva assume un andamento concavo, indicando che l'impianto tende a operare con maggiore efficienza alle basse temperature esterne. Questo comportamento può essere associato a una miglior rendimento del generatore in condizioni di carico maggiori.

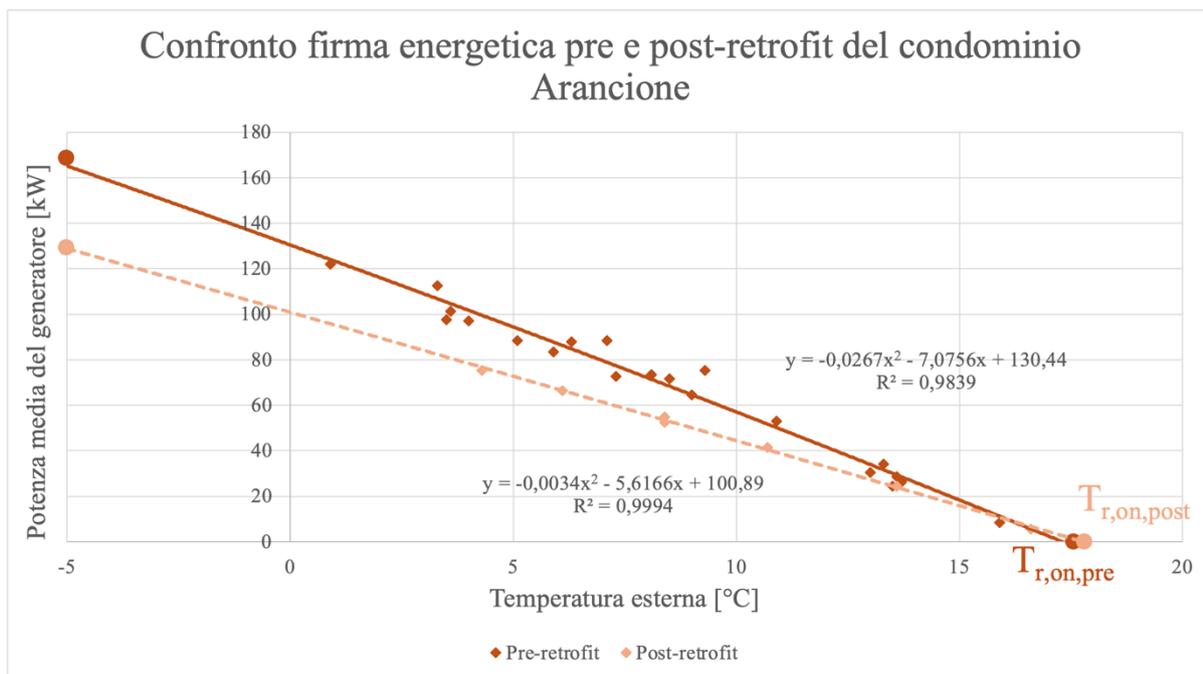


Figura 5.17 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit: evidenza della curvatura nei modelli di regressione polinomiale.

In **Figura 5.18** viene riportato il confronto tra tre firme energetiche: quella del periodo pre-retrofit reale, quella post-retrofit reale e quella ottenuta dalla relazione tecnica di progetto.

Secondo il progetto, la pompa di calore avrebbe dovuto coprire la maggior parte del fabbisogno termico, entrando in funzione prima della caldaia, come previsto dalla normativa UNI/TS 11300. La caldaia sarebbe dovuta intervenire solo con temperature esterne basse, mentre la seconda caldaia, installata in cascata, non avrebbe mai dovuto attivarsi. La temperatura di accensione della caldaia prevista era di 8,37 °C, quindi a temperature superiori si prevedeva il funzionamento esclusivamente della pompa di calore.

Tuttavia, osservando la firma energetica di progetto (di colore grigio), si notano consumi di gas naturale molto più bassi, ma anche una pendenza maggiore, che indica una minore efficienza rispetto a quanto emerso nei dati reali. Questo conferma, anche in questo caso, un divario tra ciò che era stato previsto in fase progettuale e ciò che si è verificato realmente.

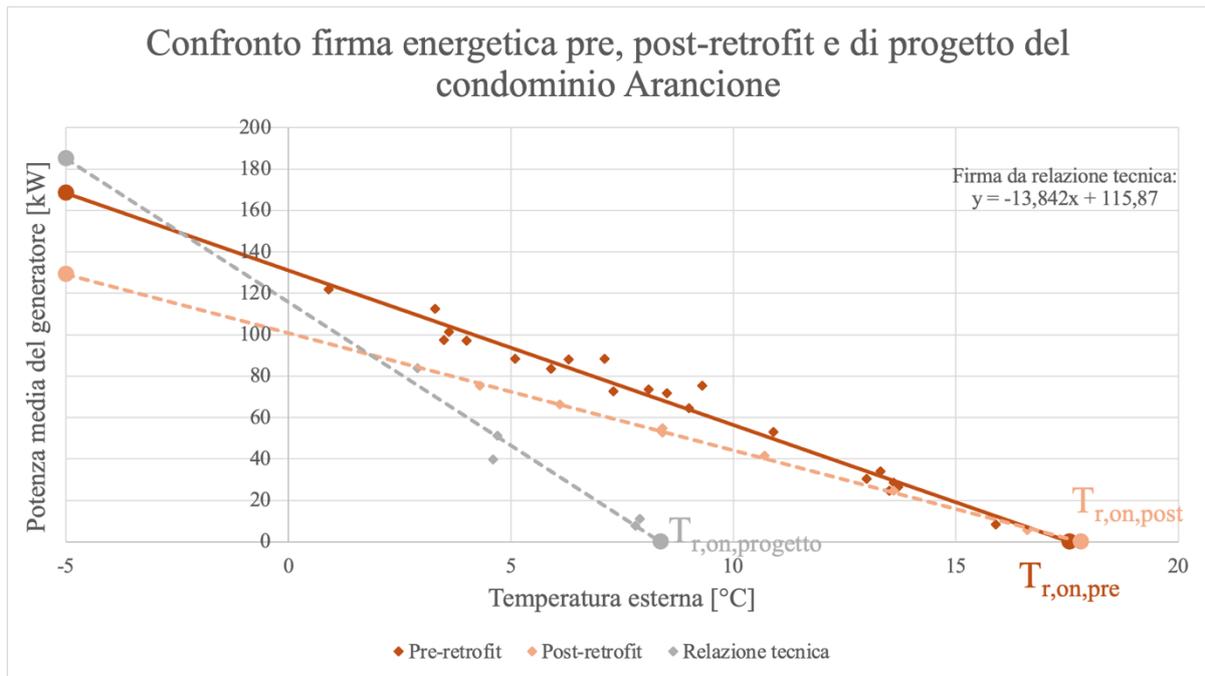


Figura 5.18 - Confronto tra firma energetica pre-retrofit, post-retrofit reale e post-retrofit da relazione di progetto.

Per completezza, in **Figura 5.19** è riportato il grafico della firma energetica a tre parametri, elaborato sia per il periodo pre-retrofit che post-retrofit. Analizzando il parametro P_{nr} , che rappresenta i consumi costanti legati all'ACS, si nota un comportamento diverso nei due casi:

- nel modello pre-retrofit, il valore è costante a circa 18 kW;
- nel modello post-retrofit, il valore tende a diminuire con l'aumento della temperatura esterna, grazie al contributo dell'impianto solare termico, che preriscalda l'acqua calda sanitaria, riducendo il carico sulla caldaia.

Inoltre, le potenze di progetto risultano più alte rispetto al modello a due parametri, poiché includono anche i consumi per l'ACS.

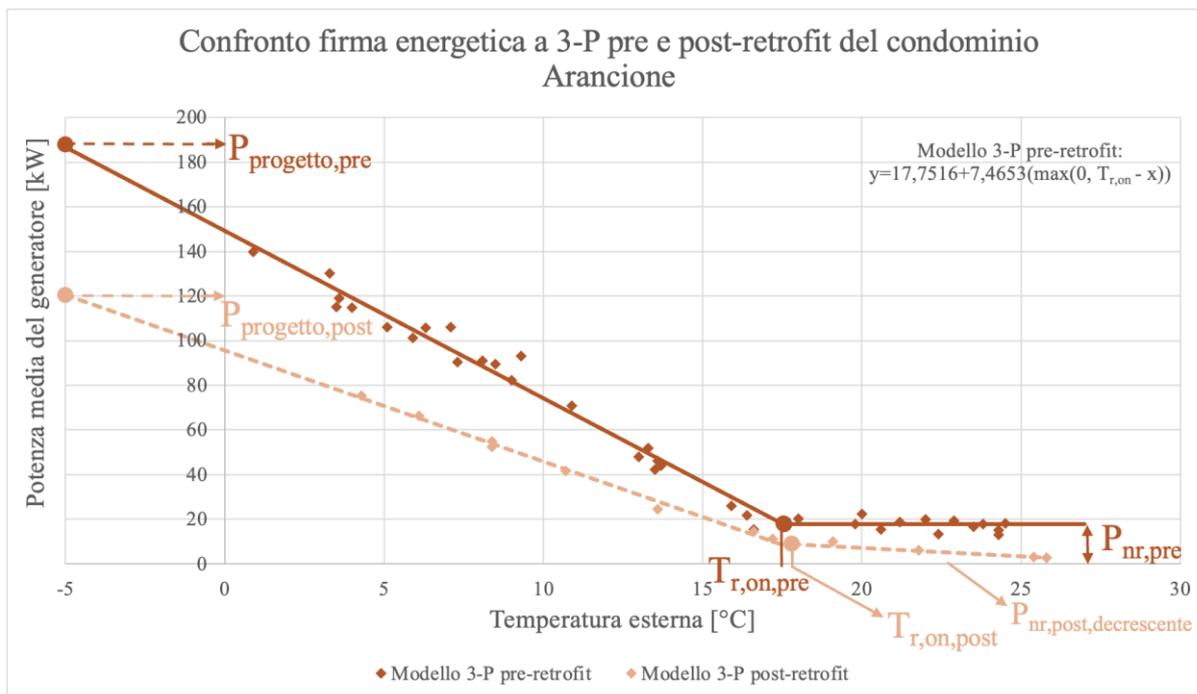


Figura 5.19 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit a 3-P relativo al condominio Arancione.

◆ Condominio Verde

Infine, vengono presentate le firme energetiche relative al condominio Verde. In questo caso, poiché la produzione di ACS è autonoma per ciascuna unità abitativa, non sono stati effettuati interventi sugli impianti; si assume che i consumi per ACS non siano variati tra prima e dopo l'intervento. Per questa ragione, non è stata elaborata una firma energetica a tre parametri, ma solo quella a due parametri, relativa al solo servizio di RSC.

In **Figura 5.20** è mostrato il modello pre-retrofit a due parametri. Dalla retta di regressione ottenuta dai dati mensili reali, si stima una potenza termica di progetto pari a circa 70,3 kW, valore inferiore a quello calcolato da Edilclima, pari a 90,28 kW.

Le caldaie a condensazione, installate a cascata, hanno una potenza complessiva di 109 kW (una da 46,5 kW e una da 62,6 kW), risultando sovradimensionate rispetto alla potenza necessaria per il solo riscaldamento. Questo è giustificato dalla necessità di garantire margini di sicurezza.

La temperatura di equilibrio $T_{r, on}$ risulta pari a 17,18 °C, valore coerente con le elevate dispersioni dell'involucro edilizio.

Infine, il coefficiente globale di scambio termico H_{tot} , pari a 3,17 kW/K, è leggermente superiore rispetto a quello stimato da Edilclima (3,05 kW/K), suggerendo un comportamento leggermente meno efficiente nella realtà rispetto a quanto previsto, ma comunque in buona coerenza con le ipotesi progettuali.

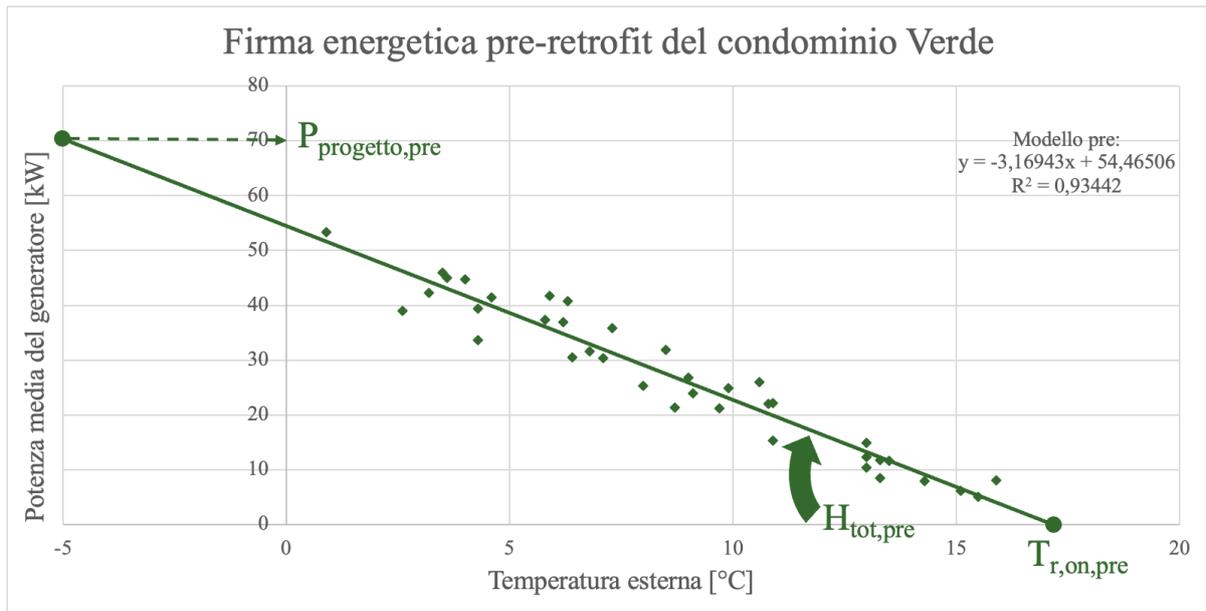


Figura 5.20 - Modello di firma energetica pre-retrofit a 2-P relativo al condominio Verde.

In **Figura 5.21** è mostrata, in linea tratteggiata, la firma energetica post-retrofit del condominio Verde. I punti relativi ai consumi dopo l'intervento si trovano al di sotto della curva pre-retrofit, segnalando una riduzione evidente dei consumi di gas naturale.

Anche se è disponibile un solo anno di dati post-intervento, il modello è stato validato con le principali metriche, e, grazie alla bassa dispersione dei dati attorno alla retta di regressione; i coefficienti di determinazione risultano essere pari a:

- R^2 del modello pre-retrofit: 0,9344;
- R^2 del modello post-retrofit: 0,9668.

Dal modello post-intervento si stima una potenza di progetto pari a 46,7 kW, contro i 37,37 kW calcolati da Edilclima: la differenza è contenuta. Poiché non sono stati eseguiti interventi sull'impianto, la potenza termica nominale delle caldaie rimane 109 kW, valore oggi ampiamente sovradimensionato rispetto al fabbisogno, a causa della realizzazione delle opere di isolamento successivo alla loro installazione.

Il coefficiente globale di scambio termico H_{tot} è sceso a 2,21 kW/K dopo l'intervento, ma risulta ancora superiore al valore di progetto fornito da Edilclima, e pari a 1,9845 kW/K, indicando che l'efficienza del sistema non ha raggiunto gli obiettivi prefissati.

Un dato positivo riguarda la temperatura di equilibrio $T_{r, on}$, che è diminuita da 17,18 °C a 16,15 °C, coerentemente con il miglioramento dell'isolamento termico. Questo ha permesso una riduzione del tempo di funzionamento del sistema di riscaldamento e ha contribuito al risparmio energetico complessivo.

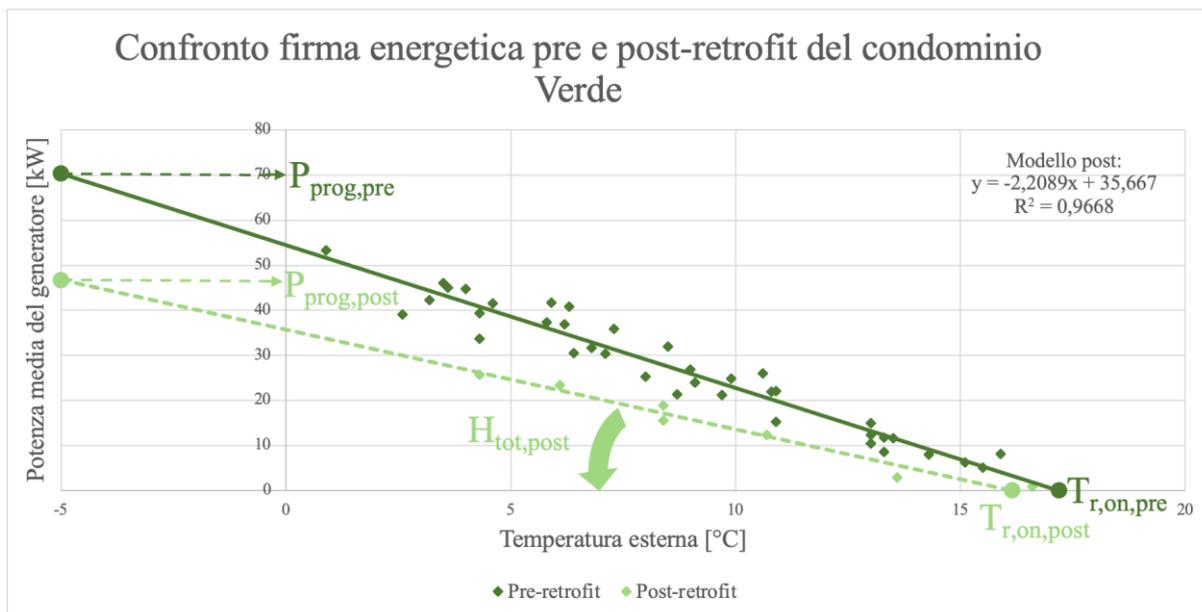


Figura 5.21 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit a 2-P relativo al condominio Verde.

L'applicazione dei modelli di regressione polinomiale di secondo grado, illustrati in **Figura 5.22**, mostra che la curva pre-retrofit presenta un andamento concavo, segnalando una maggiore efficienza dell'impianto alle basse temperature esterne. Al contrario, nel modello post-retrofit si osserva un andamento convesso, che suggerisce una migliore efficienza a temperature più elevate. In ogni caso, queste variazioni sono molto contenute e non influenzano il comportamento complessivo del sistema.

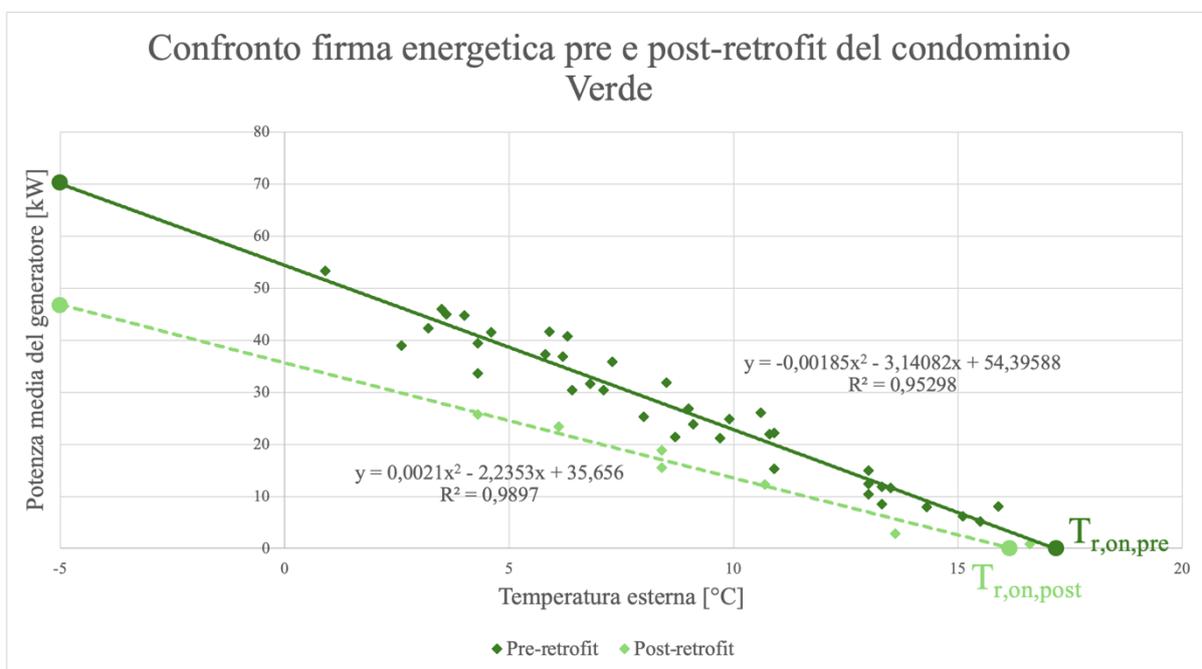


Figura 5.22 - Modelli di firma energetica pre e post-retrofit: evidenza della curvatura nei modelli di regressione polinomiale.

In **Figura 5.23** è mostrato il confronto tra tre firme energetiche: quella pre-retrofit reale, quella post-retrofit reale e quella derivante dalla relazione tecnica di progetto relative al condominio Verde.

La temperatura di accensione della caldaia prevista in fase di progetto è pari a 13,83 °C, valore di molto inferiore rispetto a quello rilevato dai consumi reali post-intervento. Analizzando la firma di progetto, si nota che i consumi di gas naturale attesi avrebbero dovuto essere molto più bassi rispetto a quelli effettivamente misurati: performance gap.

Le pendenze delle curve risultano comunque simili, suggerendo che l'efficienza dell'impianto è in linea con quanto previsto. Tuttavia, si osserva una traslazione verso l'alto della firma energetica reale rispetto a quella progettuale, il che potrebbe indicare o una temperatura interna di set-point più elevata rispetto a quella ipotizzata in fase di calcolo, oppure una diminuzione degli apporti interni.

Anche in questo caso, è presente un divario tra le condizioni progettuali e quelle reali, che potrebbe essere dovuto a comportamenti d'uso da parte degli occupanti diversi rispetto a quanto ipotizzato. Si può evidenziare che in tutti e tre i casi, le temperature di accensione degli impianti di RSC non si sono abbassate come avrebbe dovuto fare in condizioni di progetto.

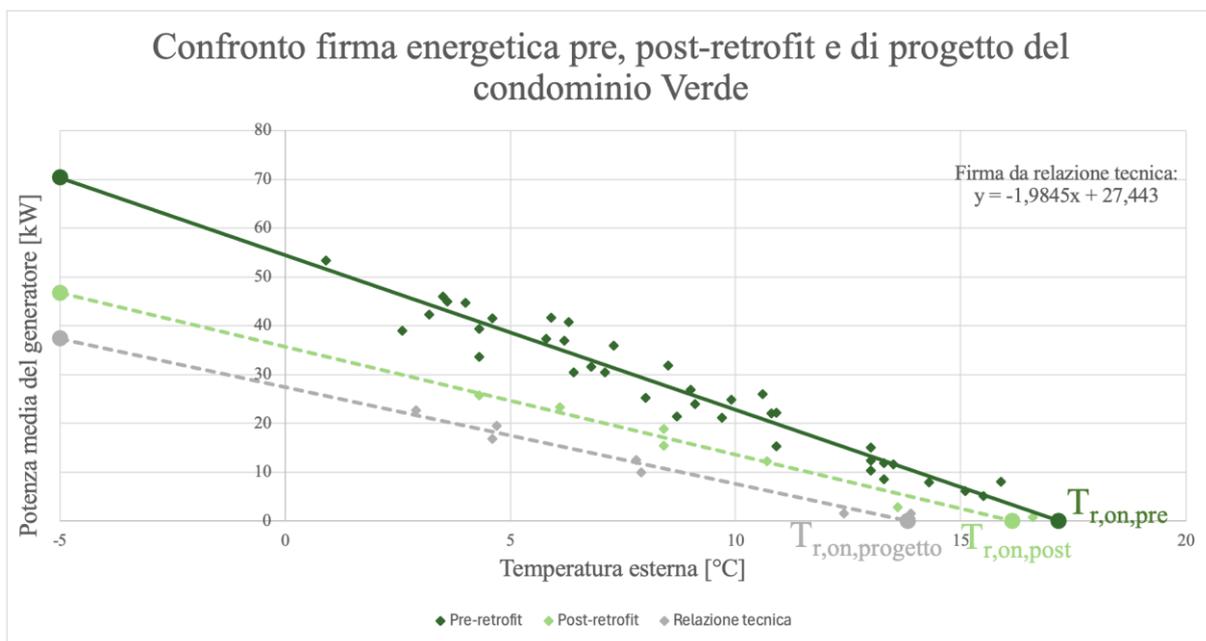


Figura 5.23 - Confronto tra firma energetica pre-retrofit, post-retrofit reale e post-retrofit da relazione di progetto.

◆ Validazione dei modelli

Per la validazione dei modelli di regressione lineare utilizzati nelle firme energetiche, sono state calcolate le seguenti metriche di errore: il coefficiente di determinazione R^2 , il MAPE, l'accuratezza e il CV-RMSE.

La valutazione dell'affidabilità dei modelli è stata effettuata utilizzando i criteri internazionali, che prevedono per le analisi con dati mensili:

- $R^2 > 0,8$;
- $MAPE < 15\%$;
- $CV-RMSE < 15\%$.

I risultati ottenuti sono riportati nelle **Tabelle 5.26 e 5.27**, rispettivamente per i modelli pre-retrofit e post-retrofit.

Il coefficiente R^2 risulta sempre superiore a 0,93/0,94, indicando una forte correlazione lineare tra consumo di gas naturale e temperatura esterna. Nei modelli post-retrofit, si osserva in generale una migliore correlazione rispetto ai modelli pre-intervento, dovuta ad un minor numero di dati a disposizione.

I valori di MAPE sono tutti molto contenuti, con l'unica eccezione del condominio Verde nella situazione post-retrofit, dove si registra un valore leggermente superiore alla soglia raccomandata. Anche l'accuratezza dei modelli è risultata pienamente accettabile.

Infine, i valori di CV-RMSE sono risultati sempre inferiori al 15%, e soddisfano pienamente i limiti imposti. Questi risultati confermano la robustezza e la consistenza dei modelli di regressione utilizzati per valutare i risparmi energetici.

Condominio	R^2	MAPE [%]	ACCURATEZZA [%]	CV-RMSE [%]
Blu	0,9468	14,72	85,28	11,96
Arancione	0,9715	9,23	90,77	7,75
Verde	0,9344	12,35	87,65	12,47

Tabella 5.26 - Metriche di errore per i modelli pre-retrofit.

Condominio	R^2	MAPE [%]	ACCURATEZZA [%]	CV-RMSE [%]
Blu	0,9767	4,57	95,43	7,92
Arancione	0,9977	5,18	94,82	2,33
Verde	0,9668	21,20	78,80	11,41

Tabella 5.27 - Metriche di errore per i modelli post-retrofit.

◆ Risultati ottenuti sfruttando la firma energetica

Vengono di seguito presentati i risultati ottenuti attraverso l'approccio model-to-point, basato sulla firma energetica, che prevede la proiezione del modello pre-retrofit sulle condizioni climatiche reali dell'anno post-intervento.

Questo metodo risulta più accurato, in quanto tiene conto della reale risposta del sistema edificio-impianto alle temperature esterne e consente di neutralizzare l'influenza del clima, permettendo una stima del risparmio energetico coerente e climaticamente corretta.

Le due metodologie utilizzate forniscono risultati differenti non perché una delle due sia errata, ma perché si riferiscono a scenari di confronto diversi:

- l'approccio con i GG riporta i consumi pre e post-intervento a condizioni climatiche standard, restituendo un risparmio energetico normalizzato;

- la firma energetica, invece, proietta i consumi pre-intervento sulle temperature realmente registrate nell'anno post-intervento, stimando il risparmio ottenuto in un contesto più rappresentativo del comportamento effettivo del sistema edificio-impianto.

Pertanto, anche se entrambi gli approcci sono corretti, la firma energetica offre una stima più coerente alla realtà operativa.

Le considerazioni precedenti trovano ulteriore conferma nell'analisi delle metriche di errore dei modelli pre e post-retrofit costruiti tramite normalizzazione sui GG. In questo caso, si osservano prestazioni peggiori rispetto ai modelli ottenuti con la firma energetica: in particolare, i valori di MAPE e CV-RMSE risultano superiori al 20%. Questi risultati sottolineano una minore capacità predittiva del modello normalizzato.

In **Tabella 5.28** sono riportati i risultati ottenuti in termini di risparmio percentuale e assoluto per ciascun condominio, con l'applicazione della firma energetica.

Si osserva che a livello percentuale, i risultati sono molto simili rispetto a quelli ottenuti mediante semplice normalizzazione, anche se non direttamente confrontabili, poiché si riferiscono a modelli di baseline pre-retrofit differenti.

Invece, i risparmi stimati assoluti, espressi in Nm^3 utilizzando l'approccio della firma energetica, tendono ad essere leggermente inferiori, soprattutto per il condominio Blu e per quello Verde. Sebbene teoricamente la normalizzazione tramite i GG dovrebbe portare a una sottostima dei risparmi in un contesto di surriscaldamento climatico globale, nei casi analizzati si è osservata invece una sovrastima dei risparmi assoluti. Ciò è dovuto al fatto che questo metodo normalizza direttamente i dati reali, amplificando eventuali anomalie o valori anomali, soprattutto nel periodo pre-retrofit.

Al contrario, la firma energetica si basa su un modello di regressione, che smorza le anomalie e restituisce una stima più robusta del comportamento reale del sistema edificio-impianto. Per questo motivo, la firma energetica fornisce una stima più realistica, mentre il metodo dei GG risulta più sensibile alla dispersione dei dati, sovrastimando i risparmi energetici.

Alla luce dei risultati ottenuti, si è scelto di assumere come riferimento il modello di baseline costruito tramite la firma energetica. Di conseguenza, i risparmi energetici considerati per la valutazione dell'efficacia degli interventi di riqualificazione, che costituiranno la base per le successive analisi, risultano pari a:

- 15.238 Nm^3 e 4,07 Nm^3/m^2 per il condominio Blu;
- 10.535 Nm^3 e 4,18 Nm^3/m^2 per il condominio Arancione;
- 2.835 Nm^3 e 3,16 Nm^3/m^2 per il condominio Verde.

Condominio	Risparmio assoluto di RSC [Nm^3]	Risparmio assoluto di ACS [Nm^3]	Risparmio assoluto totale [Nm^3]	Risparmio specifico totale [Nm^3/m^2]	Risparmio totale percentuale [%]
Blu	8.809	6.429	15.238	4,07	44,19
Arancione	3.896	6.639	10.535	4,18	35,79
Verde	2.835	0	2.835	3,16	40

Tabella 5.28 - Riepilogo dei risparmi assoluti e percentuali per i diversi interventi, utilizzando la firma energetica.

Per confrontare l'efficacia degli interventi nei tre condomini in maniera oggettiva, neutralizzando l'effetto delle diverse dimensioni, i risparmi sono stati rapportati alla superficie utile riscaldata, ottenendo un valore di risparmio specifico espresso in Nm^3/m^2 . Questo consente di valutare l'efficienza degli interventi a parità di scala.

In **Tabella 5.28** si può osservare che il risparmio specifico ottenuto nel condominio Verde risulta essere di circa $1 \text{ Nm}^3/\text{m}^2$ inferiore rispetto a quanto registrato nei condomini Blu e Arancione. Tale scostamento è dovuto alla diversa natura degli interventi eseguiti: nel condominio Verde è stato effettuato solo un intervento sull'involucro, mentre negli altri due casi sono stati realizzati anche interventi impiantistici, che hanno inciso in maniera maggiore sui risparmi energetici. Inoltre, nel condominio Verde si partiva già da valori di consumi molto bassi.

Il condominio Blu ha beneficiato di una riqualificazione completa, che ha interessato sia l'involucro edilizio che il sistema impiantistico. Al contrario, nel condominio Arancione gli interventi sull'involucro sono stati limitati, mentre è stata eseguita una riqualificazione sostanziale dell'impianto.

In modo inaspettato, è proprio il condominio Arancione a registrare i migliori risultati specifici in termini di risparmio, superando anche il condominio Blu. Questa prestazione superiore può essere giustificata dal fatto che, nel caso del condominio Arancione, la caldaia pre-retrofit aveva un rendimento molto basso, pari all'87%, mentre nel condominio Blu il generatore era già ad alta efficienza, e pari al 96%. Pertanto, i margini di risparmio specifici maggiori sono stati ottenuti con il condominio Arancione. Tra le possibili cause di questo risultato si possono aggiungere anche un sistema di regolazione più efficiente e un miglior controllo dell'impianto nel periodo post-intervento, che possono aver contribuito ad un incremento dell'efficienza complessiva.

5.5 Valutazione dei risparmi di energia elettrica

Dopo aver quantificato il risparmio energetico relativo al vettore gas naturale mediante l'approccio della firma energetica, in questo capitolo si effettua un'analisi estesa al vettore energia elettrica. Tale valutazione risulta fondamentale per il condominio Blu e il condominio Arancione, in quanto gli interventi di riqualificazione energetica hanno previsto l'installazione di impianti fotovoltaici e di pompe di calore. L'introduzione di tali tecnologie ha comportato infatti, una modifica nell'assorbimento dei consumi elettrici del sistema edificio-impianto, e pertanto è necessaria un'analisi che consideri anche i consumi dovuti alla nuova configurazione impiantistica. L'obiettivo è di valutare il contributo del vettore energia elettrica al risparmio complessivo di energia primaria non rinnovabile.

Diversamente, per quanto riguarda il condominio Verde, l'analisi dei consumi elettrici non verrà effettuata. In tale edificio, infatti, non sono stati eseguiti interventi sull'impianto, né sulla generazione del calore, né sui sistemi elettrici ausiliari. Si è quindi assunto che i consumi elettrici rimangano invariati rispetto alla situazione pre-retrofit. Di conseguenza i risparmi energetici totali attribuibili al condominio Verde riguarderanno esclusivamente il vettore gas naturale, dovuto alla riduzione dei fabbisogni termici per il riscaldamento, grazie alla realizzazione degli interventi di miglioramento dell'involucro edilizio.

L'obiettivo principale è quello di stimare, neutralizzando l'effetto delle condizioni esterne, il risparmio di energia elettrica ottenuto a seguito degli interventi. A tal fine, è stato adottato un approccio basato sulla definizione di una baseline di riferimento, costruita a partire dai dati di consumo elettrico reale pre-retrofit riferiti all'anno precedente alla realizzazione dei lavori, rilevati mensilmente sia per quanto riguarda gli usi comuni (illuminazione delle parti comuni e ascensori) che per la centrale termica. I valori sono stati ottenuti dai consumi effettivi riportati nelle bollette nello stesso anno per tutti i condomini considerati (2020-2021).

Invece, i valori dei consumi elettrici post-intervento sono stati ricavati da misure effettuate direttamente sui contatori di energia elettrica, relativi all'anno che va da ottobre 2023 a settembre 2024. Per i condomini Blu e Arancione è stato possibile distinguere i consumi elettrici mensili tra usi comuni, centrale termica e pompa di calore e produzione dell'impianto fotovoltaico. La variazione dei consumi elettrici nel periodo post-retrofit risulta influenzata da diversi fattori. In primo luogo, l'introduzione della pompa di calore ha comportato un aumento dell'assorbimento elettrico rispetto alla configurazione originaria, sebbene il suo funzionamento reale si sia rivelato notevolmente inferiore alle previsioni iniziali di progetto. Inoltre, la sostituzione dei generatori di calore con caldaie più efficienti ha comportato una riduzione dell'assorbimento elettrico degli ausiliari di impianto. Per quanto riguarda il condominio Blu, è stato eliminato il sistema ad autoclave, impiegato per garantire la pressurizzazione e il sollevamento dell'acqua nei piani superiori. Tale sistema è stato sostituito da pompe con inverter a regolazione modulante, che permettono un funzionamento più efficiente e adattativo alle reali esigenze dell'edificio. Questo intervento ha comportato una significativa riduzione dei consumi elettrici.

Ulteriormente, è stato installato un impianto fotovoltaico in entrambi i casi analizzati, con l'obiettivo di contribuire alla copertura dei consumi attraverso l'autoproduzione di energia elettrica da fonte rinnovabile. La strategia di dimensionamento adottata per gli impianti fotovoltaici è stata quella della massimizzazione dell'autoconsumo, piuttosto che alla cessione dell'energia in eccesso alla rete elettrica. Tale approccio risulta più vantaggioso dal punto di vista economico, in quanto consente di ridurre direttamente i prelievi dalla rete, ottimizzando il ritorno sull'investimento.

◆ **Neutralizzazione della radiazione solare**

Per valutare correttamente il risparmio effettivo derivante dal fotovoltaico, è stato necessario sviluppare un metodo di normalizzazione rispetto alla radiazione solare, al fine di neutralizzare l'effetto del sole e determinare un valore di risparmio che sia consistente, indipendentemente dalle condizioni meteorologiche dell'anno di misura.

A tal proposito, la radiazione solare globale orizzontale media mensile, rilevata da ARPA per la centralina localizzata a Sant'Osvaldo, a pochi chilometri di distanza dai condomini oggetto di studio, nell'anno 2023-2024, è stata utilizzata per ricavare il fattore di normalizzazione.

Tale valore è stato convertito in radiazione incidente sul piano inclinato dei moduli fotovoltaici mediante l'applicazione di un modello semplificato previsto dalla norma UNI/TR 11328-1 del 2009. I parametri utilizzati per valutare la radiazione incidente includono l'inclinazione del pannello fotovoltaico rispetto al piano orizzontale, l'orientamento rispetto al sud, il coefficiente di riflettanza (albedo) e, i valori della radiazione solare globale sul piano orizzontale definita dalla 10349-2 del 2016, per la località di Udine. Sfruttando questi dati e il

modello di Edilclima per i due condomini, è stata ricavata la radiazione solare reale effettivamente misurata, incidente sul piano dei moduli per ciascun mese. Facendo il rapporto tra la radiazione solare globale incidente definita dal modello in condizioni standard e quella reale appena calcolata, è stato possibile definire un fattore di correzione per ciascun mese, con il quale si è potuta stimare la producibilità elettrica dell'impianto FTV normalizzata rispetto a condizioni standard di irraggiamento.

◆ **Calcolo del risparmio di energia elettrica**

Al fine di valutare in modo accurato il risparmio di energia elettrica per ciascun mese dell'anno, è stato effettuato un bilancio elettrico mensile dell'edificio partendo dalle misurazioni, calcolando poi l'energia elettrica assorbita dalla rete, quella autoprodotta e infine quella in surplus venduta in rete. In mancanza di misure orarie dell'energia prodotta dall'impianto FTV e di quella consumata complessivamente, è stato ipotizzato, in modo conforme all'approccio semplificato della norma UNI/TS 11300 parte 4 e 5, che tutta l'energia prodotta venga autoconsumata fino a copertura dei consumi della centrale termica, degli usi comuni e della pompa di calore. In conformità con la configurazione dei contatori elettrici presenti nei condomini analizzati e i limiti del Superbonus, l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico può essere destinata esclusivamente alla copertura dei consumi della pompa di calore, della centrale termica e degli usi comuni. Quando la produzione fotovoltaica supera il fabbisogno istantaneo di questi componenti, l'energia in eccesso non può essere autoconsumata all'interno dell'edificio e viene immessa nella rete elettrica.

Proprio da questa considerazione emerge che, probabilmente, effettuando un bilancio elettrico su base oraria, la stima dell'autoconsumo risulta sovrastimata. Questo perché, aggregando i dati su un intervallo temporale così ampio, non si tiene conto delle effettive dinamiche temporali tra produzione fotovoltaica e fabbisogno elettrico, come ad esempio le variazioni giornaliere e orarie negli assorbimenti elettrici, e le differenze della produzione del FTV tra il giorno e la notte. Una valutazione più rappresentativa dell'autoconsumo richiederebbe un'analisi con risoluzione almeno sub-oraria (ad esempio ogni 15 minuti), in grado di cogliere i reali andamenti di produzione e consumo elettrico. Tale approccio permetterebbe di stimare con una precisione maggiore l'energia elettrica effettivamente autoconsumata e quella prelevata dalla rete. Questa valutazione non è stata ritenuta necessaria poiché, grazie all'installazione di sistemi di accumulo elettrico, pari a 10 kWh per il condominio Blu e 20 kWh per quello Arancione, è possibile utilizzare l'energia prodotta dall'impianto FTV anche nei momenti in cui non vi è produzione; naturalmente non si riesce a raggiungere valori di autosufficienza del 100% ma si va abbastanza vicini. L'accumulo è stato dimensionato in modo da garantire un utilizzo continuo dell'energia rinnovabile anche quando questa non produce.

Inoltre, sono stati calcolati i valori dell'autoconsumo e dell'autosufficienza. L'autoconsumo rappresenta la quota dell'energia prodotta dal fotovoltaico che viene utilizzata direttamente all'interno dell'edificio, ed è stato calcolato come rapporto tra l'energia autoconsumata e la produzione totale dell'impianto, espresso in percentuale. I risultati mostrano un valore del 53,71% per il condominio Blu e del 41,61% per il condominio Arancione. L'autosufficienza, invece, misura quanto i consumi elettrici complessivi dell'edificio vengono coperti dalla produzione fotovoltaica autoconsumata. È stata calcolata come rapporto tra l'autoconsumo e i

consumi totali, anch'esso espresso in percentuale. In questo caso, si è ottenuto un valore del 78,02% per il condominio Blu e del 95,2% per il condominio Arancione.

Si osserva, in entrambi i casi, che l'autosufficienza è maggiore dell'autoconsumo. Di seguito si riportano i risultati ottenuti per le baseline di riferimento dei consumi elettrici nelle situazioni pre e post-retrofit. In **Tabella 5.29** e **5.30** si può osservare una riduzione significativa dei consumi elettrici associati alla centrale termica nel periodo post-retrofit. Questo risultato è attribuibile all'eliminazione dell'autoclave, di un boiler elettrico e alla sostituzione dei generatori di calore con caldaie a condensazione più performanti, che presentano un assorbimento degli ausiliari molto minore rispetto alla configurazione precedente.

Analizzando invece i dati di produzione dell'impianto fotovoltaico (**Tabelle 5.31** e **5.34**), si può osservare come, dopo la normalizzazione in funzione della radiazione solare globale reale, la producibilità elettrica normalizzata risulta molto simile a quella effettivamente misurata durante l'anno 2023-2024, con una differenza in entrambi i casi di circa l'1%. Questo è dovuto al fatto che le condizioni di irraggiamento reale, registrate da ARPA, non si discostano di molto dai valori medi forniti dalla norma UNI 10349.

Infine, un aspetto di particolare rilievo riguarda i consumi elettrici associati alla pompa di calore (**Tabelle 5.30** e **5.33**). L'energia assorbita risulta inferiore rispetto a quanto stimato in fase di progetto. Questa differenza può essere attribuita a criticità impiantistiche legate alla configurazione dell'impianto. In particolare, in entrambi i condomini la pompa di calore è collegata a un unico accumulo inerziale di tipo puffer, condiviso con la caldaia. Questo accumulo viene utilizzato anche per la produzione di ACS, comportando temperature dell'accumulo molto elevate, soprattutto nei mesi invernali (fino a 70 °C). Considerando che la temperatura massima di esercizio della pompa di calore è di 50-55 °C, essa risulta spesso esclusa dal funzionamento a causa del superamento del proprio limite operativo. Tale condizione limita fortemente il contributo della pompa di calore, che riesce a funzionare solo per poche ore al giorno o in fasce di carico termico ridotto. Inoltre, ad aggravare la situazione sono i terminali di emissione ad alta temperatura (termosifoni), presenti all'interno delle abitazioni. Sarebbe consigliabile sostituire tali terminali con quelli a bassa temperatura come i pavimenti radianti.

In **Tabella 5.30** si osserva come i consumi di energia elettrica per usi comuni, nel periodo post-retrofit, risultino aumentati di circa il 25% rispetto all'anno precedente agli interventi. Considerando che il tasso di occupazione del condominio è rimasto pressoché invariato, è plausibile che gli utenti, consapevoli della presenza dell'impianto fotovoltaico e quindi della disponibilità di energia da fonte rinnovabile, abbiano modificato le proprie abitudini aumentando inconsapevolmente i consumi, confidando in un impatto ambientale minore. Questo fenomeno è noto come "*Rebound effect*" ed è tipico dei contesti di riqualificazione energetica.

Baseline dei consumi di energia elettrica pre-retrofit			
Mese	Usi comuni [kWh _d]	Consumi C.T. [kWh _d]	Consumi totali [kWh _d]
Ottobre	343	1.505	1.848
Novembre	328	1.537	1.865
Dicembre	357	1.698	2.055
Gennaio	344	1.703	2.047
Febbraio	334	1.523	1.857
Marzo	323	1.641	1.964
Aprile	312	1.547	1.859
Maggio	322	1.418	1.740
Giugno	296	1.413	1.709
Luglio	294	1.374	1.668
Agosto	310	1.386	1.696
Settembre	325	1.350	1.675
Totale anno	3.888	18.095	21.983

Tabella 5.29 - Consumi di energia elettrica pre-retrofit, condominio Blu.

Baseline dei consumi di energia elettrica post-retrofit				
Mese	Usi comuni [kWh _d]	Consumi C.T. [kWh _d]	Consumi PDC [kWh _d]	Consumi totali [kWh _d]
Ottobre	423	209	485	1.116
Novembre	408	253	303	964
Dicembre	437	256	110	803
Gennaio	424	251	0	675
Febbraio	414	242	0	656
Marzo	403	250	0	653
Aprile	392	200	0	592
Maggio	402	149	161	712
Giugno	376	155	90	621
Luglio	374	132	0	506
Agosto	390	133	43	566
Settembre	405	171	344	921
Totale anno	4.848	2.401	1.536	8.785

Tabella 5.30 - Consumi di energia elettrica post-retrofit, condominio Blu.

Bilancio mensile di energia elettrica post-retrofit					
Mese	Consumi totali [kWh _d]	Produzione FTV normalizzata [kWh _d]	Autoconsumo [kWh _d]	Fabbisogno da rete [kWh _d]	Surplus venduto [kWh _d]
Ottobre	1.116	738	738	378	0
Novembre	964	375	375	589	0
Dicembre	803	285	285	518	0
Gennaio	675	336	336	339	0
Febbraio	656	549	549	107	0
Marzo	653	955	653	0	302
Aprile	592	1.191	592	0	599
Maggio	712	1.813	712	0	1.101
Giugno	621	1.887	621	0	1.266
Luglio	506	1.763	506	0	1.257
Agosto	566	1.614	566	0	1.048
Settembre	921	1.254	921	0	333
Totale anno	8.785	12.760	6.854	1.931	5.906

Tabella 5.31 - Bilancio mensile di energia elettrica post-retrofit, condominio Blu.

Baseline dei consumi di energia elettrica pre-retrofit			
Mese	Usi comuni [kWh _{el}]	Consumi C.T. [kWh _{el}]	Consumi totali [kWh _{el}]
Ottobre	198	492	690
Novembre	187	641	828
Dicembre	223	624	847
Gennaio	218	538	756
Febbraio	198	463	661
Marzo	188	492	680
Aprile	174	386	560
Maggio	186	291	477
Giugno	177	267	444
Luglio	183	265	448
Agosto	179	255	434
Settembre	183	261	444
Totale anno	2.294	4.975	7.269

Tabella 5.32 - Consumi di energia elettrica pre-retrofit, condominio Arancione.

Baseline dei consumi di energia elettrica post-retrofit				
Mese	Usi comuni [kWh _{el}]	Consumi C.T. [kWh _{el}]	Consumi PDC [kWh _{el}]	Consumi totali [kWh _{el}]
Ottobre	198	397	85	680
Novembre	187	505	79	771
Dicembre	223	507	85	815
Gennaio	218	496	83	797
Febbraio	198	482	76	756
Marzo	188	491	86	765
Aprile	174	372	90	636
Maggio	186	251	94	531
Giugno	177	213	145	535
Luglio	183	153	152	488
Agosto	179	157	148	484
Settembre	183	228	168	579
Totale anno	2.294	4.252	1.290	7.836

Tabella 5.33 - Consumi di energia elettrica post-retrofit, condominio Arancione.

Bilancio mensile di energia elettrica post-retrofit					
Mese	Consumi totali [kWh _{el}]	Produzione FTV normalizzata [kWh _{el}]	Autoconsumo [kWh _{el}]	Fabbisogno da rete [kWh _{el}]	Surplus venduto [kWh _{el}]
Ottobre	680	1184	680	0	504
Novembre	771	697	697	75	0
Dicembre	815	605	605	209	0
Gennaio	797	704	704	92	0
Febbraio	756	937	756	0	181
Marzo	765	1359	765	0	594
Aprile	636	1457	636	0	821
Maggio	531	2289	531	0	1.758
Giugno	535	2318	535	0	1.782
Luglio	488	2259	488	0	1.772
Agosto	484	2283	484	0	1.800
Settembre	579	1835	579	0	1.257
Totale anno	7.836	17.928	7.460	376	10.468

Tabella 5.34 - Bilancio mensile di energia elettrica post-retrofit, condominio Arancione.

Il risparmio netto di energia elettrica è stato calcolato come differenza tra il consumo elettrico effettivo pre e post-retrofit, considerando anche la quota di energia prodotta dal fotovoltaico e autoconsumata (fabbisogno da rete effettivo). In mancanza di misure orarie e sub-orarie dell'energia autoconsumata e dell'energia assorbita dalla rete, è stato ipotizzato, in modo ottimistico e conforme all'approccio semplificato della norma UNI/TS 11300-5, che tutta l'energia prodotta venga autoconsumata fino a copertura dei consumi della centrale termica e degli usi comuni (ipotesi che si può considerare corretta vista la presenza di accumuli elettrici). In **Tabella 5.35** sono riportati i principali risultati dei risparmi ottenuti sia per il condominio Blu che per quello Arancione.

Condominio	Risparmio assoluto di E_d [kWh _d]	E_d autoconsumata [kWh _d]	E_d immessa in rete [kWh _d]	Risparmio percentuale di E_d [%]
Blu	20.052	6.854	5.906	91,22
Arancione	6.893	7.460	10.468	94,83

Tabella 5.35 - Riepilogo dei risparmi assoluti e percentuali di energia elettrica.

5.6 Valutazione complessiva dei risparmi di energia primaria non rinnovabile

La normativa UNI/TS 11300 e le linee guida predisposte dalla Commissione europea vengono applicate per stimare il risparmio di energia primaria non rinnovabile, conseguente agli interventi di riqualificazione energetica realizzati sui tre edifici condominiali. L'**Equazione 3.13** viene sfruttata per valutare i risparmi di energia primaria non rinnovabile REP, complessivo delle diverse fonti energetiche utilizzate: il gas naturale e l'energia elettrica prelevata da rete.

In particolare, per ciascun condominio analizzato, il risparmio assoluto di gas naturale è stato determinato mediante l'utilizzo della firma energetica. Tale risparmio, espresso in Nm³, è stato convertito in energia primaria non rinnovabile, moltiplicandolo per il potere calorifico inferiore del gas (9,94 kWh/Nm³) e il fattore di conversione in energia primaria non rinnovabile previsto dal DM 26/06/2015, e pari a 1,05.

Successivamente, è stato aggiunto il contributo del risparmio ottenuto per il vettore energia elettrica, moltiplicando l'energia risparmiata, in kWh_{el} per il relativo fattore di conversione in energia primaria non rinnovabile nel caso di prelievo da rete, pari a 1,95. La somma dei contributi dei due vettori ha permesso di ottenere il risparmio complessivo in energia primaria non rinnovabile REP_{nr}. Il risparmio effettivo di energia primaria non rinnovabile è stato determinato esclusivamente sulla base della riduzione dei consumi di gas naturale e di energia elettrica, considerando solo l'autoconsumo dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico. Visto che l'energia elettrica prodotta da FTV presenta un fattore di conversione in energia primaria non rinnovabile pari a zero, il surplus esportato in rete non contribuisce al risparmio di energia primaria non rinnovabile dell'edificio.

Come già affermato, nei condomini Blu e Arancione sono stati considerati i risparmi relativi sia al vettore gas naturale che al vettore energia elettrica. Al contrario, nel condominio Verde, in cui non sono stati realizzati interventi sugli impianti, e non è stato installato un impianto FTV, i risparmi sono attribuibili esclusivamente alla riduzione del fabbisogno di gas naturale.

In **Tabella 5.36** vengono presentati i risultati ottenuti: il risparmio di energia primaria non rinnovabile, espresso in MWh è stato calcolato sia utilizzando i dati reali di consumo (REP_{nr} reale), neutralizzando rispetto le condizioni climatiche, sia applicando l'approccio basato sugli APE convenzionali di progetto (REP_{nr} con APE), secondo la metodologia prevista nel **Capitolo 3.5**.

Dal confronto tra i due metodi si osserva come, nel caso in cui si fosse eseguita un'analisi basata esclusivamente sui dati derivati dall'APE pre, dall'APE post e dai consumi reali pre-retrofit, i risparmi in energia primaria non rinnovabile sarebbero risultati notevolmente superiori rispetto a quelli ottenuti utilizzando i dati di consumo reali. Ciò evidenzia la presenza di un divario prestazionale tra la fase di progetto e l'as-built.

Condominio	REP_{nr} reale [MWh/anno]	REP_{nr} stimato con APE [MWh/anno]	REP_{nr} specifico reale [kWh/anno m ²]	Emissioni di CO ₂ evitate [ton/anno]	Emissioni di CO ₂ evitate [Kg/anno m ²]
Blu	198,14	278,63	52,94	41,03	10,96
Arancione	123,40	146,66	49,01	25,16	9,99
Verde	29,59	43,92	32,94	5,92	6,59

Tabella 5.36 - Stima dei risparmi di energia primaria, specifici ed emissioni di CO₂ evitate.

◆ Risparmi di energia primaria non rinnovabile

In **Tabella 5.36** è riportato anche il risparmio di energia primaria non rinnovabile specifico per unità di superficie utile riscaldata, espresso in kWh/m² anno, al fine di eliminare l'effetto scala legato alla diversa dimensione degli edifici e permettere un confronto più oggettivo. I valori ottenuti sono: 52,94 per il condominio Blu, 49,01 per l'Arancione e 32,94 per il Verde.

Il valore più elevato nel condominio Blu è giustificato dal fatto che l'intervento è stato notevole sia sull'involucro edilizio che sull'impianto. Un valore simile viene riportato per il condominio Arancione, pur in presenza di interventi limitati sull'involucro. Questo potrebbe essere attribuibile al fatto che precedentemente ai lavori, il rendimento globale stagionale sia per il RSC che per l'ACS, presentava dei valori molto bassi, inoltre nel condominio Arancione la temperatura di accensione dell'impianto è aumentata, ma di meno rispetto a quanto accaduto per quello Blu, soprattutto considerando che, in questo caso le opere di isolamento sono minime. Il valore di REP_{nr} specifico inferiore del condominio Verde riflette un intervento limitato al solo involucro edilizio, senza riqualificazione della centrale termica.

◆ Emissioni di CO₂ evitate

Sono inoltre riportate le emissioni di CO₂ evitate, espresse in tonnellate annue, calcolate a partire dal risparmio di gas naturale e di energia elettrica prelevata dalla rete, considerando esclusivamente la quota di energia autoconsumata proveniente dall'impianto FTV. Per il calcolo sono stati adottati i fattori di emissione di CO₂ in atmosfera, pari a 0,46 kg di CO₂ per kWh di energia elettrica prelevata da rete, e, 2,08743 kg di CO₂ per Nm³ di gas naturale consumato. Tali valori sono coerenti con le indicazioni nazionali per la valutazione delle emissioni e con il software Edilclima.

L'energia prodotta in eccesso dall'impianto FTV ed esportata in rete non è stata inclusa, in quanto il bilancio ambientale è condotto dal punto di vista dell'edificio, limitatamente alle

emissioni evitate in loco. Qualora però si considerasse anche l'energia esportata e venduta in rete, i valori totali di CO₂ evitata risulterebbero pari a 43,75 ton/anno per il condominio Blu e 29,98 ton/anno per l'Arancione, evidenziando come le valutazioni resterebbero molto simili.

Il confronto tra i risparmi specifici di CO₂ per unità di superficie utile riscaldata conferma che il condominio Blu presenta le emissioni evitate più elevate, seguito a breve distanza dall'Arancione, mentre il condominio Verde mostra valori inferiori, coerenti con l'entità più limitata degli interventi effettuati e delle dimensioni geometriche degli stessi.

◆ **Analisi dello scostamento tra prestazioni reali e attese: un confronto con gli studi del Superbonus 110%**

In *Tabella 5.37* sono riportati i principali risultati emersi dal confronto tra le prestazioni energetiche attese, calcolate sulla base degli APE, e i risultati ottenuti tramite l'analisi dei consumi effettivamente misurati nei tre casi studio.

Numerosi studi condotti da Nomisma e da GabettiLab, hanno basato le valutazioni teoriche degli effetti del Superbonus 110% sugli APE, stimando i risparmi energetici e ambientali conseguibili a seguito degli interventi di riqualificazione.

Per assicurare coerenza metodologica, anche nella presente analisi è stata effettuata una valutazione basata sugli APE dei tre condomini residenziali. I risultati ottenuti risultano sostanzialmente allineati con quanto emerso negli studi citati: il valore medio teorico di riduzione del fabbisogno di energia primaria non rinnovabile è pari al 50,4%, mentre la riduzione media delle emissioni di CO₂ risulta pari al 48,26%. Tali stime sono molto vicine a quelle riportate da Nomisma e GabettiLab, che indicano un risparmio medio del 53% per l'energia e del 51% per le emissioni di CO₂.

Diversamente, i risultati derivanti dall'analisi dei consumi reali mostrano un'efficacia inferiore degli interventi. In particolare, il risparmio medio di energia primaria non rinnovabile, è pari al 37,03%, mentre quello relativo alle emissioni di CO₂ si attesta al 37,45%. Ne consegue uno scostamento medio di circa 13 punti percentuali in meno per il risparmio di energia primaria non rinnovabile e 11 punti percentuali in meno per il risparmio di CO₂ rispetto alle stime teoriche ottenute tramite gli APE.

Analizzando i singoli interventi, emerge che il condominio Arancione presenta una migliore coerenza tra risultati teorici e reali. Al contrario, nei condomini Blu e Verde si osservano differenze maggiori, a conferma della variabilità tra prestazioni previste in fase progettuale e risultati reali ottenuti in esercizio.

Condominio	Consumo di $E_{pre-retrofit}$ [MWh/anno]	REP _{nr} stimato con APE [MWh/anno]	REP _{nr} reale [MWh/anno]	Risparmio % di E_{pre} stimato	Risparmio % di E_{pre} reale
Blu	457,29	278,63	198,14	60,93	43,33
Arancione	354,69	146,66	123,40	41,35	34,79
Verde	89,77	43,92	29,59	48,93	32,96
Condominio	Emissioni reali pre-retrofit [ton/anno]	Risparmio di CO ₂ stimato con APE [ton/anno]	Risparmio di CO ₂ reale [ton/anno]	Risparmio % di CO ₂ stimato	Risparmio % di CO ₂ reale
Blu	93	53,86	41,03	57,91	44,12
Arancione	71,36	27,09	25,16	37,96	35,26
Verde	17,95	8,78	5,92	48,91	32,98

Tabella 5.37 - Confronto tra risparmi energetici e ambientali stimati tramite APE e reali misurati.

5.7 Performance gap

Successivamente alla valutazione del REP_{nr}, si procede a una valutazione della prestazione energetica dell'edificio post-intervento basata sui consumi reali mensili, normalizzati rispetto all'effetto del clima sia in termini di temperatura esterna per i consumi di RSC sia in termini di radiazione solare per la produzione fotovoltaica, in modo da concentrare l'analisi sull'influenza che hanno le condizioni d'uso effettive sui consumi.

L'obiettivo è di determinare la prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio in modo da determinare la classe energetica dell'edificio in condizioni operative reali. Questo approccio consente di valutare il performance gap, ossia la differenza tra le prestazioni previste in fase progettuale e quelle realmente misurate nella fase post-retrofit.

Al fine di valutare il divario è stato effettuato un confronto tra i valori di progetto post-retrofit, presi da APE, e quelli derivati dai consumi reali normalizzati nelle stesse condizioni post-intervento.

Per un'analisi completa del performance gap sono stati valutati i comportamenti di diversi indicatori energetici presentati in **Tabella 5.38**, in particolare:

- Indice di prestazione energetica globale non rinnovabile EP_{gl, nren};
- Indice di prestazione energetica globale rinnovabile EP_{gl, ren};
- Classe energetica reale stimata, ricavata a fini comparativi, non valida per la certificazione;
- Quota di energia da fonti rinnovabili QR;
- Rendimento globale medio stagionale rispetto all'energia primaria non rinnovabile, sia per il servizio di riscaldamento che per quello di produzione di acqua calda sanitaria.

Per i condomini Blu e Arancione, sono state valutati i rendimenti stagionali per entrambi i servizi (RSC e ACS), mentre per il condominio Verde, in cui la produzione di ACS avviene in modo autonomo per ogni unità abitativa, è stata eseguita esclusivamente la valutazione del rendimento del servizio di RSC.

In **Tabella 5.38** è possibile valutare i divari prestazionali tra le condizioni di progetto post-retrofit e quelle effettivamente riscontrate in esercizio nell'anno 2023-2024, sulla base dei consumi energetici reali normalizzati tramite i GG mensili. Considerando come riferimento i valori di progetto, si osserva un aumento dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile EP_{gl, nren}, nei tre casi considerati. Infatti:

- nel condominio Blu: + 49,05%;
- nel condominio Arancione: + 28,66%;
- nel condominio Verde: + 16,37%.

Questi risultati evidenziano una condizione di under-performance, in quanto i fabbisogni di energia primaria non rinnovabile risultano superiori rispetto a quanto previsto in fase progettuale.

Per quanto riguarda l'indice di prestazione energetica globale rinnovabile $EP_{gl, ren}$, si osserva una diminuzione di circa l'80% nei condomini Blu e Arancione, dovuto principalmente ad un utilizzo della pompa di calore molto inferiore rispetto alle ipotesi iniziali. Il condominio Verde, privo di interventi impiantistici, mostra invece una variazione nulla.

La classe energetica ipotetica, ricalcolata sulla base dei consumi reali e delle condizioni d'uso effettive, risulta generalmente inferiore rispetto a quella certificata in fase post-intervento, infatti:

- nel condominio Blu: da A2 a A1;
- nel condominio Arancione: da B a C;
- nel condominio Verde: rimane B.

L'APE, redatto secondo il calcolo semi-stazionario e la normativa UNI/TS 11300, è uno strumento utile che consente un confronto omogeneo tra edifici diversi, a parità di condizioni al contorno.

Tuttavia, questa standardizzazione costituisce un limite quando si vuole valutare l'efficacia reale degli interventi di riqualificazione energetica. L'APE, infatti, non tiene conto del design inappropriato, dei comportamenti effettivi degli occupanti, delle temperature di set-point interne, degli orari di accensione degli impianti, degli usi dell'acqua calda sanitaria etc... Per questo motivo, è stata calcolata una classe energetica fittizia basata sui consumi reali normalizzati rispetto al clima con un uso reale, senza voler sostituire l'APE ufficiale, ma con l'obiettivo di evidenziare lo scostamento tra prestazioni previste e reali. Si conclude che l'APE è uno strumento utilissimo per il confronto tra edifici, ma non è adatto per stimare i risparmi energetici realmente ottenuti a seguito di interventi di efficientamento. A tal fine, è preferibile ricorrere a dati misurati reali normalizzati, che permettano di isolare il comportamento dell'edificio in condizioni d'uso effettive.

La quota di energia da fonti rinnovabili QR tende a diminuire in tutti e tre i casi, soprattutto nei condomini Blu e Arancione, dove il calo per entrambi è di circa l'80%.

Infine, anche i rendimenti globali medi stagionali, sia per il sistema di riscaldamento che per quello di produzione di ACS, risultano inferiori rispetto alle ipotesi di progetto, confermando una gestione impiantistica reale meno efficiente di quella stimata. Tutti gli indicatori energetici considerati si trovano in condizioni di under-performance rispetto al progetto.

Performance gap - Condominio Blu				
Indicatore	Pre-retrofit da APE	Post-retrofit da APE	Post-retrofit usi reali	Performance gap [%]
EP _{gl, nren} [kWh/m ² anno]	119,75	48,58	72,41	+ 49,05
EP _{gl, ren} [kWh/m ² anno]	2,10	38,21	7,23	- 81,08
Classe energetica	D	A2	A1	/
Quota rinnovabile QR [%]	1,73	44,05	9,08	- 79,39
η _{H, g, p, nren} [%]	78,6	130,4	83,21	- 36,19
η _{W, g, p, nren} [%]	50,1	196,60	106,68	- 45,74
Performance gap - Condominio Arancione				
Indicatore	Pre-retrofit da APE	Post-retrofit da APE	Post-retrofit usi reali	Performance gap [%]
EP _{gl, nren} [kWh/m ² anno]	134,88	70,79	91,08	+ 28,66
EP _{gl, ren} [kWh/m ² anno]	0,35	38,15	7,69	- 79,84
Classe energetica	E	B	C	/
Quota rinnovabile QR [%]	0,26	35,02	7,79	- 77,76
η _{H, g, p, nren} [%]	68,3	120,5	90,03	- 25,29
η _{W, g, p, nren} [%]	46,9	81,50	71,95	- 11,72
Performance gap - Condominio Verde				
Indicatore	Pre-retrofit da APE	Post-retrofit da APE	Post-retrofit usi reali	Performance gap [%]
EP _{gl, nren} [kWh/m ² anno]	147,24	81,48	94,82	+ 16,37
EP _{gl, ren} [kWh/m ² anno]	5,15	4,04	4,04	0
Classe energetica	D	B	B	/
Quota rinnovabile QR [%]	3,38	4,72	4,09	- 13,35
η _{H, g, p, nren} [%]	81,8	87,2	68,4	- 21,56

Tabella 5.38 - Valutazione del performance gap per diversi indicatori, nel caso di post-retrofit.

La principale causa del performance gap è riconducibile ad una discrepanza tra il funzionamento previsto e quello effettivo degli impianti, in particolare delle pompe di calore; le quali nel condominio Blu e in quello Arancione risultano operare un numero di ore trascurabile rispetto a quanto previsto in fase di progetto. Nello specifico, nel condominio Blu la pompa di calore assorbe solo il 3,7% dell'energia elettrica attesa da progetto, mentre nel condominio Arancione il 4,21% (anche se per grande parte del tempo è un assorbimento elettrico senza produzione di energia termica), determinando così un forte incremento del contributo da fonte fossile rispetto alle ipotesi iniziali. Per questo motivo i valori di EP_{gl, nren} reali sono notevolmente superiori: è necessario un consumo di gas naturale maggiore rispetto a quanto progettato.

Nelle centrali termiche del condominio Blu e Arancione è stato installato in entrambi i casi, un accumulo inerziale di tipo puffer, a servizio contemporaneo sia delle caldaie a condensazione sia della pompa di calore. La produzione di acqua calda sanitaria avviene attraverso uno scambiatore di calore collegato in serie al puffer. Sebbene la temperatura di mandata all'utenza prevista sia pari a 48 °C; le perdite di scambio termico, di accumulo e di distribuzione impongono che la temperatura di accumulo nel puffer sia ben al di sopra dei 48 °C, molto spesso oltre i 55 °C (temperatura di cut-off della pompa di calore). Poiché quest'ultima non può

operare in modo efficiente oltre quella temperatura, il sistema ibrido privilegia il funzionamento delle caldaie a condensazione, riducendo il contributo della pompa di calore. A questo si aggiunge la presenza di terminali ad alta temperatura (radiatori), che pur richiedono delle temperature di mandata inferiori rispetto a quelle pre-retrofit, grazie agli interventi di isolamento termico dell'involucro, rendono il sistema ibrido non adatto a sfruttare efficacemente la pompa di calore, la quale finisce per funzionare in modo limitato in entrambi i casi analizzati, sia nel condominio Blu che in quello Arancione. Le configurazioni impiantistiche adottate potrebbero essere più efficaci se abbinate a terminali di emissione a bassa temperatura, come i pannelli radianti. Tuttavia, sarebbe necessario anche rivedere il sistema di produzione dell'ACS, evitando che sia la caldaia che la pompa di calore alimentino lo stesso accumulo inerziale. Una soluzione potrebbe prevedere il funzionamento della pompa di calore in preriscaldamento o direttamente sul ritorno dai terminali, in modo da migliorare l'efficienza complessiva dell'impianto ibrido.

◆ Effetto rebound

Un'altra causa del performance gap energetico è attribuibile al comportamento effettivo degli occupanti, una variabile impossibile da prevedere con i software di simulazione energetica come Edilclima. Le modifiche nei comportamenti post-retrofit, rispetto a quelle ipotizzate in fase di progetto, possono incidere molto negativamente sulle prestazioni energetiche dell'edificio ^[42]. In particolare, si osserva il fenomeno noto come effetto rebound, ovvero l'aumento dei consumi energetici in seguito a un intervento di ristrutturazione importante, dovuto al fatto che gli occupanti, ottenendo un risparmio economico, aumentano le proprie condizioni di comfort, incrementando i consumi. Questo fenomeno risulta particolarmente rilevante negli edifici plurifamiliari a basso consumo specifico ^[42].

Nel condominio Blu, dove sono stati realizzati interventi importanti sull'involucro edilizio, l'analisi delle firme energetiche ha mostrato un aumento della temperatura di equilibrio, rispetto alla situazione pre-retrofit, da circa 17 °C a circa 17,5 °C. Questo dato indica che l'impianto di RSC si attiva a temperature esterne più elevate rispetto a prima, con un conseguente aumento delle ore di funzionamento e, quindi, dei consumi. Tale conclusione è ulteriormente supportata dai risultati ottenuti mediante i questionari di post-occupazione presentati nel **Capitolo 7**. Questi confermano un aumento delle condizioni di comfort termico e della temperatura interna rispetto a quelle pre-retrofit. Lo stesso comportamento seppur in maniera più lieve è attribuibile anche al condominio Arancione.

Nel condominio Verde si osserva una traslazione rigida verso l'alto dei consumi reali rispetto a quelli di progetto, a parità di condizioni climatiche normalizzate. Sebbene in questo caso l'intervento sull'involucro ha effettivamente ridotto la temperatura di equilibrio, i consumi risultano comunque superiori a quelli previsti. Questa differenza potrebbe essere dovuta a un aumento della temperatura interna di set-point, mantenuta più alta rispetto ai 20 °C standard, e ad una sovrastima degli apporti interni gratuiti, come il calore generato dalle persone, dagli elettrodomestici o dal sole, che nella realtà potrebbe essere inferiore.

L'effetto rebound può essere sia di tipo diretto, quando gli occupanti, a seguito del retrofit, migliorano le proprie condizioni di comfort termico, aumentando la temperatura interna di set-point, sia di tipo psicologico. Quest'ultimo caso esprime la consapevolezza di utilizzare tecnologie alimentate da fonti rinnovabili e più efficienti, come gli impianti fotovoltaici, gli

impianti solari termici, le pompe di calore, e rende gli occupanti più propensi a consumare, sentendosi in qualche modo sostenibili nel farlo.

Il fenomeno opposto, noto come effetto pre-bound, tipico della fase pre-intervento, si verifica quando gli occupanti di edifici inefficienti termicamente limitano i consumi per motivi economici, mantenendo temperature interne più basse. Tuttavia, nei casi considerati questo avviene marginalmente, poiché i consumi reali pre-retrofit risultano leggermente inferiori a quelli presenti negli APE. Anche qualora fosse presente un effetto pre-bound più spinto, questo sarebbe stato comunque considerato nell'analisi, perché sia nel calcolo del risparmio di energia primaria non rinnovabile basato sui dati reali, sia in quello derivato dagli APE, il confronto è sempre stato effettuato utilizzando consumi reali pre-retrofit.

Inoltre, possono esserci ulteriori cause del divario tra prestazioni energetiche previste e reali. Tra queste rientrano:

- cicli di accensione dell'impianto diversi da quelli previsti: Edilclima assume per tutti i casi un funzionamento continuo con attenuazione notturna, mentre nella realtà l'impianto viene gestito con accensioni intermittenti, con due livelli di programmazione della temperatura nelle 24 ore;
- ricambi d'aria diversi da quelli standard: l'abitudine degli occupanti ad aprire frequentemente le finestre può incrementare le perdite termiche, aumentando i consumi energetici;
- apporti termici e solari gratuiti inferiori rispetto a quanto stimato: la normativa considera carichi interni derivanti da persone, apparecchiature, illuminazione e dal sole, spesso sovrastimati rispetto alle reali condizioni d'uso.

La difficoltà nel modellare accuratamente il comportamento reale del sistema edificio-impianto e degli occupanti evidenzia la necessità di basarsi su dati reali per valutare l'efficacia degli interventi di riqualificazione. Una possibile soluzione per ridurre il performance gap consiste nello sviluppo di modelli di comportamento più accurati, capaci di simulare la presenza degli utenti, l'apertura delle finestre e l'uso effettivo degli impianti, così da migliorare l'affidabilità delle simulazioni.

In conclusione, le principali cause del performance gap sono riconducibili sia al fenomeno dell'effetto rebound, sia a uno scostamento tra progetto e realizzazione effettiva, noto come design vs. as-built. Se non opportunamente considerati, questi fattori possono portare a una sovrastima dei risparmi energetici, in particolare quando il confronto si basa sugli APE, che assumono un comportamento d'uso standard.

La normalizzazione climatica dei dati consente di escludere in parte l'influenza delle condizioni meteorologiche, evidenziando che il divario prestazionale è legato principalmente a fattori comportamentali e impiantistici reali, non rappresentati in maniera accurata nei modelli teorici. Si dice in parte in quanto, l'approccio model-to-point consente di stimare il risparmio energetico, neutralizzando l'effetto del clima, ma non confrontandolo rispetto ad un clima standard.

Se non fossero stati presi in considerazione i consumi reali post-retrofit, il risultato avrebbe portato ad una sottovalutazione dei consumi effettivi, una sovrastima dei risparmi energetici e, di conseguenza, una valutazione ottimistica dei benefici degli interventi. Solo un'analisi basata su dati reali di consumo consente di valutare correttamente l'efficacia energetica reale degli interventi effettuati.

6. ANALISI ECONOMICA E TARATURA DELLE MISURE INCENTIVANTI

Nel presente capitolo verranno analizzati gli aspetti economici relativi agli interventi di efficientamento energetico, con particolare attenzione al quadro dei costi sostenuti e ai risparmi economici ottenuti. A tal fine, sono stati definiti tre scenari di valutazione:

- Scenario 1: intervento realizzato usufruendo del Superbonus 110%, riflettendo le reali condizioni di detrazione applicate;
- Scenario 2: intervento senza beneficiare di alcuna forma di incentivazione, in modo da valutare la sostenibilità economica in condizioni di mercato attuali;
- Scenario 3: calibrazione della misura di incentivazione in modo da rendere l'investimento attrattivo per i cittadini, ovvero tale da garantire tempi di ritorno accettabili e coerenti con una spesa affrontabile.

Per ciascuno scenario vengono calcolati i principali indicatori economici (Payback Time Attualizzato, VAN e IP), al fine di valutare la convenienza dell'investimento. In particolare, il terzo scenario intende individuare una soglia di incentivazione ottimale, basata su risparmi energetici reali post-intervento, che favorisca la diffusione di interventi anche in assenza di detrazioni molto generose come il Superbonus 110%.

6.1 Investimento iniziale e risparmio economico

Tutti i dati economici relativi ai costi di investimento per la realizzazione degli interventi di riqualificazione energetica derivano dalle asseverazioni relative allo stato finale dei lavori con avanzamento pari al 100%. Tali documenti, obbligatori ai fini dell'accesso al Superbonus, contengono gli importi economici delle spese effettivamente sostenute, corredato dai computi metrici estimativi redatti in fase consuntiva, quindi riferiti all'intervento nel suo stato effettivo finale. In conformità con il DM del 6 agosto 2020, il computo metrico estimativo è stato redatto utilizzando i prezzi regionali del Friuli-Venezia Giulia e, in alternativa laddove non era possibile, i prezzi nazionali DEI. Il documento deve riportare l'importo complessivo dell'intervento, pari al 100% dei lavori eseguiti, e rappresenta la base per la verifica di congruità dei costi ai fini dell'ammissibilità all'ottenimento dell'agevolazione fiscale.

I valori riportati nelle asseverazioni rappresentano pertanto i costi reali sostenuti per la riqualificazione energetica degli edifici e costituiscono il riferimento ufficiale per la successiva analisi economica. All'interno delle *Table 6.1, 6.2 e 6.3* sono indicati, per ciascun condominio, i massimali di spesa previsti dalla normativa in funzione del numero di UI, la spesa massima ammissibile detraibile per ciascun intervento e il costo effettivo dei lavori eseguiti IVA inclusa. Per la realizzazione degli interventi è stato necessario beneficiare di ulteriori bonus edilizi, poiché alcune tipologie di spesa non risultavano ammissibili dal Superbonus. Per tale ragione, si è fatto ricorso anche alla detrazione fiscale del 50% valida per le ristrutturazioni edilizie (art. 16-bis del DPR. 917/1986, art. 16 del DL 63/2013), detto "*Bonus ristrutturazioni*".

Alcune spese, infatti, non potevano essere coperte dal Superbonus, come ad esempio quelle relative agli interventi di isolamento termico effettuati su ambienti non climatizzati.

Nel rispetto delle normative, è stato necessario considerare due distinti livelli di limitazione della spesa: da un lato, i massimali di spesa detraibili stabiliti dall'articolo 119 del DL n. 34/2020 e, dall'altro, la congruità sui limiti unitari di spesa definiti dal DM del Ministero dello Sviluppo Economico del 6 agosto del 2020; i costi per le singole lavorazioni non previsti dal decreto faranno riferimento ai prezzi disposti dalle regioni o ai prezzi DEI.

Inoltre, le spese professionali sono state calcolate secondo i valori stabiliti dal DM del 17 giugno 2016, il quale disciplina i compensi per le prestazioni professionali tecniche, fornendo parametri determinati in funzione dell'importo complessivo dei lavori e del grado di complessità dell'intervento. Nello specifico, sono state considerate le seguenti voci: studi di fattibilità, progettazione preliminare, progettazione definitiva, progettazione esecutiva, direzione lavori, verifiche e collaudi, attestati di prestazione energetica (APE convenzionale iniziale e finale) e compenso per il responsabile dei lavori.

Considerando i costi complessivi delle opere rapportati alla superficie utile riscaldata, si ottengono valori specifici pari a circa 540 €/m², 230 €/m² e 740 €/m² rispettivamente per i condomini Blu, Arancione e Verde. Questi risultati trovano conferma nell'analisi costi-benefici, evidenziando l'efficacia dell'intervento sul condominio Arancione e, al contrario, l'insostenibilità economica di quello realizzato sul condominio Verde. Se si prendono invece in esame i costi specifici realmente sostenuti (ovvero quelli a carico dei proprietari), essi ammontano a circa 13 €/m² per il condominio Blu, 5,5 €/m² per l'Arancione e 40 €/m² per il Verde, riconfermando i risultati appena citati.

QUADRO ECONOMICO COMPLESSIVO INTERVENTO DI RISTRUTTURAZIONE IMPORTANTE DI SECONDO LIVELLO - CONDOMINIO BLU					
INTERVENTI AGEVOLABILI AI SENSI DEL SUPERBONUS 110%					
N.	TIPOLOGIA DI INTERVENTO	MASSIMALE DI SPESA PER UI/ kW/ kWh	NUMERO UI/ kW/ kWh	SPESA MASSIMA AMMISSIBILE	IMPORTO LAVORI REALIZZATI IVA INCLUSA
1	Trainante 1: Isolamento termico delle superficie opache verticali, orizzontali e inclinate	prime 8 UI 40.000 €/UI; dalla 9° 30.000 €/UI	52 UI	1.640.000 €	1.521.867,61 €
2	Trainante 2: Sostituzione degli impianti di climatizzazione invernale esistenti (Sistema ibrido e collettori solari)	prime 8 UI 20.000 €/UI dalla 9° 15.000 €/UI	52 UI	820.000 €	350.307,54 €
3	Trainato 1: Impianto fotovoltaico	2.400 €/kWp	13,77 kWp	33.048 €	32.640 €
4	Trainato 2: Accumulo elettrico	1.000 €/kWh	10 kWh	10.000 €	10.000 €
5	Trainato su parti private: nessun intervento	/	/	/	/
SPESA COMPLESSIVA [€]				2.503.048 €	1.914.815,15 €
DETRAZIONE COMPLESSIVA SPETTANTE [€]				2.106.296,67 €	
INTERVENTI AGEVOLABILI AI SENSI DEL BONUS RISTRUTTURAZIONE EDILIZIA AL 50%					
N.	TIPOLOGIA DI INTERVENTO	MASSIMALE DI SPESA PER UI	NUMERO UI/ kW/ kWh	SPESA MASSIMA AMMISSIBILE	IMPORTO LAVORI REALIZZATI IVA INCLUSA
1	Opere di riqualificazione energetica a livello condominiale ed in particolare interventi impiantistici ed edili sulle parti comuni	96.000 €/UI	52 UI	4.992.000 €	97.588,89 €
SPESA COMPLESSIVA [€]				4.992.000 €	97.588,89 €
DETRAZIONE COMPLESSIVA SPETTANTE [€]				48.794,45 €	
VALORE COMPLESSIVO DELL'OPERA [€]					2.012.404,04 €
TOTALE NETTO DA PAGARE [€]					48.794,45 €

Tabella 6.1 - Quadro economico degli interventi realizzati nel condominio Blu.

QUADRO ECONOMICO COMPLESSIVO INTERVENTO DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA - CONDOMINIO ARANCIONE					
INTERVENTI AGEVOLABILI AI SENSI DEL SUPERBONUS 110%					
N.	TIPOLOGIA DI INTERVENTO	MASSIMALE DI SPESA PER UI/ kW/ kWh	NUMERO UI/ kW/ kWh	SPESA MASSIMA AMMISSIBILE	IMPORTO LAVORI REALIZZATI IVA INCLUSA
1	Trainante 1: Sostituzione degli impianti di climatizzazione invernale esistenti (Sistema ibrido e collettori solari)	prime 8 UI 20.000 €/UI dalla 9° 15.000 €/UI	27 UI	445.000 €	269.712,25 €
2	Trainato 1: Isolamento termico delle superficie opache orizzontali (copertura)	54.545 €/UI	27 UI	1.472.715 €	158.541,73 €
3	Trainato 2: Impianto fotovoltaico	2.400 €/kWp	20 kWp	48.000 €	47.898,11 €
4	Trainato 3: Accumulo elettrico	1.000 €/kWh	20 kWh	20.000 €	19.905,95 €
5	Trainato su parti private: Sostituzione degli infissi	54.545 €/UI	3 UI	163.635 €	49.161,03 €
SPESA COMPLESSIVA [€]				2.149.350 €	545.219,07 €
DETRAZIONE COMPLESSIVA SPETTANTE [€]					599.740,98 €
INTERVENTI AGEVOLABILI AI SENSI DEL BONUS RISTRUTTURAZIONE EDILIZIA AL 50%					
N.	TIPOLOGIA DI INTERVENTO	MASSIMALE DI SPESA PER UI	NUMERO UI/ kW/ kWh	SPESA MASSIMA AMMISSIBILE	IMPORTO LAVORI REALIZZATI IVA INCLUSA
1	Opere di riqualificazione energetica a livello condominiale ed in particolare interventi impiantistici ed edili sulle parti comuni	96.000 €/UI	27 UI	2.592.000 €	27.527,62 €
SPESA COMPLESSIVA [€]				2.592.000 €	27.527,62 €
DETRAZIONE COMPLESSIVA SPETTANTE [€]					13.763,81 €
VALORE COMPLESSIVO DELL'OPERA [€]					572.746,69 €
TOTALE NETTO DA PAGARE [€]					13.763,81 €

Tabella 6.2 - Quadro economico degli interventi realizzati nel condominio Arancione.

QUADRO ECONOMICO COMPLESSIVO INTERVENTO DI RISTRUTTURAZIONE IMPORTANTE DI SECONDO LIVELLO - CONDOMINIO VERDE					
INTERVENTI AGEVOLABILI AI SENSI DEL SUPERBONUS 110%					
N.	TIPOLOGIA DI INTERVENTO	MASSIMALE DI SPESA PER UI/ kW/ kWh	NUMERO UI/ kW/ kWh	SPESA MASSIMA AMMISSIBILE	IMPORTO LAVORI REALIZZATI IVA INCLUSA
1	Trainante 1: Isolamento termico delle superficie opache verticali, orizzontali e inclinate	prime 8 UI 40.000 €/UI; dalla 9° 30.000 €/UI	12 UI	440.000 €	443.083,17 €
2	Trainato su parti private: Sostituzione degli infissi	54.545 €/UI	8 UI	436.360 €	156.042,02 €
SPESA COMPLESSIVA [€]				876.360 €	599.125,19 €
DETRAZIONE COMPLESSIVA SPETTANTE [€]					655.646,22 €
INTERVENTI AGEVOLABILI AI SENSI DEL BONUS RISTRUTTURAZIONE EDILIZIA AL 50%					
N.	TIPOLOGIA DI INTERVENTO	MASSIMALE DI SPESA PER UI	NUMERO UI/ kW/ kWh	SPESA MASSIMA AMMISSIBILE	IMPORTO LAVORI REALIZZATI IVA INCLUSA
1	Opere di riqualificazione energetica a livello condominiale ed in particolare interventi impiantistici ed edili su parti comuni	96.000 €/UI	12 UI	1.152.000 €	65.635,17 €
SPESA COMPLESSIVA [€]				1.152.000 €	65.635,17 €
DETRAZIONE COMPLESSIVA SPETTANTE [€]					32.817,59 €
VALORE COMPLESSIVO DELL'OPERA [€]					664.760,36 €
TOTALE NETTO DA PAGARE [€]					35.900,76 €

Tabella 6.3 - Quadro economico degli interventi realizzati nel condominio Verde.

Nel condominio Blu, il costo complessivo degli interventi di riqualificazione energetica ha raggiunto poco più di 2 milioni di euro, ma grazie alle incentivazioni fiscali previste dal Superbonus 110% e dal Bonus ristrutturazioni, l'importo netto effettivamente corrisposto è stato di soli 48.794,45 euro. Nel condominio Arancione, l'investimento complessivo ammonta a 572.746,69 euro, mentre il totale netto pagato si è limitato a soli 13.763,81 euro. Infine, per il condominio Verde, in cui sono stati eseguiti solo interventi sull'involucro edilizio, il costo

complessivo dei lavori è stato pari a 664.760,36 euro, con un esborso effettivo di 35.900,76 euro.

È fondamentale evidenziare che, per tutti i condomini, l'incentivo del Superbonus è stato usufruito mediante la modalità dello sconto in fattura: il soggetto beneficiario, ossia il condominio, ha ceduto direttamente all'impresa l'importo corrispondente alla detrazione, riducendo a 0 i costi iniziali. Le spese che non rientravano nei requisiti di ammissibilità previsti per il Superbonus 110% sono state sostenute direttamente dai condomini beneficiando del Bonus ristrutturazione, con una percentuale di detrazione pari al 50%. Anche in questo caso, i condomini hanno usufruito del meccanismo dello sconto in fattura, il quale ha consentito di ridurre immediatamente l'investimento iniziale, pagando soltanto la metà del costo reale degli interventi non coperti dal Superbonus.

Nei casi in cui il costo di realizzazione delle opere non superava il massimale di spesa ammesso dal Superbonus, non è stato sostenuto alcun costo diretto da parte dei beneficiari; ad eccezione del condominio Verde. In tutti gli altri casi, gli unici pagamenti effettuati sono riconducibili alla quota relativa agli interventi agevolati con il Bonus ristrutturazione.

Nel condominio Verde, infatti, si è verificato un leggero superamento dei massimali di spesa ammessi dal Superbonus, causato dal numero limitato di unità immobiliari, che ha reso più difficile la copertura integrale dei costi tramite l'incentivo. In questo caso, circa 3.000 euro sono rimasti a carico del condominio, a differenza del condominio Blu e di quello Arancione, dove, grazie a un numero maggiore di unità immobiliari, è stato possibile rientrare pienamente nei limiti di spesa ammissibili. Precisamente, ai fini del calcolo dei massimali di spesa ammissibili per gli interventi trainanti, è necessario considerare non soltanto il numero di unità abitative, ma anche l'insieme delle pertinenze associate, come ad esempio box auto, cantine, magazzini e locali accessori, purché regolarmente accatastati. Questa distinzione risulta particolarmente significativa nella comparazione tra i tre casi studio analizzati. In particolare, nel condominio Verde non risultano presenti pertinenze esterne alle unità immobiliari, condizione che ha comportato un minor numero complessivo di unità ai fini del calcolo dei massimali. Di conseguenza, si è verificato un superamento dei limiti di spesa previsti dal Superbonus, con una quota residua non coperta dall'incentivo e a totale carico dei condomini. Al contrario, nel condominio Blu e in quello Arancione, la presenza di numerose pertinenze (quali box auto e cantine, rispettivamente pari a 22 e 8) hanno contribuito ad aumentare il numero totale delle unità immobiliari totali, permettendo così di disporre di un massimale più elevato. Ciò ha consentito di evitare il superamento dei limiti imposti dalla normativa.

◆ Risparmi economici annuali

Ai fini dell'analisi economica sono stati considerati i prezzi unitari medi del gas naturale (espressi in €/Nm³) e dell'energia elettrica (espressi in €/kWh_{el}), ottenuti dall'analisi delle bollette di fornitura energetica dei tre condomini oggetto di studio. La media è stata calcolata sull'intero anno solare 2024, in cui i prezzi si sono in parte stabilizzati dopo la crisi energetica del biennio precedente, pur rimanendo più elevati rispetto al periodo precrisi. I contratti di fornitura fanno riferimento al mercato libero e sono relativi ad utenti domestici. Questa scelta permette di adottare valori rappresentativi per stimare i risparmi economici effettivi post-intervento.

Ai fini di una valutazione economica completa, sono stati considerati anche i ricavi derivanti dalla quota di energia elettrica prodotta dagli impianti fotovoltaici e non autoconsumata, che viene immessa in rete e ceduta al Gestore dei Servizi Energetici (GSE) tramite il meccanismo del ritiro dedicato. Questa rappresenta infatti l'unica modalità ammessa per impianti incentivati con il Superbonus, in quanto il meccanismo dello scambio sul posto non risulta compatibile con questa forma agevolativa. Il GSE offre due opzioni per la remunerazione dell'energia immessa in rete: il prezzo minimo garantito (PMG) e il prezzo zonale orario (PO). In tutti i condomini è stata adottata la seconda modalità, in cui l'energia viene pagata in base ai valori zonalari orari. Per l'anno 2024, il prezzo medio è di circa 98,835 €/MWh.

Secondo la normativa vigente, l'energia prodotta da impianti fotovoltaici agevolati con il Superbonus può essere destinata esclusivamente al servizio delle utenze condominiali comuni. Ciò include i consumi degli impianti centralizzati, ascensori e illuminazione delle scale, ma esclude qualsiasi utilizzo diretto da parte dei singoli condomini per le proprie abitazioni private.

L'obiettivo è di massimizzare l'utilizzo diretto (autoconsumo) dell'energia prodotta all'interno degli edifici. Questo approccio consente di ridurre i prelievi dalla rete e, conseguentemente, abbattere i costi in bolletta. Sebbene il ritiro dedicato consenta una certa remunerazione per l'energia immessa, essa risulta economicamente meno vantaggiosa rispetto al risparmio ottenibile tramite l'autoconsumo, in quanto i corrispettivi riconosciuti dal GSE sono inferiori di circa 5 volte rispetto ai prezzi dell'energia acquistata.

In **Tabella 6.4** sono riportati i risparmi energetici annui dei principali vettori energetici, calcolati neutralizzando l'effetto del clima. Sulla base dei prezzi unitari medi del gas naturale e dell'energia elettrica nel 2024, ricavati da un'analisi delle bollette dei tre condomini, è stato stimato il risparmio economico annuo. Il condominio Blu registra un risparmio complessivo pari a circa 28.137,73 €, seguito dal condominio Arancione con 16.392,27 €, mentre il condominio Verde si attesta sui 3.150,24 €. I risultati, espressi in termini assoluti, dipendono sia dall'entità degli interventi effettuati sia dalla superficie utile degli edifici: il condominio Blu, infatti, ha beneficiato di una riqualificazione estesa su una superficie maggiore, partendo da valori di consumo maggiori e quindi con possibilità di risparmio più alte.

Per un confronto consistente tra i casi studio, è stato calcolato anche il risparmio economico specifico annuale per metro quadrato di superficie utile riscaldata in modo da neutralizzare l'effetto scala. I risultati mostrano un risparmio di 7,52 €/m² per il condominio Blu, 6,51 €/m² per l'Arancione e 3,51 €/m² per il Verde.

Questi dati confermano l'elevata efficacia degli interventi che coinvolgono sia l'involucro che l'impianto, ma sottolineano anche la buona riuscita dei lavori sul condominio Arancione, che pur avendo effettuato solo l'isolamento del sottotetto rispetto al condominio Blu, ha ottenuto un risparmio specifico molto simile, evidenziando l'impatto significativo della sola riqualificazione impiantistica. I risparmi economici sono stati successivamente distinti in funzione del vettore energetico, considerando separatamente il risparmio derivante dalla riduzione dei consumi di gas naturale, quello relativo all'energia elettrica e il ricavo ottenuto dalla vendita dell'energia prodotta e immessa in rete.

In un'ottica futura, con l'introduzione del mercato regolamentato ETS2 anche per il settore degli edifici, sarà possibile attribuire un valore economico ai risparmi derivanti dalla riduzione delle emissioni di CO₂ associate al consumo minore di gas naturale. Nei tre condomini analizzati, il minor consumo annuo di gas comporta una riduzione delle emissioni di CO₂ pari

a 31,81 ton/anno per il condominio Blu, 22 per l'Arancione e 5,92 per il Verde. Assumendo un prezzo di 60 €/ton CO₂, si otterrebbero dei risparmi economici rispettivamente pari a 1.908,6 €, 1.320 € e 355,2 €. Tali benefici, sebbene non considerati nei calcoli economici seguenti, poiché ETS2 non è ancora entrato in vigore, rappresentano un ulteriore vantaggio da tenere in considerazione in un prossimo futuro.

RISPARMI ENERGETICI ANNUALI DEI PRINCIPALI VETTORI ENERGETICI			
	Risparmi annuali di gas metano [Nm ³]	Risparmi annuali di E _{el} [kWh _{el}]	E _{el} venduta in rete [kWh _{el}]
CONDOMINIO BLU	15.238	20.052	5.906
CONDOMINIO ARANCIONE	10.535	6.893	10.468
CONDOMINIO VERDE	2.835	/	/

PREZZO UNITARIO MEDIO DA ANALISI BOLLETTE 2024	
PREZZO UNITARIO MEDIO DI GAS NATURALE [€/Nm ³]	PREZZO UNITARIO MEDIO DI ENERGIA ELETTRICA [€/kWh _{el}]
1,1112	0,5297

RISPARMI ECONOMICI ANNUALI COMPLESSIVI [€/anno]				
Condominio	Risparmi gas naturale [€]	Risparmi E _{el} [€]	E _{el} venduta [€]	Risparmio complessivo [€/anno]
CONDOMINIO BLU	16.932,47	10.621,54	583,72	28.137,73 €
CONDOMINIO ARANCIONE	11.706,48	3.651,21	1.034,58	16.392,27 €
CONDOMINIO VERDE	3.150,24	/	/	3.150,24 €

Tabella 6.4 - Riepilogo risparmi economici.

6.2 Scenario 1 - Superbonus 110%: valutazione dell'investimento con incentivazione reale

Lo scenario 1 analizza l'efficacia economica degli interventi di riqualificazione energetica realizzati usufruendo del Superbonus 110%. Nei casi in cui questo incentivo non era applicabile, si è invece beneficiato della detrazione fiscale al 50% per ristrutturazioni edilizie. L'analisi è stata condotta costruendo l'andamento dei flussi di cassa cumulati: partendo dall'investimento iniziale all'anno zero, sono stati calcolati i risparmi economici attualizzati (r=3%) per ciascun anno e poi sommati progressivamente, come mostrato in **Figura 6.1**. Il tasso di attualizzazione è stato adottato leggermente inferiore al valore medio, perché l'investimento, ad eccezione degli impianti fotovoltaici e solari termici, comporta un rischio di non produttività quasi nullo.

Dalla **Tabella 6.5** emerge che il condominio Blu è quello che, dopo 25 anni, ottiene il VAN più elevato e pari a 441.171 €, grazie a risparmi annuali più consistenti. Tuttavia, il tempo di ritorno dell'investimento è più basso per il condominio Arancione (0,86 anni), grazie a un investimento iniziale molto contenuto (14.000 € circa contro i 49.000 € del condominio Blu).

Sempre il condominio Arancione mostra anche il miglior indice di profitto (19,74), proprio perché, a fronte di una spesa iniziale più bassa, i benefici ottenuti risultano particolarmente vantaggiosi.

Per quanto riguarda il condominio Verde, anche facendo uso del Superbonus, l'investimento risulta conveniente in maniera limitata. Il VAN, pur essendo positivo, è basso, e il tempo di ritorno risulta piuttosto lungo, circa 14 anni. Inoltre, l'indice di profitto è inferiore a 1, il che indica che ogni euro investito genera meno di un euro di ritorno netto. In altre parole, l'investimento non produce un guadagno superiore al capitale rischiato.

Il risultato appare quindi evidente: per il condominio Blu e il condominio Arancione, l'adesione al Superbonus è risultata ampiamente vantaggiosa. Per il condominio Verde, invece, l'intervento ha generato un guadagno, ma in misura decisamente più contenuta.

Questa differenza è dovuta, oltre alle tipologie degli interventi di riqualificazione energetica realizzati, anche ad un effetto scala, infatti, il condominio Verde ha una superficie utile riscaldata di soli 900 m², a fronte dei 3700 m² del condominio Blu, ma ha sostenuto un costo di investimento netto simile ma con risparmi notevolmente inferiori. Di conseguenza, il rapporto tra guadagni ottenuti e capitale speso è decisamente meno favorevole.

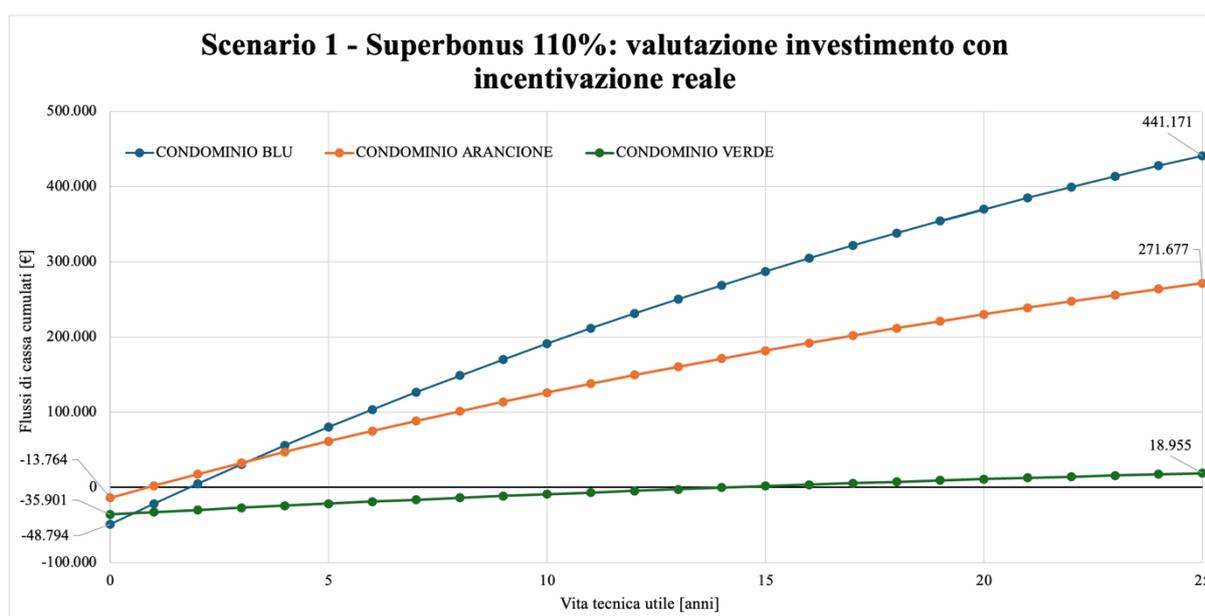


Figura 6.1 - Scenario 1: Superbonus 110%.

RIEPILOGO PRINCIPALI INDICATORI ECONOMICI - SCENARIO 1			
Condominio	PBT finanziario [anni]	VAN a 25 anni [€]	IP
CONDOMINIO BLU	1,81	441.171	9,04
CONDOMINIO ARANCIONE	0,86	271.677	19,74
CONDOMINIO VERDE	14,16	18.955	0,53

Tabella 6.5 - Indicatori economici scenario 1.

6.3 Scenario 2 - Nessun incentivo: valutazione dell'investimento alle condizioni di mercato attuali

In questo secondo scenario sono stati considerati nuovi costi di investimento, aggiornati ai valori di mercato attuali. In particolare, si è tenuto conto della leggera riduzione dei prezzi legati agli interventi di riqualificazione edilizia rispetto al periodo del Superbonus, dovuta ad una diminuzione della domanda. Attraverso un'analisi dei computi metrici del 2024 e delle medie di mercato, si è stimato che i costi delle lavorazioni edilizie siano diminuiti di circa il 30%, mentre le spese professionali si siano ridotte di due/tre volte rispetto ai livelli osservati durante il periodo dell'incentivazione al 110%.

I nuovi costi di investimento stimati risultano quindi pari a:

- condominio Blu: 1.163.621 €;
- condominio Arancione: 314.223 €;
- condominio Verde: 384.393 €.

In **Figura 6.2** è riportato l'andamento dei flussi di cassa attualizzati e cumulati. Dall'analisi emerge che, per tutti i condomini analizzati, i flussi di cassa cumulati restano negativi per tutta la durata dell'orizzonte temporale e pari a 25 anni, indicando che non si riesce a recuperare l'investimento iniziale. In particolare, il VAN a 25 anni per il condominio Blu è di circa -645.000 €, il VAN per quello Arancione risulta pari a circa -29.000 € e, infine, per il condominio Verde è pari a circa -330.000 € (**Tabella 6.6**). L'indice di profitto risulta essere sempre negativo, a dimostrazione di nessuna convenienza economica nel realizzare i suddetti interventi di riqualificazione energetica. Anche se i costi dell'edilizia sono diminuiti rispetto ai valori registrati nel biennio 2022-2023, i tempi di ritorno degli investimenti restano estremamente elevati. Questo è giustificabile dal fatto che, durante il periodo del Superbonus, i prezzi del settore edilizio hanno subito un forte incremento. L'aumento è stato causato da una domanda molto elevata e da una scarsa disponibilità di materiali, in un contesto ancora segnato dagli effetti della crisi legata alla pandemia di SARS-CoV-2. Rispetto ai livelli precedenti alla pandemia, i costi si sono comunque mantenuti su valori più alti rispetto alla situazione precrisi.

Il condominio Arancione presenta una convenienza economica più favorevole rispetto agli altri due condomini residenziali, con un tempo di ritorno finanziario pari a circa 29 anni, nettamente inferiore a quello degli altri condomini, dove supera i 100 anni. Tuttavia, l'investimento non può comunque essere considerato conveniente, poiché il VAN risulta negativo. Ciò potrebbe essere spiegato dal fatto che l'isolamento dell'involucro, se realizzato da solo e in un condominio in cui i consumi erano già bassi, non risulti conveniente dal punto di vista puramente economico.

Questo scenario è stato volutamente introdotto per evidenziare come, in assenza di incentivi fiscali e bonus edilizi, gli interventi di riqualificazione energetica in ambito edile non risultino economicamente sostenibili. I costi da sostenere sono elevati e i tempi di recupero del capitale investito risultano troppo lunghi per essere accettabili dai cittadini privati e soprattutto dai condòmini.

Rimane quindi evidente come il ricorso a forme di incentivazione fiscale sia fondamentale per promuovere la diffusione di interventi di efficienza energetica nel settore edilizio. Senza incentivi, tali interventi non permettono un ritorno economico sufficiente, ostacolando lo sviluppo sostenibile del patrimonio edilizio esistente.

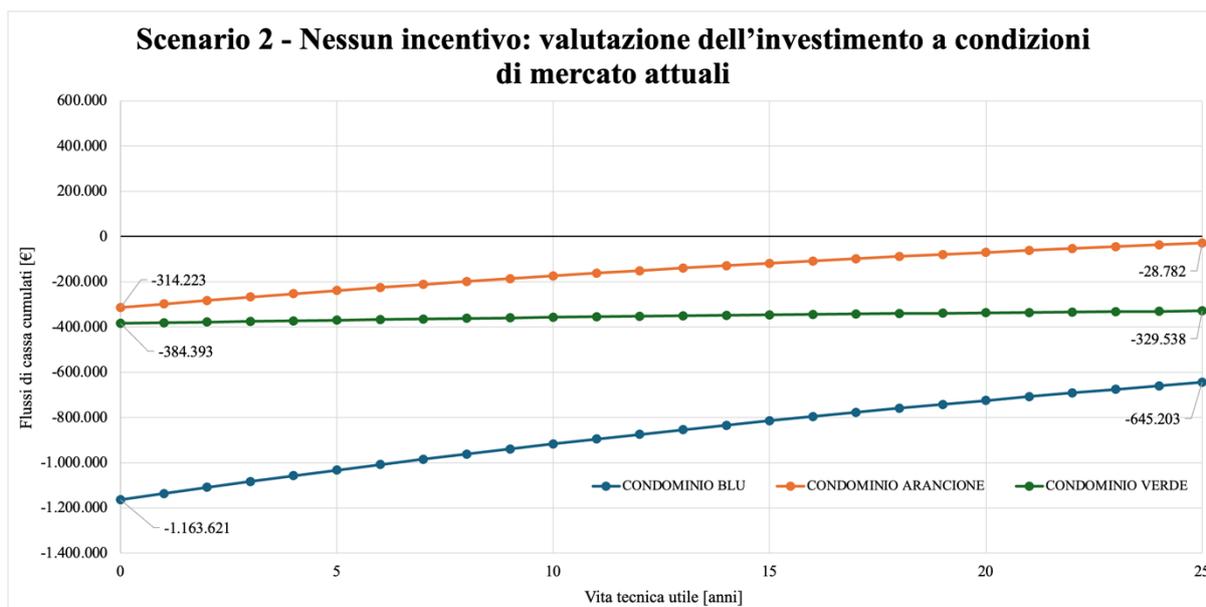


Figura 6.2 - Scenario 2: nessuna incentivazione.

RIEPILOGO PRINCIPALI INDICATORI ECONOMICI - SCENARIO 2			
Condominio	PBT finanziario [anni]	VAN a 25 anni [€]	IP
CONDOMINIO BLU	> 100	-645.203	< 0
CONDOMINIO ARANCIONE	28,95	-28.782	< 0
CONDOMINIO VERDE	> 100	-329.538	< 0

Tabella 6.6 - Indicatori economici scenario 2.

6.4 Scenario 3 - Incentivo ottimale: valutazione dell'investimento mediante taratura dell'incentivazione

Questo scenario è stato sviluppato con l'obiettivo di individuare un'aliquota di incentivazione, che riesca a porre un equilibrio tra sostenibilità economica per le casse dello Stato e convenienza per i cittadini. A differenza del Superbonus 110%, che ha comportato un significativo esborso per le finanze pubbliche, la proposta sottostante mira a definire una percentuale di incentivazione più contenuta, ma comunque sufficiente a stimolare interventi di riqualificazione energetica nel settore residenziale. In questo modo, si garantirebbe un ritorno economico adeguato per i beneficiari e, al contempo, una maggiore sostenibilità per il sistema di incentivazione nazionale.

Nel dettaglio, in questo terzo scenario sono stati mantenuti invariati i costi di investimento considerati nello scenario 2, ossia quelli attuali di mercato, calcolati sulla base dei computi metrici aggiornati al 2024.

La valutazione è stata condotta ipotizzando di fissare, come target economico, un tempo di ritorno finanziario pari a 10 anni. Sulla base di questo obiettivo e di un IP pari a 1,04 è stata

calcolata la percentuale di incentivazione necessaria affinché ciascun intervento risulti sostenibile dal punto di vista economico per i cittadini.

Dall'analisi dei risultati ottenuti emergono percentuali di incentivazione diverse tra loro: 79,37% per il condominio Blu, 55,5% per l'Arancione e 93% per quello Verde. Questa variabilità è legata principalmente al rapporto costi/benefici ma anche da altri fattori, tra cui sicuramente maggior peso è determinato dalla tipologia di interventi realizzati sui diversi condomini; altri fattori quali l'effetto scala e il diverso comportamento d'uso degli occupanti aumentano il gap tra queste percentuali. Ad esempio, nel condominio Blu, composto da 30 unità immobiliari, l'elevato numero di abitazioni consente risparmi maggiori in valore assoluto, in quanto si parte da consumi maggiori. Al contrario, nel condominio Verde, dove è stato effettuato solo un intervento di isolamento e il numero di UI è limitato, i costi sostenuti risultano sproporzionati rispetto ai benefici ottenuti.

Tale osservazione suggerisce che l'isolamento dell'involucro, se realizzato da solo e in un condominio in cui i consumi erano già bassi, non risulti conveniente dal punto di vista puramente economico. Ciò spiega anche perché il condominio Arancione ottiene i risultati migliori: gli interventi sono stati meno costosi e i risparmi generati più che proporzionali all'investimento.

Nei diversi casi studio, l'introduzione di un incentivo calibrato su un PBT finanziario di 10 anni, ha permesso una riduzione del costo sostenuto dal committente. In particolare, nel condominio Blu, a fronte di un investimento complessivo pari a 1.163.621 €, il costo effettivo per i residenti, applicando l'aliquota di incentivazione individuata, risulterebbe pari a circa 240.020 €. Nel condominio Arancione, con un investimento reale senza incentivazione pari a 314.223 €, il costo da sostenere sarebbe di circa 139.829 €. Infine, nel condominio Verde, pur a fronte di un investimento totale alto, l'elevata percentuale di incentivazione necessaria per rendere economicamente sostenibile l'intervento, pari al 93%, ridurrebbe di molto il costo reale a carico degli investitori: da 384.393 a 26.872 €. I VAN calcolati a 25 anni si confermano proporzionali all'entità dei costi per gli interventi realizzati: 249.945 € per il condominio Blu, 145.612 € per l'Arancione e 27.983 € per il Verde.

Nel caso del condominio Arancione, nonostante la superficie utile riscaldata non sia la più alta tra gli edifici analizzati (così come i consumi energetici), essendo maggiore di quella del condominio Verde (898 m²) ma inferiore rispetto al Blu (3.743 m²), i costi reali senza incentivazione risultano nettamente inferiori considerando l'effetto scala. Questo è dovuto al fatto che, nel condominio Arancione, non è stato realizzato nessun intervento sull'involucro esterno: non è stato posato alcun cappotto termico né sono stati eseguiti lavori sulle facciate. L'assenza di interventi sull'involucro ha permesso di evitare una serie di costi fissi nei lavori di riqualificazione esterna quali ponteggi, preparazione delle superfici, finiture, protezione degli infissi, trattamento antialga/antimuffa delle superfici esterne, misure di sicurezza in quota e lavorazioni di adeguamento architettonico. L'unico intervento di isolamento effettuato è stato quello del sottotetto, realizzato con un approccio privo di opere complesse e invasive. Di conseguenza, l'investimento iniziale è stato molto più contenuto, a fronte comunque di benefici energetici rilevanti. Questo equilibrio vantaggioso tra costi e risultati giustifica le ottime performance economiche rilevate per il condominio Arancione.

A supporto di questa valutazione, è stata condotta un'analisi comparativa tra i tre edifici considerando il costo per ogni W di potenza termica dispersa per trasmissione ridotta, a seguito degli interventi di isolamento. Naturalmente, in tutti i casi si è osservata una riduzione della

potenza dispersa per trasmissione, sia attraverso elementi opachi dell'involucro edilizio che trasparenti. Tuttavia, il costo unitario per ogni W ridotto risulta abbastanza differente: nel condominio Blu è pari a 27,18 €/W, nel condominio Verde a 21,54 €/W, mentre nel condominio Arancione è di soli 17,12 €/W. Queste valutazioni sono state fatte considerando i costi reali dei lavori realizzati attraverso l'agevolazione del Superbonus 110%. Questo dato conferma come l'isolamento del sottotetto, eseguito internamente e senza lavorazioni esterne, comporti costi decisamente più bassi rispetto all'installazione di un cappotto esterno, che invece richiede lavorazioni più complesse e costose. L'intervento sul sottotetto si dimostra quindi una soluzione più efficiente dal punto di vista economico a parità di effetto utile. Questo rapporto particolarmente favorevole tra costi e benefici giustifica le ottime prestazioni economiche rilevate per il condominio Arancione.

In **Figura 6.3** e in **Tabella 6.7** sono sintetizzati i principali risultati ottenuti per il terzo scenario.

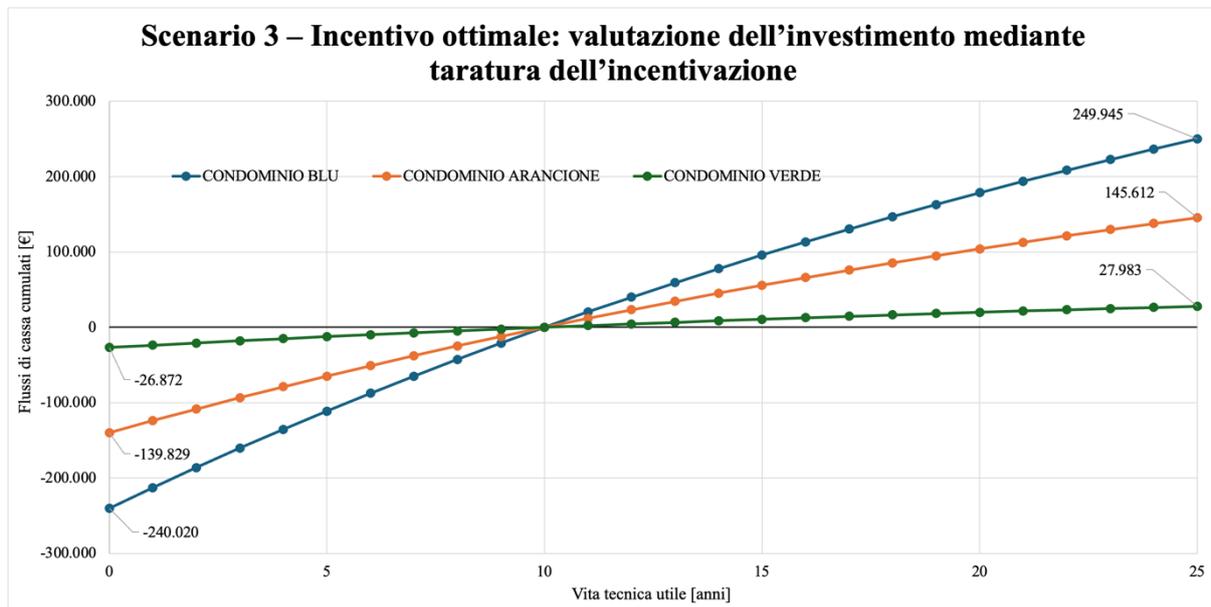


Figura 6.3 - Scenario 3: incentivazione ottimale.

RIEPILOGO PRINCIPALI INDICATORI ECONOMICI - SCENARIO 3				
Condominio	PBT finanziario [anni]	VAN a 25 anni [€]	IP	% di incentivazione
CONDOMINIO BLU	10	249.945	1,04	79,37
CONDOMINIO ARANCIONE	10	145.612	1,04	55,5
CONDOMINIO VERDE	10	27.983	1,04	93

Tabella 6.7 - Indicatori economici scenario 3.

Questo approccio consente di proporre un incentivo calibrato non su stime teoriche di progetto basate sugli APE, ma su risparmi energetici reali, ottenuti dalle misurazioni ex-post. Il risultato è una strategia più efficiente, che garantisce benefici all'investitore con un periodo

di rientro dell'investimento pari a dieci anni, seguito da ulteriori quindici anni di risparmi energetici e conseguentemente economici. Tali risorse potranno essere reinvestite, se necessario, nel rinnovo degli impianti, qualora questi mostrino segni di usura al termine del ciclo di vita previsto.

Nel complesso, questo scenario rappresenta un'ipotesi più sostenibile rispetto all'incentivazione del Superbonus 110%, offrendo contemporaneamente un adeguato incentivo economico ai privati e un contenimento della spesa pubblica. Un aspetto da tenere in considerazione nella definizione delle politiche di incentivazione è il disallineamento tra gli interessi delle diverse parti coinvolte, come i decisori politici e i proprietari/inquilini degli edifici. Per superare questo ostacolo è necessario adottare strategie che sappiano conciliare obiettivi ambientali e ritorni economici, ad esempio tramite incentivi modulabili che garantiscano benefici per tutti i soggetti coinvolti.

L'analisi economica è stata costruita ipotizzando un meccanismo di incentivazione in conto capitale, ovvero un contributo a fondo perduto fornito direttamente dallo Stato ai privati cittadini per interventi di riqualificazione energetica; spesso erogato nell'ambito del PNRR. Un incentivo in conto capitale è una forma di finanziamento pubblico in cui una parte dell'investimento iniziale è coperta dallo Stato o da fondi pubblici, senza obbligo di restituzione da parte del beneficiario, in modo da ridurre l'investimento iniziale. Questo tipo di contributo potrebbe essere previsto all'interno di bandi pubblici, ma un'idea interessante sarebbe strutturare tali bandi come gare, in modo da attribuire la priorità agli interventi su edifici con le peggiori prestazioni energetiche e con consumi certificati (non seconde case con utilizzi sporadici). In questo modo, si andrebbe a premiare chi possiede immobili particolarmente inefficienti, incentivando la riqualificazione laddove è più urgente ed efficace.

Nel modello proposto, il contributo pubblico è calibrato in modo da ottenere un PBT finanziario di 10 anni, rendendo quindi l'intervento economicamente sostenibile. Tuttavia, nei casi in cui le famiglie non dispongano della capacità economica per anticipare nemmeno la quota restante dell'investimento, si propone un'ulteriore agevolazione: l'utilizzo di un fondo rotativo con garanzia pubblica. Il fondo rotativo è uno strumento finanziario attraverso cui lo Stato (o un soggetto terzo per esempio banche) anticipa l'investimento necessario per la riqualificazione energetica edilizia. I cittadini non devono quindi anticipare alcun capitale: i lavori vengono in parte pagati dal contributo in conto capitale, e in parte pagati direttamente dal fondo. La rigenerazione del fondo avviene poi nel tempo, tramite gli sconti in bolletta, sfruttando i risparmi energetici ottenuti.

Per garantire la sostenibilità del fondo, si propone che il suo ripristino sia legato ai risparmi reali in bolletta, incentivando così comportamenti virtuosi da parte degli occupanti. Il piano prevede l'accesso riservato alle famiglie con redditi bassi e l'introduzione di un sistema di bonus/malus: se i risparmi effettivi superano le previsioni, il rimborso si conclude prima dei 10 anni; se sono inferiori, il periodo si estende finché l'investimento viene ripagato. Nel caso in cui si acceda a un fondo rotativo per finanziare l'intervento, l'analisi dei flussi di cassa cumulati mostra che l'investimento iniziale è nullo, quindi il grafico partirebbe da zero. Nei primi anni, i risparmi ottenuti in bolletta non generano un beneficio economico diretto per il beneficiario perché vengono completamente utilizzati per rimborsare il fondo. Questo fa sì che i flussi di cassa cumulati rimangano prossimo allo zero per tutta la durata del rimborso. Solo una volta concluso il periodo di restituzione del prestito, i risparmi si traducono in un vantaggio economico effettivo, determinando una crescita della curva cumulata.

In sintesi, la proposta incorpora due livelli di incentivo: un contributo a fondo perduto calibrato per rendere l'investimento sostenibile in 10 anni, e, laddove necessario, un prestito agevolato attraverso un fondo rotativo, con rimborso in bolletta proporzionale ai risparmi reali. Questo approccio rappresenta una possibile evoluzione del sistema di incentivazione, rendendo la riqualificazione energetica più equa, sostenibile e orientata ai risparmi reali.

◆ Ripartizione degli investimenti tra benefici energetici ed extra-energetici

L'obiettivo di quest'ultima analisi è distinguere, all'interno della spesa complessiva, la quota effettivamente imputabile all'efficientamento energetico da quella riconducibile a benefici secondari, come il miglioramento estetico e la manutenzione dell'edificio che sarebbe stata, prima o poi necessaria.

Le differenze tra le percentuali di incentivazione emerse nei tre casi studio sono fortemente legate alla finalità degli interventi. Nel condominio Arancione, l'unico scopo è stata la riduzione dei consumi energetici e dei costi in bolletta, mentre negli altri due condomini, in quello Blu e Verde, le opere hanno realizzato anche obiettivi di valorizzazione estetica, in particolare attraverso il rifacimento delle facciate.

Per tener conto di questo, è stata ricalcolata la spesa effettivamente destinata all'efficienza energetica, scorporando dai computi metrici la parte di investimento attribuibile all'incremento estetico dell'edificio. In pratica, sono stati analizzati nel dettaglio tutti i costi relativi all'isolamento termico, considerando come parte "energetica" solo le voci direttamente collegate all'efficienza, come i materiali isolanti e le lavorazioni strettamente funzionali al miglioramento delle prestazioni dell'involucro. Al contrario, interventi come l'applicazione degli intonaci, le finiture, i rivestimenti estetici esterni, adeguamenti delle soglie e altri interventi decorativi, sono stati considerati appartenenti alla quota estetico-strutturale e quindi esclusi dalla parte di spesa imputabile all'efficientamento energetico.

In particolare, per il condominio Verde, la porzione di spesa destinata al miglioramento dell'efficienza energetica è stata stimata pari a 66,25% del costo complessivo dell'intervento, mentre per il condominio Blu tale quota è risultata pari a 60,22%. Le restanti percentuali sono state attribuite a finalità di tipo estetico, appunto il rinnovo della facciata, che non contribuiscono a generare risparmi energetici.

Sulla base di queste considerazioni, gli investimenti iniziali per i due edifici sono stati ridotti, prendendo in esame solo la parte di spesa realmente destinata all'efficientamento energetico. Questo ha permesso di condurre un'ulteriore analisi economica più accurata, focalizzata esclusivamente sui benefici energetici. Infine, per il condominio Arancione, non è stato necessario apportare alcuna modifica all'investimento iniziale, poiché tutti gli interventi realizzati (quasi esclusivamente di tipo impiantistico) sono stati finalizzati esclusivamente alla riduzione dei consumi energetici. Di conseguenza, il valore dell'investimento e la relativa percentuale di incentivazione sono rimasti invariati.

I risultati di questa ultima analisi, basata sull'investimento economico destinato al solo miglioramento dell'efficienza energetica, sono riportati in *Tabella 6.8*.

RIEPILOGO PRINCIPALI INDICATORI ECONOMICI - SCENARIO 3 PIU' REALISTICO				
Condominio	PBT finanziario [anni]	VAN a 25 anni [€]	IP	% di incentivazione
CONDOMINIO BLU	10	249.945	1,04	70,36
CONDOMINIO ARANCIONE	10	145.612	1,04	55,5
CONDOMINIO VERDE	10	27.983	1,04	90,78

Tabella 6.8 - Indicatori economici scenario 3 più realistico.

Nel nuovo scenario, l'investimento iniziale considerato per il condominio Arancione rimane invariato, al contrario, per il condominio Verde l'investimento iniziale per i soli scopi energetici, è stato quantificato in 291.518 €, mentre per il condominio Blu ammonta a 809.881 €. La quota di spesa imputabile all'abbellimento estetico dei condomini è stata stimata pari a 353.741 € per il condominio Blu e a 92.876 € per il condominio Verde. Questi importi, non direttamente legati al miglioramento dell'efficienza energetica, sono stati sottratti dal costo complessivo dell'intervento al fine di considerare esclusivamente l'investimento effettivamente destinato al risparmio energetico.

La differenza tra il costo complessivo necessario a realizzare tutti gli interventi e quello imputabile al solo efficientamento energetico viene considerata a carico dei cittadini. Infatti, i costi legati al miglioramento estetico non possono essere coperti da fondi pubblici destinati all'efficienza energetica, il cui obiettivo è il risparmio energetico e la riduzione delle emissioni di gas climalteranti.

L'analisi ha mantenuto come obiettivo economico un tempo di ritorno finanziario di 10 anni. Di conseguenza, gli indicatori economici, come il VAN e l'IP, non cambiano, poiché il calcolo è stato impostato per ottenere lo stesso obiettivo economico riducendo però l'investimento iniziale. Ciò che varia, invece, è la percentuale di incentivazione necessaria per raggiungere tale obiettivo. Per il condominio Arancione, la percentuale rimane invariata, mentre per il condominio Blu e il condominio Verde diminuisce. In particolare:

- nel condominio Blu, l'incentivo richiesto si riduce da 79,37% a 70,36%, grazie alla rilevante riduzione dell'investimento imputabile alla parte estetica;
- nel condominio Verde, invece, la riduzione è molto più contenuta (da 93% a 90,78%), perché la quota esclusa dall'investimento iniziale è minore in termini assoluti.

Nel condominio Verde, anche dopo aver escluso la quota di spesa non energetica, l'investimento resta comunque elevato rispetto ai modesti risparmi energetici ottenuti. Di conseguenza, per rispettare l'obiettivo di un tempo di ritorno di 10 anni, è necessaria una percentuale di incentivazione molto alta, poiché i risparmi annui sono troppo bassi per garantire un'adeguata convenienza economica. Questo evidenzia come interventi con margini di risparmio energetico ridotti richiedano sostegni pubblici elevati per risultare sostenibili economicamente.

◆ **Incremento del valore immobiliare post-retrofit**

Numerosi studi dimostrano che la riqualificazione energetica nel settore residenziale porta non solo ad una riduzione dei costi operativi migliorando le prestazioni energetiche, ma anche ad

un incremento del comfort termico interno e rende gli edifici più attrattivi, aumentandone il valore di mercato e la disponibilità, da parte di potenziali acquirenti, a sostenere spese più elevate. Lo studio ^[43] conferma che i benefici derivanti dalla riqualificazione energetica non si limitano al risparmio in bolletta, ma includono anche un incremento significativo del valore di mercato degli immobili. In particolare, la ricerca condotta dal Politecnico di Milano e dal Politecnico di Torino per il Gruppo Gabetti ha evidenziato come le prestazioni energetiche degli edifici influenzino direttamente i prezzi di vendita. Tuttavia, l'impatto sull'aumento del valore immobiliare varia in base alla città e alla posizione dell'immobile (centro, semicentro o periferia). Poiché la ricerca analizza esclusivamente grandi città italiane, come Roma, Milano o Torino, non include città più piccole come Udine, e, considerando l'elevata eterogeneità del mercato immobiliare tra diverse aree urbane, si è preferito non adottare questo approccio per stimare l'incremento del valore di mercato degli immobili. In alternativa è stato utilizzato un altro riferimento più adatto al contesto analizzato ^[44].

Come riportato dalla letteratura scientifica ^[44], gli interventi di riqualificazione energetica promossi dalle politiche europee di decarbonizzazione, rendono gli edifici più sostenibili, riducono i costi energetici operativi e migliorano sia il comfort abitativo che la qualità dell'aria interna. Questi benefici sono sempre più apprezzati dal mercato immobiliare, infatti, gli acquirenti sono disposti a pagare un prezzo superiore, un "premio", rispetto agli edifici non riqualificati, con incrementi medi stimati tra il 7% e il 13,5%, in funzione dell'entità del retrofit (se parziale o profondo). Per quantificare questo incremento è stato utilizzato il metodo della valutazione contingente (CVM), che mira a stimare la disponibilità a pagare di più, da parte dei cittadini, per immobili più efficienti. Questo metodo permette di attribuire un valore economico ai vantaggi energetici, ambientali e di comfort percepito. Tra gli indicatori considerati, l'indice di prestazione energetica è risultato il più influente: una classe energetica più alta corrisponde a un maggiore valore di mercato. Un'ulteriore ricerca condotta da Ruggeri e Micelli ^[45] ha evidenziato un premio di prezzo medio pari al 14% nelle città metropolitane e fino al 28% nelle città di medie dimensioni, come Udine, per gli immobili che passano dalla classe energetica G alla classe A.

Un altro metodo impiegato è l'approccio dei costi, il quale considera il prezzo attuale dei materiali, della manodopera e delle altre voci di mercato, per stimare il costo di realizzazione partendo da un edificio simile. Questo approccio è stato adottato per valutare l'impatto economico degli interventi di retrofit sul valore immobiliare degli edifici analizzati.

I risultati ottenuti analizzando la città di Bagnolo in Piano, una località con condizioni climatiche e valori immobiliari simili a quelli della città di Udine, sono stati presi come riferimento per stimare l'incremento del valore di mercato nei tre condomini residenziali oggetto di studio. In particolare:

- per il condominio Blu, sottoposto a un retrofit profondo, è stato considerato un incremento pari al 20,41% del valore immobiliare pre-retrofit;
- per i condomini Arancione e Verde, dove sono stati eseguiti solo interventi parziali, è stato adottato un incremento pari al 9,79% rispetto al valore immobiliare pre-retrofit.

Sebbene il CVM si sia dimostrato uno strumento utile per stimare l'incremento percepito del valore di mercato degli immobili, basandosi sulla disponibilità a pagare espressa dalle persone tramite sondaggi, per la valutazione dell'incremento del valore immobiliare si è preferito adottare un approccio più oggettivo e realistico. È stato quindi utilizzato l'approccio dei costi,

che consente di stimare l'incremento effettivo del valore immobiliare considerando i costi reali sostenuti per gli interventi di riqualificazione. Questo approccio consente una stima più accurata dell'incremento reale del valore immobiliare, superando le distorsioni legate alla percezione soggettiva.

Per stimare il valore immobiliare pre-retrofit dei tre condomini, è stato utilizzato il prezzo medio di offerta ricavato dal sito internet di Immobiliare.it, scelto in quanto rappresenta il portale leader in Italia nel settore, offrendo un database aggiornato di annunci sia da parte di agenzie immobiliari che di venditori privati. Tale fonte è stata preferita per la sua elevata disponibilità di dati e per l'accesso diretto alle informazioni. In Italia, infatti, l'accesso ai dati relativi alle effettive compravendite immobiliari è spesso ostacolato da vincoli legali legati alla privacy, rendendo difficile ottenere i prezzi reali di transazione. Per validare l'attendibilità dei dati raccolti, i valori medi di offerta relativi al 2022, prima della realizzazione degli interventi, sono stati confrontati con i valori di compravendita reale forniti dall'Agenzia delle Entrate, attraverso la sezione dedicata alla consultazione dei valori immobiliari dichiarati OMI. Sebbene questi ultimi non forniscano informazioni specifiche sul singolo edificio, permettono comunque di ottenere un'indicazione affidabile del mercato di zona su base geografica. Dal confronto tra i due dataset è emersa una buona coerenza, con scostamenti tra il 2% e il 5%, confermando la validità del metodo adottato per la stima del valore immobiliare pre-retrofit.

Il condominio Blu e il condominio Arancione si trovano nella stessa zona OMI e, di conseguenza, presentano lo stesso valore immobiliare medio di 1.595 €/m². Il condominio Verde, invece, è situato in una zona più periferica, dove il valore medio di mercato risulta inferiore, e pari a 1.285 €/m².

Sulla base di questi valori e delle rispettive superfici utili riscaldate, è stato possibile stimare il valore immobiliare pre-retrofit per ciascun condominio residenziale:

- Blu: con una superficie utile riscaldata pari a 3.743 m² e un prezzo medio di 1.595 €/m², il valore immobiliare ante-intervento risulta essere di circa 5.970.085 €;
- Arancione: con una superficie utile riscaldata di 2.517 m² e lo stesso prezzo medio di 1.595 €/m², il valore immobiliare pre-retrofit è pari a 4.014.615 €;
- Verde: con una superficie utile riscaldata di 898 m² e un prezzo medio di 1.285 €/m², il valore immobiliare pre-retrofit è pari a 1.153.930 €.

Considerando le percentuali di incremento del valore immobiliare stimate tramite l'approccio dei costi precedentemente descritto, è stato possibile determinare un aumento del valore di mercato pari a:

- 1.218.494 € per il condominio Blu;
- 393.031 € per il condominio Arancione;
- 112.970 € per il condominio Verde.

Dall'analisi emerge come, nel caso del condominio Blu e di quello Arancione, l'incremento del valore di mercato risulti lievemente superiore rispetto ai rispettivi costi sostenuti per la realizzazione dei lavori in condizioni di mercato attuali. Infatti, il costo complessivo per gli interventi è pari a 1.163.621 € per il condominio Blu e a 314.223 € per il condominio Arancione.

Diverso è il caso del condominio Verde: nonostante l'incremento del valore immobiliare è di 112.970 €, il costo complessivo dei lavori ammonta a 384.393 €, risultando nettamente superiore al beneficio ottenuto in termini di rivalutazione dell'immobile, confermandosi un investimento non vantaggioso.

I risultati ottenuti devono però tener conto del soggetto che realizza gli interventi, poiché i benefici che se ne possono trarre variano sensibilmente. È possibile distinguere tra il proprietario-inquilino, ovvero il soggetto che realizza interventi sulla propria abitazione con l'obiettivo di migliorarne l'efficienza energetica, il comfort interno e l'estetica, senza l'intenzione di rivendere l'immobile, e l'imprenditore, cioè colui che effettua interventi di riqualificazione per aumentare il valore dell'immobile, al fine di capitalizzare tale incremento tramite la successiva vendita. Nel primo caso l'aumento del valore di mercato non rappresenta un beneficio diretto, poiché il vantaggio può essere monetizzato solo nel momento in cui si decide di vendere l'immobile. In questo caso, i benefici tangibili sono la riduzione dei costi energetici in bolletta, il miglioramento del comfort termico e l'aumento della qualità delle condizioni abitative interne. Nel secondo caso, invece, l'incremento del valore immobiliare acquisisce centralità, poiché rappresenta il vero obiettivo dell'investimento: si riqualifica l'edificio per aumentarne il prezzo di mercato e realizzare un utile attraverso la successiva vendita.

È importante sottolineare che l'aumento del valore immobiliare derivante dagli interventi di riqualificazione non è destinato a rimanere costante nel tempo. Con il trascorrere degli anni, infatti, gli impianti si usurano, perdono efficienza e diventano tecnologicamente obsoleti, riducendo così progressivamente il valore aggiunto iniziale. Per questo motivo, il massimo beneficio economico si ottiene solo se la vendita dell'immobile avviene a breve distanza dalla conclusione degli interventi. Al contrario, in caso di vendita differita, ad esempio dopo un decennio, è probabile che una parte rilevante di tale incremento venga persa.

Infine, il miglioramento del comfort termico interno rappresenta un effetto aggiuntivo, ottenuti grazie agli interventi di isolamento profondo realizzati nei condomini Blu e Verde. In entrambi i casi, le opere hanno interessato una porzione significativa delle superfici disperdenti, raggiungendo valori prossimi al 50%. La realizzazione degli interventi ha permesso di ridurre le dispersioni termiche e di garantire una maggiore stabilità delle temperature interne, portando benefici in termini di benessere abitativo per gli occupanti. Questo miglioramento è stato confermato dall'analisi dei risultati emersi dai questionari di POE, i quali hanno evidenziato un miglioramento generale rispetto al comfort termico nella situazione pre-retrofit.

◆ **Considerazioni finali**

I risultati dell'analisi economica mostrano chiaramente che, nelle condizioni attuali, realizzare interventi di riqualificazione energetica su condomini residenziali non è sostenibile dal punto di vista economico, senza l'accesso a incentivi pubblici. Questo è confermato anche da altri studi scientifici presenti in letteratura ^[45]. Infatti, i risultati ottenuti mostrano che senza incentivi il VAN risulta negativo, e i soldi spesi per fare i lavori verrebbero recuperati, in alcuni casi, dopo 100 anni.

Va ricordato però, che questa analisi si riferisce alla città di Udine, e quindi i risultati ottenuti dipendono fortemente dalle condizioni climatiche tipiche della zona, dal comportamento d'uso reale degli occupanti, ma, anche da aspetti economici: i costi degli interventi e i prezzi di mercato medi degli immobili a Udine.

Nelle zone con climi più rigidi, come nelle Alpi o nel Nord Europa, gli impianti di riscaldamento restano accesi più ore al giorno. Questo significa che si consuma molta più energia per mantenere gli stessi valori di temperatura interna. Nel caso del condominio Verde, dove i consumi energetici iniziali erano già molto bassi, l'intervento di isolamento termico ha portato a risparmi energetici ed economici molto limitati. Di conseguenza, non si può parlare di una reale convenienza economica: i benefici ottenuti non giustificano i costi sostenuti per la riqualificazione e l'installazione del cappotto esterno. Invece, eseguire interventi di isolamento termico in zone più fredde e laddove i consumi sono maggiori può portare a un risparmio maggiore, perché si riduce una quantità più alta di consumo. Quindi, se si parte da un consumo più elevato, il risparmio finale sarà maggiore a parità di intervento, sia in termini di energia che di soldi risparmiati in bolletta (condominio Blu e Arancione). Tuttavia, questo non è sempre garantito e dipende da molti fattori, ad esempio il comportamento degli occupanti, la regolazione degli impianti etc... Allo stesso modo, in città con un mercato immobiliare più forte, come Milano, l'aumento del valore dell'immobile dopo la riqualificazione è sicuramente molto più alto rispetto a una città come Udine ^[45], pur considerando lo stesso costo per fare i lavori.

Per questo motivo, l'attuale sistema di incentivazione nazionale, uniforme per i destinatari, rischia di essere inefficiente, in quanto non tiene conto delle differenze tra le varie città, né in termini di clima né di valore immobiliare, come confermato da ^[45]. In futuro, sarebbe quindi opportuno creare un sistema di incentivi personalizzato, in modo da adattare l'aliquota del contributo pubblico alle reali condizioni del territorio, ai reali risparmi energetici ottenuti e soprattutto in base al reddito e alla possibilità economica delle persone.

7. RISULTATI DEL POST-OCCUPANCY EVALUATION

7.1 Presentazione dei risultati del POE

Dopo aver sviluppato il questionario di post-occupazione secondo le indicazioni metodologiche descritte nel **Capitolo 3.7**, si è proceduto con la fase di somministrazione ai residenti dei tre condomini oggetto di studio. Al fine di favorire la partecipazione, il questionario è stato distribuito in due modalità diverse:

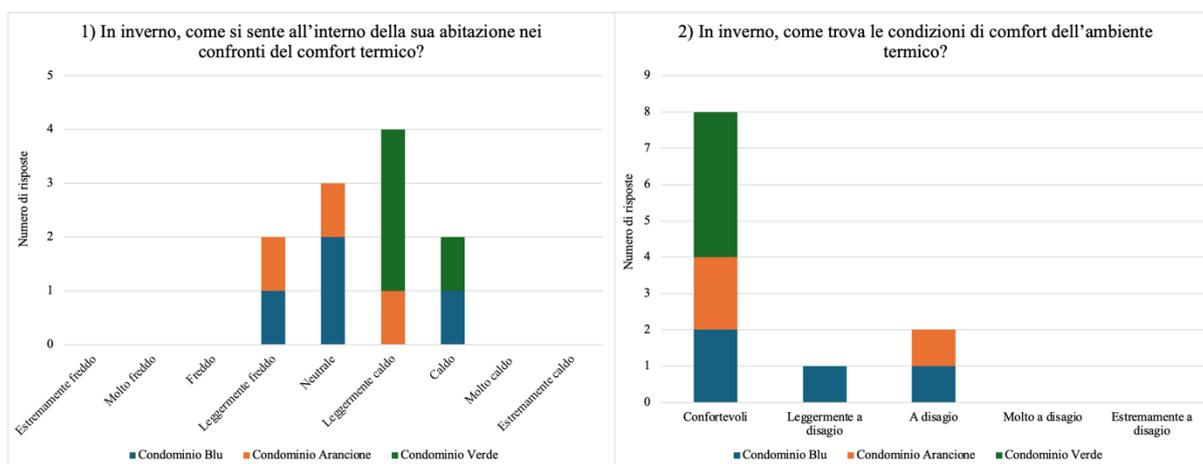
- in formato cartaceo, consegnando una copia per ciascuna unità immobiliare appartenente ai tre complessi residenziali;
- in formato digitale, mediante l'utilizzo di un QR code che consentiva di accedere agevolmente al questionario online tramite smartphone.

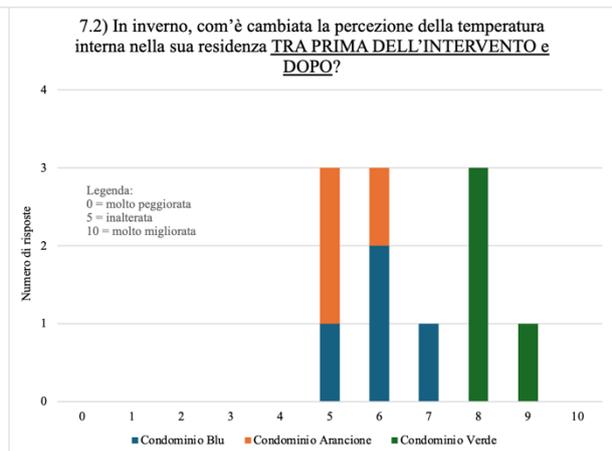
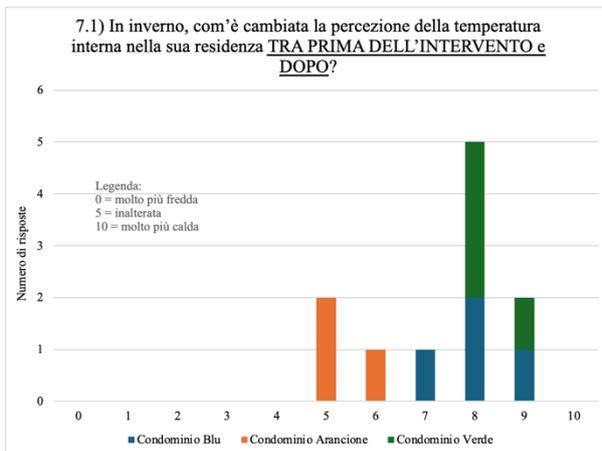
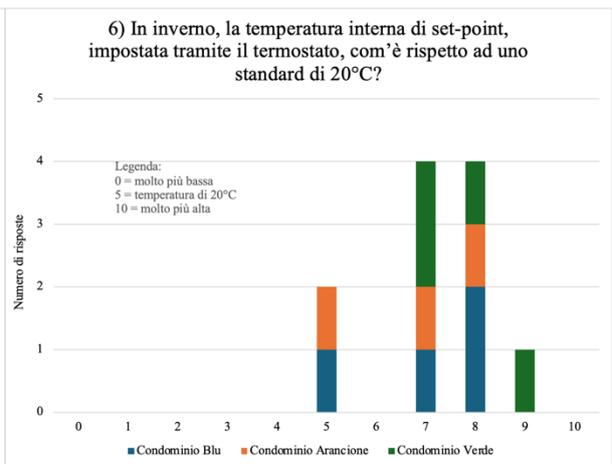
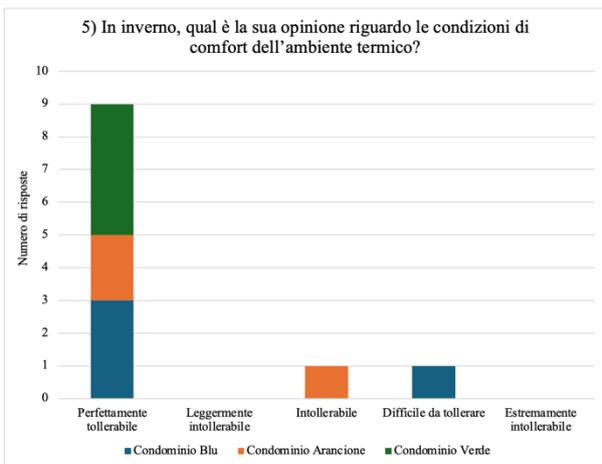
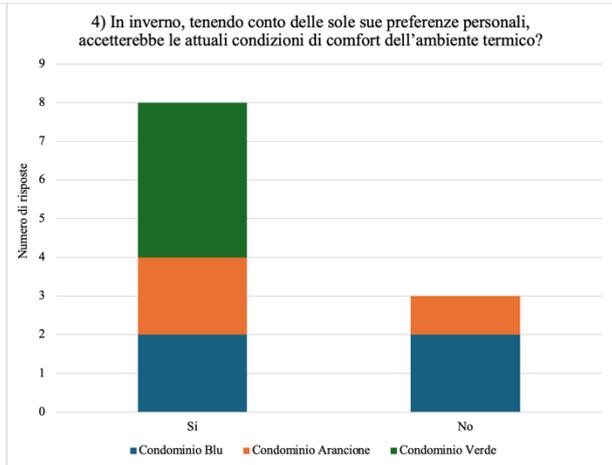
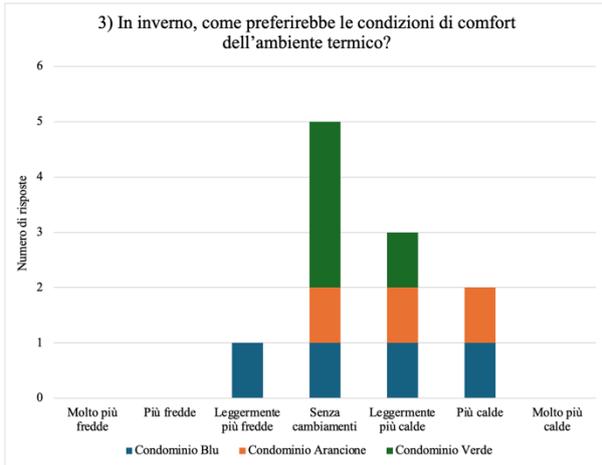
Dai primi riscontri è emerso che la modalità digitale ha favorito una maggiore adesione, totalizzando 8 risposte rispetto alle sole 3 pervenute in formato cartaceo, per un totale complessivo di 11 questionari completamente compilati. Nello specifico, sono stati raccolti:

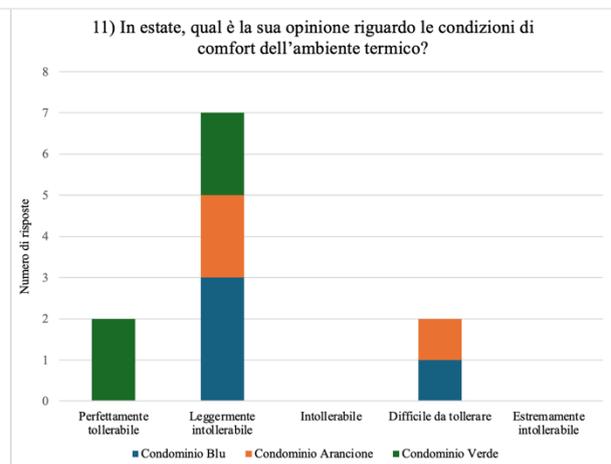
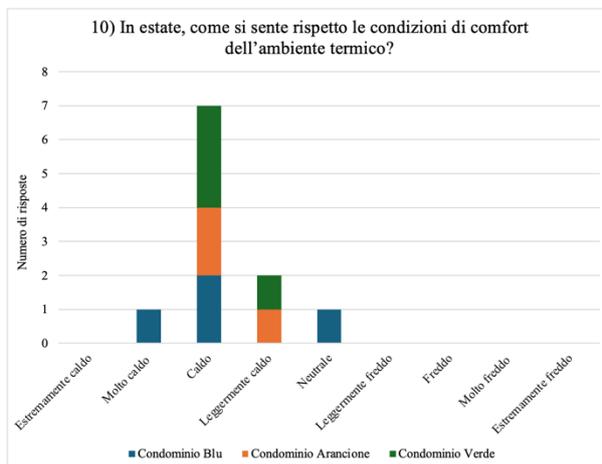
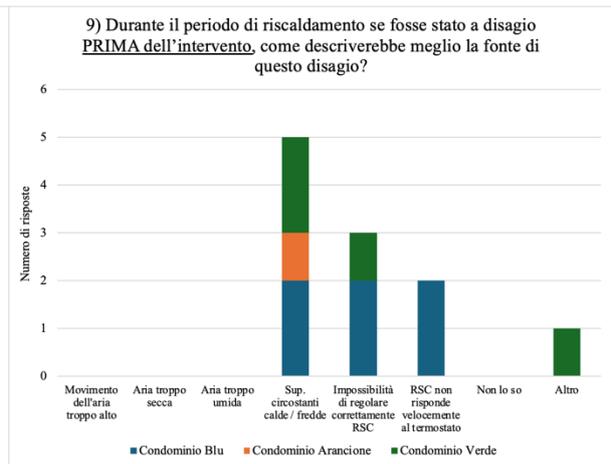
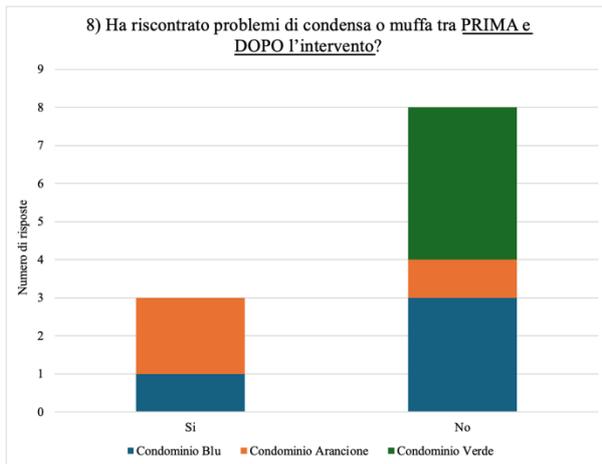
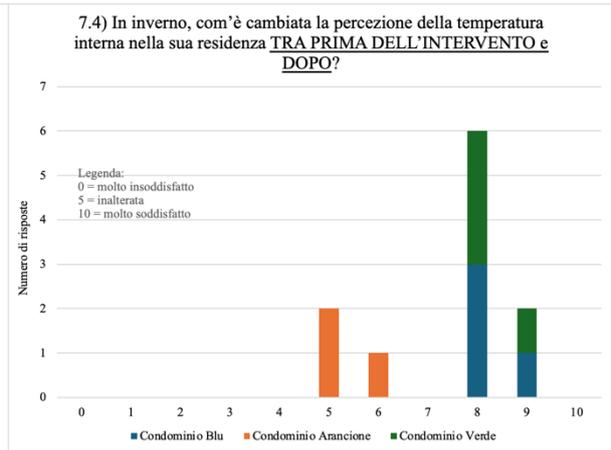
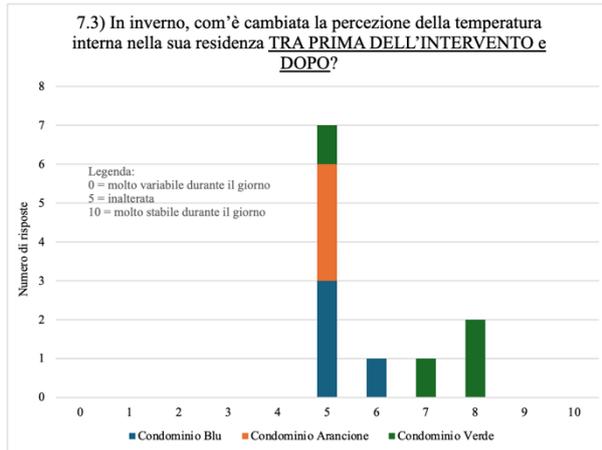
- 4 questionari per il condominio Blu;
- 3 questionari per il condominio Arancione;
- 4 questionari per il condominio Verde.

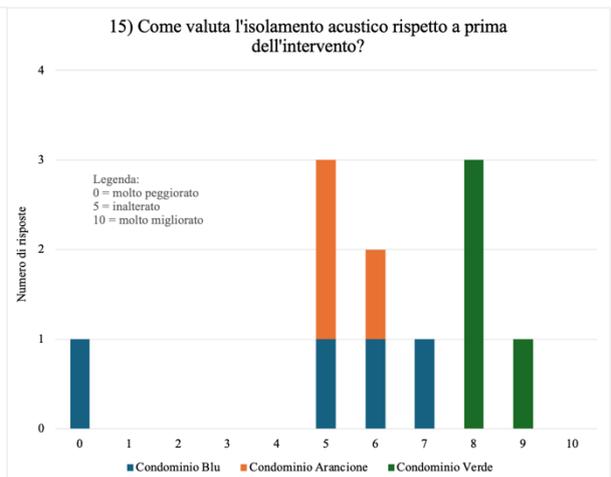
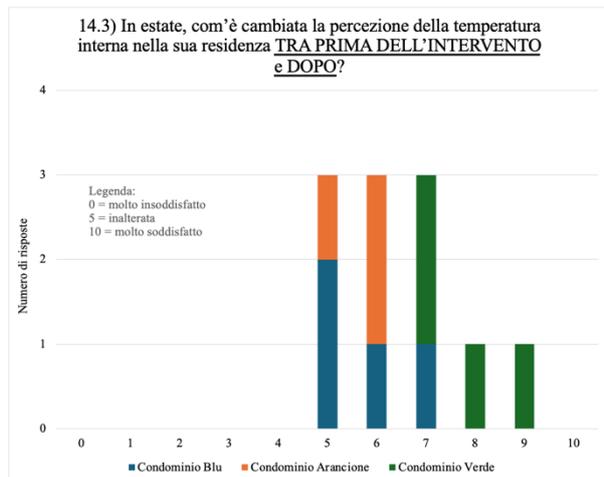
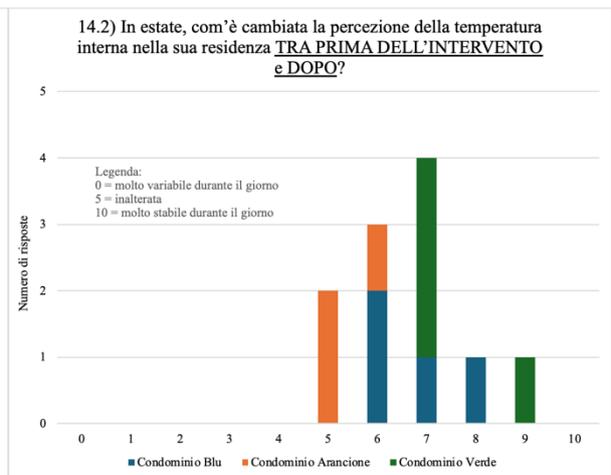
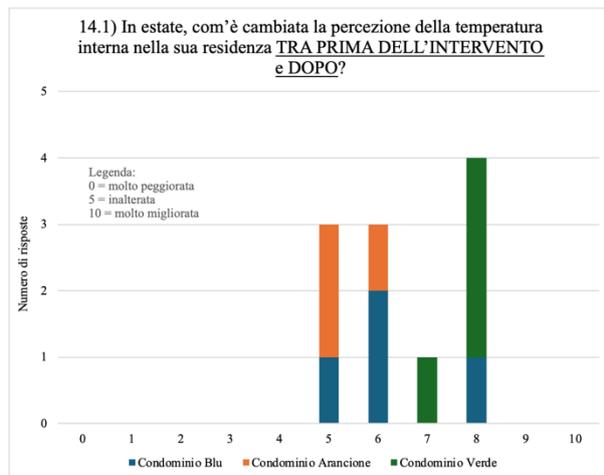
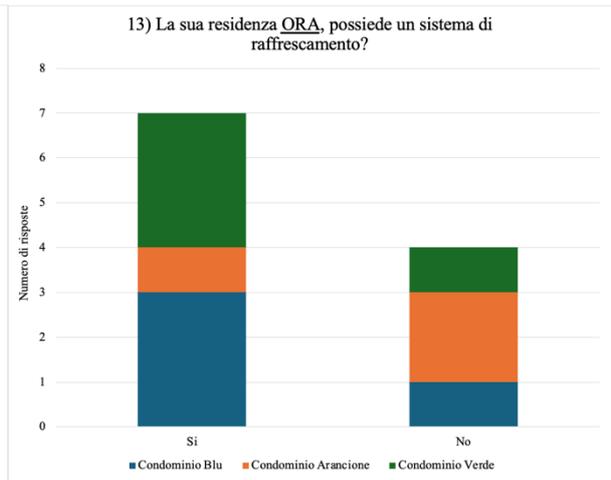
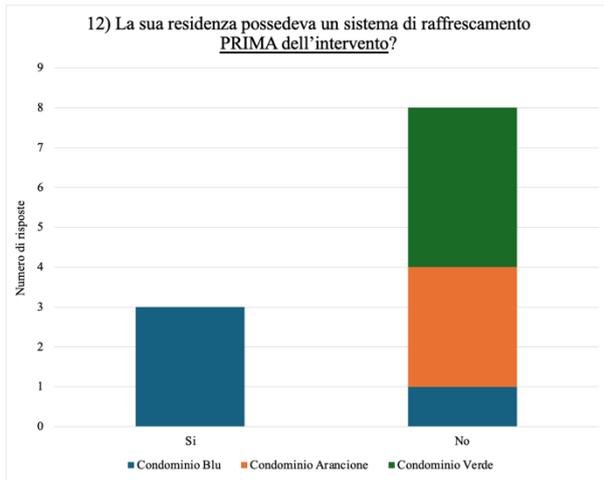
Considerando il numero complessivo di unità immobiliari, pari a circa 60, il tasso di risposta ottenuto si attesta intorno al 20%, un risultato considerato abbastanza soddisfacente per indagini volontarie condotte su base residenziale.

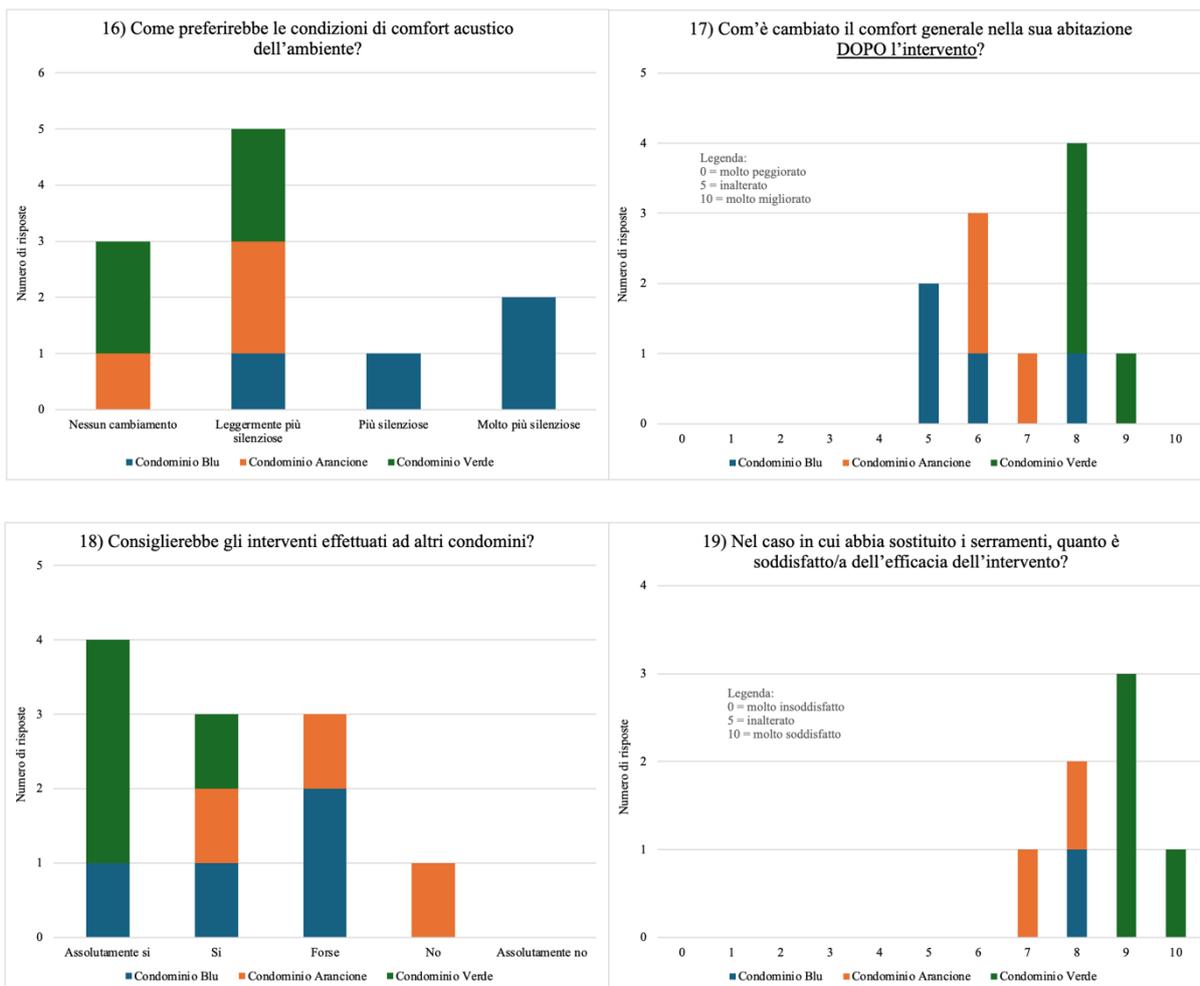
Successivamente verranno riportate in dettaglio le risposte a ciascuna domanda del questionario, distinguendo tra i tre condomini mediante l'utilizzo dei rispettivi colori; in modo da individuare eventuali tendenze in base alla tipologia di intervento realizzato.











Alla domanda numero 8, solo tre occupanti hanno segnalato la presenza di condensa o muffa in alcuni punti delle rispettive abitazioni. In particolare, nel condominio Blu il problema è stato rilevato tra la cucina e il salotto, mentre nel condominio Arancione è stato segnalato sia in camera da letto sia in soggiorno. Nel condominio Verde, invece, non sono emerse segnalazioni relative a condensa o formazione di muffa.

Alla domanda 9, un occupante del condominio Verde ha selezionato la voce “altro”, specificando che per riscaldare adeguatamente gli ambienti sarebbe stato necessario una temperatura dell'acqua tecnica circolante nei termosifoni maggiore, segnalando quindi che il riscaldamento non risultava sufficiente a garantire un comfort termico ottimale.

Alla domanda aperta numero 20 sono emerse alcune osservazioni utili per individuare possibili strategie di miglioramento del benessere abitativo. Nel condominio Blu, è stata suggerita l'installazione di bocchette di aerazione, con l'obiettivo di prevenire fenomeni di condensa e formazione di muffa, in modo da migliorare la qualità dell'aria interna. Nel condominio Verde, uno degli occupanti ha proposto l'adozione di tecnologie smart per il controllo da remoto dell'impianto di riscaldamento e per il monitoraggio in tempo reale dei consumi, sottolineando l'importanza di una gestione energetica consapevole e più efficiente. Per quanto riguarda il condominio Arancione, è stata riportata una segnalazione riguardo la mancanza di produzione di ACS durante le ore notturne, un disagio soprattutto per coloro che hanno necessità di utilizzarla nelle prime ore del mattino. Inoltre, alcuni residenti hanno

manifestato il desiderio di realizzare interventi più estesi sull'involucro edilizio, ritenendo non sufficiente il solo isolamento del sottotetto per garantire delle condizioni di comfort termico accettabili.

Nel complesso queste indicazioni rappresentano spunti di riflessione utili a guidare eventuali interventi futuri e a ottimizzare la gestione dei principali servizi condominiali, in particolare quelli legati alla climatizzazione invernale e alla produzione di ACS, con l'obiettivo di migliorare il comfort abitativo e il benessere psicofisico degli occupanti.

7.2 Analisi dei risultati secondo UNI EN ISO 10551

Nell'analisi dei risultati del questionario è stato scelto, in conformità alle indicazioni della normativa UNI EN ISO 10551, di utilizzare la media aritmetica come indice di tendenza principale per rappresentare le risposte fornite dagli occupanti. Questa scelta è giustificata dal fatto che le risposte risultano quasi sempre coerenti tra loro, senza la presenza di valori estremi significativi, e quindi la media risulta essere un indice rappresentativo dell'intero campione. Per ciascuna risposta verrà fornita una tabella riassuntiva (*Tabella 7.1*), in cui saranno riportati per le risposte numeriche:

- la media complessiva considerando tutte le risposte ricevute, indipendentemente dal condominio, in modo da individuare le tendenze generali;
- la media suddivisa per ciascun condominio, in modo da evidenziare differenze legate al tipo di intervento effettuato e al contesto abitativo.

Nel caso delle domande a risposta dicotomica e categorica, dove non è possibile calcolare la media aritmetica, verrà invece riportata la percentuale di risposta soddisfacente e la moda. Questi dati saranno utili per valutare il grado di soddisfazione rispetto agli interventi effettuati e alle condizioni abitative post-occupazionale.

La *Tabella 7.1* presenta una sintesi dei principali risultati emersi dall'analisi del questionario post-occupazionale. Oltre ai valori medi globali, sono state approfondite, per ciascun condominio, esclusivamente le risposte considerate rilevanti ai fini dell'analisi energetica ed economica.

Numero domanda	Media globale	Media condominio Blu	Media condominio Arancione	Media condominio Verde
n. 1	0,55	0,25	0	1,25
n. 2	72,73%	50%	66,67%	100%
n. 3	0,55	0,5	1	0,25
n. 4	72,73%	50%	66,67%	100%
n. 5	81,82%	75%	66,67%	100%
n. 6	7,18	7	6,67	7,75
n. 7.1	7,36	8	5,33	8,25
n. 7.2	6,64	6	5,33	8,25
n. 7.3	5,82	5,25	5	7
n. 7.4	7,45	8,25	5,33	8,25
n. 10	-1,73	-2,25	-1,67	-1,75
n. 11	18,18%	0%	0%	50%
n. 14.1	0,55	6,25	5,33	7,75
n. 14.2	6,64	6,5	5,33	7,5
n. 14.3	6,45	5,75	5,67	7,75
n. 15	6,1	4,5	5,33	8,25
n. 17	6,91	6	6,33	8,25
n. 19	8,57	8	7,5	9,25

Tabella 7.1 - Sintesi dei risultati ottenuti: media aritmetica e percentuale di soddisfazione.

Le prime nove domande del questionario riguardano il comfort termico durante la stagione invernale; le domande dalla 10 alla 14 si riferiscono invece al comfort nella stagione estiva, mentre quelle dalla 15 alla 20 sono dedicate alla valutazione del comfort generale in seguito alla realizzazione degli interventi di riqualificazione.

◆ Valutazione del comfort termico durante la stagione invernale

Alla prima domanda, relativa alla percezione del comfort termico attuale all'interno dell'abitazione, il valore medio delle risposte ottenute è pari a +0,55, indicando che, in generale, gli occupanti percepiscono l'ambiente interno come leggermente caldo rispetto alla condizione di neutralità (0). Alla seconda domanda, il 72,73% degli intervistati ha dichiarato di trovarsi in condizioni di comfort termico accettabili, confermando una soddisfazione generale. Inoltre, la moda delle risposte, ossia il valore più frequentemente scelto, coincide per tutti e tre i condomini analizzati, confermando una percezione diffusa di benessere termico. Alla terza domanda, volta a indagare la preferenza sulle condizioni di comfort, è stato rilevato un valore medio anch'esso pari a +0,55. Questo suggerisce una lieve tendenza a preferire condizioni termiche leggermente più calde rispetto a quelle attuali, ma comunque vicine alla neutralità. Nella quinta domanda, relativa alla tollerabilità delle condizioni di comfort termico, è emerso che circa l'82% si dichiara in grado di tollerare perfettamente le condizioni invernali presenti. Anche in questo caso, la moda delle risposte per ciascun condominio è risultata perfettamente tollerabile.

La domanda 6 riveste un ruolo molto importante all'interno di questo studio, in quanto consente, attraverso una valutazione soggettiva, di poter dichiarare che la temperatura di set-point interna, impostata mediante il termostato, è maggiore o minore di 20 °C. Non essendo stato possibile effettuare misurazioni oggettive della temperatura interna, il questionario ha rappresentato l'unico strumento al fine di ottenere un'indicazione utile per l'obiettivo finale. Il

valore medio globale è pari a 7,18 su una scala da 0 a 10, indicando un comportamento che tende a mantenere una temperatura interna relativamente più alta dei 20°C. Tale comportamento è particolarmente evidente nel condominio Blu (7) e nel condominio Verde (7,75), dove gli occupanti hanno dichiarato di aver aumentato la temperatura interna di set-point. Perciò grazie ai questionari, si può dimostrare come i risparmi energetici effettivamente ottenuti risultino inferiori rispetto a quelli stimati dagli APE. Ciò avviene anche perché le condizioni di utilizzo dell'edificio post-intervento non coincidono con quelle ipotizzate in fase progettuale, confermando così che la causa del performance gap è legato ai comportamenti d'uso reali degli occupanti.

Le domande relative a come sia cambiata la percezione della temperatura interna tra prima e dopo l'intervento hanno restituito dei valori medi pari a: 7,36 indicando che gli ambienti sono percepiti come un po' più caldi rispetto alla situazione pre-retrofit, 5,82 indicando un leggero miglioramento della stabilità della temperatura durante il giorno e 7,45 come valutazione complessiva della soddisfazione indicando un miglioramento generale del comfort termico percepito d'inverno. In riferimento alla formazione di condensa e muffe, la percentuale di occupanti che ha dichiarato di aver riscontrato tali problemi è pari a circa il 27%. Infine, per quanto riguarda la domanda 9, non presentata in **Tabella 7.1**, relativa alle cause principali di discomfort prima dell'intervento, la problematica più citata, segnalata dal 45% degli intervistati, è stata la presenza di superfici fredde, causata da scarsa coibentazione dell'involucro edilizio e dalla presenza di ponti termici. Un'altra criticità importante, citata da tre occupanti, è stata l'impossibilità di regolare correttamente il sistema di RSC.

◆ **Valutazione del comfort termico durante la stagione estiva**

Per quanto riguarda il comfort termico durante la stagione estiva, le risposte al questionario evidenziano alcune criticità percepite dagli occupanti. Alla domanda 10, che chiedeva come venisse percepita la temperatura interna in estate, il valore medio della risposta è stata di -1,73 (su una scala da -4 a +4), corrispondente ad una valutazione compresa tra "leggermente caldo" e "caldo", suggerendo che gli ambienti risultano avere una temperatura piuttosto elevata durante l'estate. Infatti, anche in merito alla tollerabilità delle condizioni estive, solo il 18% degli intervistati ha dichiarato che le condizioni sono perfettamente tollerabili, mentre una parte significativa ha espresso una difficoltà nel sopportare il caldo estivo: sette occupanti hanno indicato che le condizioni sono "leggermente intollerabili" e altri due le hanno definite addirittura "difficili da tollerare". Dalle domande 12 e 13 è emerso che quattro occupanti hanno installato un sistema di raffrescamento durante la realizzazione degli interventi, con prevalenza nel condominio Verde (3).

Infine, le valutazioni relative alla percezione della temperatura interna dopo l'intervento, rispetto al periodo pre-retrofit, indicano un miglioramento minimo. Il valore medio della domanda 14.1, relativa al miglioramento della percezione della temperatura interna, è pari a 6,55. Anche la stabilità della temperatura interna risulta lievemente migliorata, con un valore medio di 6,64, mentre il livello di soddisfazione generale in estate si attesta a 6,45.

◆ Valutazione del comfort generale dopo l'intervento di riqualificazione

La domanda 15 ha valutato i cambiamenti apportati dall'intervento di riqualificazione in merito all'isolamento acustico. Su una scala da 0 a 10, il valore medio globale ottenuto è pari a 6,1, indicando un miglioramento moderato rispetto alla situazione pre-retrofit. Analizzando nel dettaglio i dati suddivisi per condominio, si osserva un miglioramento significativo nel condominio Verde, dove il valore medio è pari a 8,25. Al contrario, nel condominio Blu, diversi occupanti hanno segnalato problematiche legate all'isolamento acustico, indicando addirittura un peggioramento delle condizioni di comfort acustico rispetto alla situazione antecedente all'intervento. Nel condominio Arancione la condizione dell'isolamento acustico è rimasta pressoché invariata. In linea con queste risposte, alla domanda successiva, che chiedeva come gli occupanti preferirebbero le condizioni di comfort acustico, solo il 27% degli intervistati ha dichiarato di non desiderare alcun cambiamento. Una percentuale significativa, pari al 46%, ha espresso la preferenza di volere ambienti leggermente più silenziosi; inoltre, due occupanti del condominio Blu hanno risposto che preferirebbero condizioni di comfort acustico molto più silenziose, evidenziando una condizione di disturbo acustico all'interno dell'edificio.

Questi dati sottolineano l'importanza di interventi mirati anche sul piano acustico, spesso trascurato nelle riqualificazioni energetiche, ma essenziale per il benessere complessivo degli occupanti e in linea con i principi definiti dal WELL Building Standard.

Le ultime tre domande del questionario hanno fornito indicazioni utili sul comfort generale percepito dagli occupanti dopo gli interventi di riqualificazione. In particolare, alla domanda 17, relativa al cambiamento del comfort abitativo generale, la media globale è risultata pari a 6,91, evidenziando un miglioramento discreto. Questo dato riflette, da una parte l'incremento marcato del comfort termico, dall'altra dei benefici acustici più contenuti. A livello di singolo condominio, il comfort generale post-intervento è stato valutato 6 nel condominio Blu, 6,33 in quello Arancione e 8,25 nel condominio Verde, quest'ultimo con risultati significativamente più positivi rispetto agli altri.

Alla domanda 18, riguardante la propensione a consigliare gli interventi effettuati, il 36,4% degli intervistati ha risposto "assolutamente sì", il 27,3% ha selezionato la voce "sì", per un totale di circa 64% di giudizi positivi. Soltanto il 9% ha espresso parere negativo. È particolarmente rilevante il dato sul condominio Verde, in cui il 75% degli occupanti ha risposto "assolutamente sì", confermando la maggiore soddisfazione generale rilevata anche nelle altre risposte.

Infine, alla domanda 19, relativa alla soddisfazione per l'eventuale sostituzione dei serramenti, 7 occupanti hanno dichiarato di averli sostituiti, riportando una media di soddisfazione pari a 8,57. I valori medi per singolo condominio sono: 8,00 per il condominio Blu, 7,50 per l'Arancione e 9,25 per il Verde, confermando una percezione molto positiva dell'efficacia di tale intervento. I suggerimenti emersi per migliorare ulteriormente il benessere abitativo sono stati già introdotti nel **Capitolo 7.1**.

Il questionario ha rappresentato uno strumento di indagine qualitativa mirato a indagare il cambiamento del livello di soddisfazione generale degli occupanti a seguito degli interventi di riqualificazione energetica. Questo approccio si affianca all'analisi energetica, integrandola con valutazioni soggettive utili a comprendere l'effettivo miglioramento del comfort percepito all'interno delle abitazioni. La costruzione del questionario post-occupazionale è stata ispirata cercando di valutare la soddisfazione dei principali parametri del WELL Building Standard,

con l'obiettivo di valutarne l'efficacia come strumento di supporto per analisi quantitative. I dati raccolti si sono rivelati preziosi per interpretare alcuni scostamenti tra prestazioni attese e reali, come nel caso della temperatura interna di set-point più elevata rispetto alla fase di progetto, evidenziata dalla risposta alla domanda 6, e utile a spiegare la traslazione rigida della firma energetica verso l'alto.

Le risposte hanno inoltre fornito indicazioni utili ai progettisti, alle imprese ma soprattutto agli stessi residenti, offrendo spunti per migliorare la qualità degli ambienti interni. L'adozione del protocollo WELL Building Standard come riferimento per la costruzione del questionario ha consentito di valutare il comfort abitativo in una prospettiva più ampia, non limitata al solo aspetto termico, ma includendo anche componenti acustiche, psicofisiche e ambientali.

Le criticità riscontrate, ad esempio il disagio estivo e i problemi legati al comfort acustico, evidenziano la necessità di un approccio progettuale coerente con i principi del WELL Building Standard, che valorizzi il benessere psicofisico degli utenti attraverso strategie architettoniche intelligenti, capaci di regolare il microclima interno in modo naturale ed efficiente.

Tuttavia, uno dei principali limiti dello studio risiede nella soggettività delle risposte: le percezioni degli utenti possono essere influenzate da fattori emotivi, esperienze personali e condizioni ambientali. Nonostante ciò, l'indagine post-occupazionale si è dimostrata un valido strumento per capire le cause del performance gap e gli effetti percepiti in seguito alla realizzazione degli interventi di riqualificazione energetica. Infine, si conclude affermando che, se avessimo avuto a disposizione dati misurati relativi a grandezze termoigrometriche (temperatura interna e umidità), sarebbe stato possibile condurre valutazioni più precise e meno influenzate da considerazioni soggettive.

8. CONCLUSIONI

In un momento storico segnato da crisi energetiche, instabilità geopolitiche e obiettivi climatici ambiziosi, la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio si afferma come una leva strategica verso un futuro sostenibile del nostro Paese. L'Italia, fortemente dipendente dalle importazioni energetiche, ha dovuto affrontare negli ultimi anni l'aumento dei prezzi dell'energia, dovuto sia a scarsi investimenti durante la pandemia sia a eventi come il conflitto russo-ucraino. Ridurre i consumi energetici diventa quindi una priorità non solo ambientale, ma anche economica e politica, per garantire una maggiore indipendenza energetica nazionale.

◆ Risultati del Superbonus 110%

Per accelerare la transizione energetica, l'Unione Europea ha imposto una forte riduzione delle emissioni: -55% entro il 2030 rispetto ai valori registrati nel 1990, con l'obiettivo finale di arrivare alla neutralità climatica entro il 2050. Al fine di ottenere questi traguardi il mio lavoro di tesi, dedicato all'efficientamento energetico in ambito edilizio, riveste un ruolo di particolare importanza al fine di valutare l'impatto effettivo del Superbonus 110%. Il settore civile è un settore molto inefficiente, infatti, più del 65% degli edifici residenziali ha oltre 45 anni, inoltre, è tra i principali responsabili delle emissioni di CO₂ e dei consumi energetici, contribuendo per circa il 40% ai consumi totali nazionali e per oltre il 20% alle emissioni di gas serra. Intervenire sugli edifici esistenti meno efficienti rappresenta, quindi, una scelta che non è più rinviabile.

L'analisi effettuata ha messo in luce i principali risultati del Superbonus 110%, introdotto nel 2020, che ha avuto l'obiettivo di rilanciare il settore edilizio, incentivare l'efficienza energetica e contribuire alla ripresa economica post-pandemica. I numeri parlano chiaro: al 31 dicembre 2024 la spesa complessiva per il solo Super Ecobonus ha raggiunto i 124 miliardi di euro a carico dello Stato, con una netta prevalenza degli interventi nei condomini (il 67,1% degli investimenti totali). Diversi studi stimano, però, che circa il 50% della spesa sostenuta dallo Stato per il Superbonus rientri sotto forma di gettito fiscale, attraverso entrate derivanti da IVA, tasse e contributi sociali legate all'incremento dell'attività economica nel settore delle costruzioni. Sul piano economico, l'impatto è stato inizialmente positivo: fino al 2023 si è registrata una crescita cumulata del PIL pari al +2,3%, che ha reso la misura autofinanziata nei suoi primi anni di applicazione. Questo effetto è andato via via attenuandosi a causa del calo degli investimenti e dell'aumento del debito pubblico. Non possono essere trascurati altri importanti benefici: oltre 641.000 nuovi occupati diretti nel settore delle costruzioni e altri 351.000 indiretti, per un totale di quasi un milione di posti di lavoro creati. Inoltre, il meccanismo della cessione del credito e dello sconto in fattura ha reso l'incentivo più accessibile anche alle famiglie con minore disponibilità economica e senza nessuna capienza fiscale, contribuendo così a una maggiore equità sociale. Va anche considerato l'aumento generalizzato dei prezzi nel settore. Questo effetto è stato accentuato da comportamenti speculativi, favoriti dalla mancanza di un contrasto d'interesse tra chi commissionava e chi eseguiva i lavori, portando spesso a una massimizzazione dei costi ed a una conseguente crescita della spesa pubblica.

Diversi studi hanno cercato di quantificare teoricamente l'impatto energetico e ambientale del Superbonus. Secondo il report annuale di ENEA, il risparmio energetico complessivo generato dagli interventi incentivati dal Super Ecobonus è stato stimato in circa 13.500 GWh/anno, con una riduzione media delle emissioni di CO₂ del 50% secondo un'analisi condotta da Nomisma, che ha stimato una diminuzione complessiva di 1,42 milioni di tonnellate di CO₂, pari allo 0,46% delle emissioni nazionali del 2022, e un taglio di circa 1,1 miliardi di m³ di gas, pari all'1,61% del consumo nazionale. Anche l'analisi di Gabetti Lab conferma risultati rilevanti: -53% di fabbisogno energetico medio, -40% di consumo di gas, -43% di costi in bolletta e -51% di emissioni di CO₂ negli edifici riqualificati.

Tuttavia, tutti questi studi risalgono al 2023, in una fase ancora troppo prematura per poter valutare gli effetti concreti sulla base dei consumi energetici reali.

◆ **Aspettative vs risultati reali**

Attraverso le misurazioni reali dei consumi di gas naturale e dell'energia elettrica, è stata condotta una valutazione dei risparmi energetici reali ottenuti sui tre condomini residenziali. L'analisi si è articolata in due fasi: dapprima è stato creato un modello di firma energetica e attraverso l'approccio model-to-point è stato stimato il risparmio di gas naturale neutralizzando l'effetto del clima; parallelamente, è stato eseguito un bilancio mensile dell'energia elettrica per valutare il risparmio elettrico grazie all'installazione degli impianti fotovoltaici, in conformità con la UNI/TS 11300 parte 4 e 5.

I risultati mostrano che i risparmi energetici stimati attraverso gli APE risultano superiori rispetto a quelli ottenuti dalla valutazione dei consumi effettivi post-intervento. Nonostante ciò, i risultati reali confermano una riduzione sia del fabbisogno di energia primaria non rinnovabile, sia delle emissioni di CO₂, dimostrando comunque l'efficacia degli interventi di efficientamento energetico realizzati. Per i tre condomini, il risparmio medio stimato di energia primaria non rinnovabile si attesta al 50,4%, mentre quello reale risulta pari al 37,03%, evidenziando uno scostamento di circa 13 punti percentuali. Allo stesso modo, per quanto riguarda le emissioni di CO₂, si osserva un risparmio medio teorico pari al 48,26%, contro un valore reale medio del 37,45%, con uno scostamento dell'ordine dell'11%. Questi risultati confermano che le valutazioni teoriche basate sugli APE, su cui si basano diversi studi come quelli condotti da Nomisma e GabettiLab, rappresentano solamente un riferimento progettuale, ma non riflettono il risparmio effettivamente raggiunto. L'analisi effettuata offre un contributo alla valutazione dell'impatto energetico e ambientale reale del Superbonus 110%.

Alla luce dei risultati, appare necessario ripensare ai requisiti, considerati discutibili, su cui si è basato il Superbonus 110%: più che premiare il "doppio salto di classe energetica" sulla base di stime teoriche, sarebbe stato sicuramente più efficace riconoscere i contributi economici sulla base dei risparmi energetici e delle riduzioni di emissioni effettivamente raggiunte. Come dimostrato dai casi studio analizzati, infatti, i risparmi attesi non trovano corrispondenza nella realtà.

Il confronto tra i risparmi stimati attraverso gli APE e quelli calcolati tramite dati reali ha consentito di individuare la presenza di un performance gap, ovvero un divario tra le prestazioni energetiche previste in fase progettuale e quelle effettivamente ottenute. Le cause emerse di tale scostamento sono molteplici. In primo luogo, è stato osservato che, a fronte del risparmio economico ottenuto grazie alla realizzazione degli interventi, gli occupanti tendono ad

aumentare il proprio livello di comfort termico, incrementando la temperatura interna di set-point rispetto al periodo pre-retrofit. Questo comportamento, noto in letteratura come *rebound effect*, comporta un aumento dei consumi energetici reali e riduce i potenziali risparmi teorici. Tale fenomeno è stato confermato sia dall'analisi delle firme energetiche, sia dai risultati del questionario post-occupazionale, elaborato secondo la norma ISO 10551 e i principi del WELL Building Standard, e somministrato ai condòmini nel 2025 in formato cartaceo e digitale.

Infatti, dalle firme energetiche è emerso che, la temperatura di accensione dell'impianto di RSC, tra prima e dopo la realizzazione degli interventi, nei condomini Blu e Arancione è incrementata rispettivamente di circa 0,5 °C e 0,25 °C. Poiché le firme pre-retrofit ideali modellate tramite Edilclima coincidono con le firme reali, lo scostamento non è attribuibile a una sovrastima degli apporti interni gratuiti ma solo ad un aumento della temperatura interna di set-point. Anche nel condominio Verde, dove non sono stati eseguiti interventi sugli impianti, la firma energetica post-retrofit risulta traslata verso l'alto rispetto a quella di progetto, a conferma di una temperatura interna mantenuta dagli occupanti superiore a quella di progetto e pari a 20 °C. Questo comportamento trova ulteriore supporto nei risultati alle domande 6 e 7.1 del questionario, dove su una scala Likert da 0 a 10, alla domanda: se gli occupanti impostano una temperatura di set-point maggiore di 20°C, la risposta è stata pari a 7,18, con valori particolarmente elevati nel condominio Blu (7,00) e nel condominio Verde (7,75).

Un'ulteriore causa del performance gap nei condomini Blu e Arancione è legata alla differenza tra il funzionamento impiantistico ideale e l'effettivo comportamento in esercizio, fenomeno noto come "*design vs as-built*". Infatti, in questi condomini, l'integrazione tra pompe di calore e caldaie a condensazione su un unico accumulo inerziale ha creato diverse criticità operative. I terminali di emissione, costituiti da radiatori ad alta temperatura, impongono temperature di mandata superiori ai 55 °C (temperatura di cut-off della pompa di calore), limite oltre il quale la pompa di calore perde efficienza e viene spenta. Inoltre, dallo stesso puffer parte anche il circuito per la produzione di ACS, che richiede temperature elevate, aggravando il problema. Questa configurazione fa sì che l'effettivo funzionamento della pompa di calore sia trascurabile rispetto a quello ipotizzato da progetto, vanificando parte dei benefici in termini di risparmio di energia primaria non rinnovabile, in quanto aumentano le ore di funzionamento delle caldaie a gas. Infatti, nel condominio Blu, la pompa di calore ha assorbito solamente il 3,7% del fabbisogno elettrico previsto in fase progettuale, mentre nel condominio Arancione l'utilizzo è stato ancora più limitato, fermandosi all'1,53% e concentrandosi esclusivamente per la produzione di ACS. Per superare tali criticità, sarebbe opportuno prevedere la separazione dei circuiti primari e l'adozione di sistemi di emissione a bassa temperatura, soluzioni che consentirebbero uno sfruttamento maggiore della pompa di calore, aumentando così i risparmi di energia primaria non rinnovabile, anche attraverso un maggior autoconsumo dell'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico.

Infine, va considerata una terza causa legata al metodo di confronto tra i consumi: mentre gli APE utilizzano un clima standard definito dalla UNI 10349, il presente studio, attraverso la firma energetica e l'approccio model-to-point, valuta i consumi reali nell'anno 2023-2024, neutralizzando l'effetto del clima. Questo approccio è volutamente cautelativo, poiché considera la temperatura media mensile reale registrata a Udine, risultata negli ultimi 5 anni superiore mediamente di 1,2 °C rispetto a quella definita da normativa. Ne deriva che i risparmi valutati sono leggermente sottostimati ma più rappresentativi di un contesto climatico attuale;

infatti, con un clima più rigido, come quello utilizzato negli APE, i risparmi reali sarebbero risultati più elevati.

Al fine di approfondire ulteriormente l'analisi del performance gap, è stata condotta una simulazione con il software Edilclima, fornendo in input i consumi reali di gas naturale ed energia elettrica, normalizzando i consumi per il riscaldamento rispetto alle condizioni climatiche medie, tramite l'uso dei GG mensili definiti da normativa. Questa procedura ha permesso di isolare il rebound effect e il fenomeno design vs as-built. Attraverso questi dati, è stata stimata una nuova classe energetica fittizia, non valida ai fini certificativi, ma utile per valutare lo scostamento prestazionale reale e progettuale. I risultati mostrano una situazione di under performance rispetto alle classi previste: nel condominio Blu si passa da A2 a A1, in quello Arancione da B a C, mentre nel Verde il salto da D a B è stato confermato. Inoltre, l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile è risultato dal 16% al 49% superiore ai valori di progetto, mentre quello rinnovabile si è ridotto fino all'80%, confermando una notevole distanza tra le prestazioni teoriche e quelle effettivamente raggiunte.

◆ Questionari di POE

Le valutazioni oggettive condotte tramite dati reali misurati, sono state integrate attraverso un'analisi soggettiva mediante un questionario di valutazione post-occupazione, adattato al contesto residenziale. I risultati mostrano un miglioramento percepito del comfort abitativo generale, con una media di 6,91 su 10, che raggiunge 8,25 nel condominio Verde. Inoltre, il 64% degli intervistati si è detto favorevole a consigliare gli interventi effettuati, con picchi del 75% nel condominio Verde, a conferma di una maggiore soddisfazione complessiva.

◆ Sistema di incentivazione innovativo

L'analisi economica preliminare ha evidenziato l'elevata convenienza degli interventi realizzati grazie al Superbonus, con tempi di ritorno attualizzati inferiori a due anni sia per il condominio Blu che per quello Arancione. Tuttavia, in uno scenario senza incentivi, applicando i costi attuali di realizzazione delle opere, gli interventi risultano economicamente insostenibili, con PBT finanziari che superano i 100 anni, ad eccezione del condominio Arancione in cui è pari a 29 anni.

Successivamente è stato sviluppato un terzo scenario con l'obiettivo di individuare un'aliquota di incentivazione definita "ottimale", tarata sui risparmi reali e in grado di garantire un tempo di ritorno finanziario di 10 anni. I risultati ottenuti mostrano una buona coerenza con le attuali aliquote di incentivo nel settore edilizio: per il condominio Arancione i valori coincidono perfettamente con quelli in vigore, mentre per gli altri due condomini le percentuali sono più alte. In particolare, l'analisi riporta aliquote del 79,37% per il Blu, 55,5% per l'Arancione e 93% per il Verde. Ad ogni modo, questo scenario è molto più sostenibile per lo Stato rispetto al Superbonus 110%, in quanto riesce a garantire un buon incentivo per i cittadini, riducendo allo stesso tempo la spesa pubblica.

È stato proposto un modello di incentivazione misto, che combina un contributo a fondo perduto e un fondo rotativo garantito dallo Stato, rimborsato tramite i risparmi in bolletta. Il meccanismo è pensato per le famiglie a basso reddito e, prevede un sistema di bonus/malus basato sui risparmi energetici effettivi.

È stata infine distinta la spesa attribuibile all'efficientamento energetico da quella imputabile al miglioramento estetico, ritenendo quest'ultima non incentivabile. Ciò ha permesso di ridurre l'investimento iniziale reale e, di conseguenza, la percentuale di incentivazione necessaria, pur mantenendo costanti gli indicatori economici. Nel condominio Arancione gli interventi miravano solo al risparmio energetico, mentre nei condomini Blu e Verde è stato incluso anche un miglioramento estetico, ossia il rifacimento delle facciate. Per questo motivo, è stata considerata solo la parte di spesa effettivamente legata all'efficienza energetica (isolamento), pari al 60% e al 66% del costo complessivo delle opere edili, rispettivamente per il condominio Blu e Verde. Escludendo i costi estetici, l'investimento iniziale si riduce e di conseguenza diminuisce anche l'aliquota incentivabile necessaria a raggiungere un PBT pari a 10 anni: nel condominio Blu scende al 70,36% e nel Verde al 90,78%, mentre nell'Arancione resta invariato. Nel condominio Verde, l'investimento continua a rimanere elevato rispetto ai risparmi energetici ottenuti. Per garantire un tempo di ritorno sostenibile, è quindi necessaria un'alta percentuale dell'incentivo, a dimostrazione che interventi su condomini che hanno bassi consumi e, quindi, un basso potenziale di risparmio richiedono un forte supporto pubblico per risultare economicamente vantaggiosi.

L'ultima analisi effettuata riguarda l'incremento del valore di mercato degli immobili, dal quale emerge che gli interventi realizzati nei condomini Blu e Arancione risultano giustificati dal punto di vista dell'incremento del valore immobiliare, mentre nel condominio Verde tale incremento non è sufficiente a compensare l'investimento sostenuto.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Neri Antonino, 2022, *Energia Oltre, I combustibili fossili sono finiti? Secondo una ricerca la fase critica è in corso*, ultimo accesso: 28/03/2025. URL: <https://energiaoltre.it/leconomia-globale-si-sta-rendendo-conto-che-i-combustibili-fossili-sono-finiti/>.
- [2] Salvalai Graziano, 2015, *Edifici ad energia quasi zero (nZEB)*, Maggioli Editore, parte A: efficienza energetica in edilizia, cit. alle pp 7-17.
- [3] ENEA, dicembre 2024, *Rapporto Annuale sull'Efficienza Energetica*, cit. alle pp 9-64, URL: <https://www.energiaenergetica.enea.it/pubblicazioni/raee-rapporto-annuale-sull-efficienza-energetica.html>.
- [4] La Redazione, 2024, *Rinnovabili, PNIEC Italia: gli obiettivi 2030 su rinnovabili ed emissioni*, ultimo accesso: 01/04/2025. URL: <https://www.rinnovabili.it>.
- [5] Portale Agenzia delle Entrate, *Superbonus 110%*, ultimo aggiornamento: 10/10/2024, ultimo accesso: 04/04/2025. URL: <https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/superbonus-110->.
- [6] Portale Agenzia delle Entrate, *Superbonus 110%*, ultimo aggiornamento: giugno 2022, ultimo accesso: 02/04/2025. URL: https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/documents/20143/233439/Guida_Superbonus_110_2022.pdf/21e9100a-9d7e-f582-4f76-2edcf1797e99.
- [7] Consorzio Nazionale CAAF, *Super Ecobonus 110%: Chi può usufruirne e su quali immobili*, ultimo accesso: 17/03/2025. URL: <https://www.cafcgil.it/articoli/detrazione-110-chi-puo-usufruirne-e-su-quali-immobili>.
- [8] Agenzia delle Entrate, *Tutte le AGEVOLAZIONI della dichiarazione 2024, Superbonus*, ultimo accesso: 19/03/2025. URL: https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/documents/20143/6184203/13_Superbonus.pdf/c8764258-e7fb-2a87-9b96-8f94104de83b.
- [9] Redazione Anci, 17/03/2022, *Bonus edilizi – In Gazzetta il Decreto Prezzi del MiTE*, ultimo accesso: 22/03/2025. URL: <https://www.anci.it/bonus-edilizi-in-gazzetta-il-decreto-prezzi-del-mite/>.
- [10] ENEA, marzo 2025, *Report Annuale Detrazioni Fiscali*, ultimo accesso: 25/03/2025. URL: <https://www.energiaenergetica.enea.it/pubblicazioni.html>.
- [11] Camera dei deputati, 29/05/2024, *La dimensione economica del Superbonus*, ultimo accesso: 7/04/2025. URL: <https://temi.camera.it/leg19/post/la-dimensione-economica-del-superbonus.html>.
- [12] Istat, *Produzioni nelle costruzioni, 2019, Annuario Statistico Italiano*, ultimo accesso: 06/04/2025. URL: <https://www.istat.it/wp-content/uploads/2019/12/C18.pdf>.

- [13] Ricotti Giacomo, 21/02/2023, *Audizione nell'ambito dell'indagine conoscitiva sugli strumenti di incentivazione fiscale con particolare riferimento ai crediti di imposta*, ultimo accesso: 02/04/2025. URL: <https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/interventi-vari/int-var-2023/Ricotti-2023.02.21.pdf>.
- [14] Galli G., Scinetti F., Scutifero N., 02/03/2023, *Gli effetti del Superbonus 110% sull'economia e sul bilancio pubblico*, Osservatorio sui Conti Pubblici Italiani.
- [15] Accetturo A., Olivieri E., Renzi F., giugno 2024, *Incentives for dwelling renovations: evidence from a large fiscal programme*, Banca d'Italia numero 860.
- [16] Federazione Nazionale Lavoratori Edili Affini e del Legno, 09/07/2024, *L'evoluzione del Superbonus 110% e i suoi effetti sull'economia*, ultimo accesso: 02/04/2025. URL: <https://blog.fenealuil.it/2024/07/09/evoluzione-del-superbonus-110-effetti-economia/>.
- [17] Osservatorio sulla finanza pubblica della Camera dei deputati, maggio 2024, *Effetti del Superbonus e del Bonus facciate sul quadro di finanza pubblica*, Dossier n. OFP04.
- [18] Associazione Nazionale Costruttori Edili, 06/04/2023, *Superbonus 110%: Quanto costa davvero allo Stato?* Direzione Affari Economici, Finanza e Centro Studi. URL: https://ance.it/wp-content/uploads/allegati/Effetti_macro_Superbonus.pdf.
- [19] OCPI, 21/03/2024, *Post mortem per il Superbonus: extra deficit, extra debito e rallentamento in atto nel settore delle costruzioni*, ultimo accesso: 04/04/2025. URL: <https://osservatoriocpi.unicatt.it/ocpi-pubblicazioni-post-mortem-per-il-superbonus-extra-deficit-extra-debito-e-rallentamento-in-atto>.
- [20] Fondazione Nazionale di Ricerca dei Commercialisti, 22/12/2022, *L'impatto economico del superbonus 110% e il costo effettivo per lo Stato dei bonus edilizi*, ultimo accesso: 09/04/2025. URL: <https://www.fondazioneNazionaleCommercialisti.it/node/1669>.
- [21] Valentini Fabiana, 12/06/2023, *Il Superbonus? Una misura positiva per il PIL secondo lo studio della Fondazione Nazionale di Ricerca dei Commercialisti*, ultimo accesso: 09/04/2025. URL: <https://www.infobuild.it/superbonus-misura-positiva-pil-fondazione-commercialisti/>.
- [22] ENEA, luglio 2024, *La consistenza del parco immobiliare nazionale*, cit. alle pp 78-83, ISBN Edizione digitale: 978-88-8286-482-8.
- [23] Nomisma, 21/02/2023, *110% Monitor: l'analisi Nomisma per misurare l'impatto economico della misura del Superbonus 110%*, ultimo accesso: 09/04/2025. URL: <https://www.nomisma.it/press-area/superbonus-nomisma-comunicato-stampa/>.
- [24] Censis, 16/11/2022, *Ecobonus e superbonus per la transizione energetica del Paese*, ultimo accesso: 09/04/2025. URL: <https://www.censis.it/territorio-e-reti/ecobonus-e-superbonus-la-transizione-energetica-del-paese-1>.
- [25] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, giugno 2024, *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC)*, cit. alla pp 75.

- [26] Gabetti Property Solutions, 20/03/2022, *Le opportunità della riqualificazione energetica: i numeri di una politica fiscale che guarda al futuro*. URL: <https://www.gabettigroup.com/>.
- [27] Papi Luca, ottobre 2024, *Superbonus o Supermalus? Un addendum per un bilancio dei recenti incentivi fiscali in materia edilizia*, Quaderno di ricerca n. 490, ISSN:2279-9575.
- [28] Camera dei deputati, 29/05/2024, *La dimensione economica del Superbonus*, ultimo accesso: 08/04/2025. URL: <https://temi.camera.it/leg19/post/la-dimensione-economica-del-superbonus.html>.
- [29] Furcolo Nicola, Ingenio, 28/12/2024, *Bonus casa 2025: la mappa completa sulle detrazioni per interventi edilizi*, ultimo accesso: 08/04/2025. URL: <https://www.ingenio-web.it/articoli/bonus-casa-2025-la-mappa-completa-sulle-detrazioni-per-interventi-edilizi/>.
- [30] Meloni Emanuele, InfoBuild, 14/01/2025, *Bonus edilizi 2025: tutte le novità dalla legge di bilancio*, ultimo accesso: 08/04/2025. URL: <https://www.infobuild.it/approfondimenti/bonus-edilizi-2025-legge-di-bilancio/>.
- [31] ANCE, Associazione Nazionale Costruttori Edili, gennaio 2025, *Osservatorio Congiunturale sull'industria delle costruzioni*, capitolo 1.
- [32] Commissione europea, *Energy Performance of Buildings Directive IV*, ultimo accesso: 08/04/2025. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en.
- [33] Nomisma, 25/02/2025, *Direttiva EPBD, un'opportunità di rilancio per il Sistema Paese: l'analisi Nomisma per ROCKWOOL*, ultimo accesso: 09/04/2025. URL: <https://www.nomisma.it/press-area/direttiva-epbd-analisi-nomisma-per-rockwool/>
- [34] Sivori Daniele, ALVEARIA.net, 26/03/2021, *ECOBONUS: come funziona nei principali paesi europei*, ultimo accesso: 09/04/2025. URL: <https://alvearia.net/ecobonus-come-funziona-nei-principali-paesi-europei/>
- [35] Start Magazine, 05/05/2024, *I Superbonus degli altri Paesi, Report Bankitalia*, ultimo accesso: 09/04/2025. URL: <https://www.startmag.it/energia/superbonus-confronto-estero-bankitalia/>.
- [36] Sommariva Alvisè, 09/04/2025, *Interpolazione Lineare a tratti e Spline*, Università degli studi di Padova.
- [37] J.C. Baltazar, David Claridge, gennaio 2002, “*Restoration of Short Periods of Missing Energy Use and Weather Data Using Cubic Spline and Fourier Series Approaches: Qualitative Analysis*”, ResearchGate.
- [38] Morkunaite L., Pupeikis D., Tsalikidis N. et al., 1/06/2025, *Energy and Buildings*, volume 336, *Efficiency in building energy use: Pattern discovery and crisis identification in hot-water consumption data*.

- [39] Belussi Lorenzo, Danza Ludovico, 3/09/2012, “*Method for the prediction of malfunctions of buildings through real energy consumption analysis: Holistic and multidisciplinary approach of Energy Signature*”, *Energy and Buildings*, vol. 55 715-720.
- [40] Oleksii Pasichnyi, Jörgen Wallin, Olga Kordas, 15/08/2019, “*Data-driven building archetypes for urban building energy modelling*”, *Energy*, vol. 181, pp 360-377.
- [41] Xing Shi, Binghui Si, Jiangshan Zhao, 12/02/2019, “*Magnitude, Causes, and Solutions of the Performance Gap of Buildings: A Review*”, *Sustainability* 2019, vol. 937; <https://doi.org/10.3390/su11030937>.
- [42] Minna Sunikka Blank, Ray Galvin, 01/06/2012, “*Introducing the rebound effect: the gap between performance and actual energy consumption*”, *Building Research & Information*, vol. 40.
- [43] YouBuild, 23/04/2024, “*Indagine Gabetti: quanto si è disposti a pagare in più per una casa efficiente?*”. URL: <https://www.youbuildweb.it/indagine-gabetti-quanto-si-e-disposti-a-pagare-in-piu-per-una-casa-efficiente/>
- [44] Maryam Gholamzadehmir, Alessandra Maria Pandolfi, C. Del Pero, F. Leonforte, L. Sdino, 25/05/2025, “*Increasing the Market Value of Buildings Through Energy Retrofitting: A Comparison of Actual Retrofit Costs and Perceived Values*”, *MDPI Buildings*. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings15030376>
- [45] Ezio Micelli, Giulia Giliberto, Eleonora Righetto, 03/04/2025, “*Is the Energy Transition of Housing Financially Viable? Unlocking the Potential of Deep Retrofits with New Business Models*”, *MDPI Buildings*. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings15071175>
- [46] Dispense di: “*Gestione energetica e automazione negli edifici*”, professore Alfonso Capozzoli; approccio “*model-to-point*” per la valutazione del risparmio energetico attraverso un modello di regressione lineare.

APPENDICE A

Implementazione del codice VBA in Excel per l'Interpolazione Spline Cubica dei dati di consumo energetico.

Function CubicSplineInterpolation(xTarget As Double, xVals As Range, yVals As Range) As Double

Dim n As Integer, i As Integer, j As Integer

Dim h() As Double, alpha() As Double

Dim l() As Double, mu() As Double, z() As Double

Dim c() As Double, b() As Double, d() As Double

Dim a() As Double, x() As Double, y() As Double

' Numero di punti dati

n = xVals.Rows.Count - 1

' Ridimensiona gli array

ReDim h(1 To n), alpha(1 To n), l(0 To n), mu(0 To n), z(0 To n)

ReDim c(0 To n), b(1 To n), d(1 To n), a(0 To n)

ReDim x(0 To n), y(0 To n)

' Copia i dati nelle variabili locali

For i = 0 To n

x(i) = xVals.Cells(i + 1, 1).Value

y(i) = yVals.Cells(i + 1, 1).Value

Next i

' Calcola i passi h tra i punti dati

For i = 1 To n

h(i) = x(i) - x(i - 1)

Next i

' Calcola i coefficienti alpha

For i = 1 To n - 1

*alpha(i) = (3 / h(i + 1)) * (y(i + 1) - y(i)) - (3 / h(i)) * (y(i) - y(i - 1))*

Next i

' Inizializza i valori delle equazioni tridiagonali

l(0) = 1

mu(0) = 0

z(0) = 0

' Calcola i coefficienti della matrice tridiagonale

For i = 1 To n - 1

*l(i) = 2 * (x(i + 1) - x(i - 1)) - h(i) * mu(i - 1)*

mu(i) = h(i + 1) / l(i)

*z(i) = (alpha(i) - h(i) * z(i - 1)) / l(i)*

Next i

' Condizioni al contorno

$l(n) = 1$

$z(n) = 0$

$c(n) = 0$

' Calcolo dei coefficienti della spline cubica

For j = n - 1 To 0 Step -1

$c(j) = z(j) - \mu(j) * c(j + 1)$

$b(j + 1) = (y(j + 1) - y(j)) / h(j + 1) - h(j + 1) * (c(j + 1) + 2 * c(j)) / 3$

$d(j + 1) = (c(j + 1) - c(j)) / (3 * h(j + 1))$

$a(j) = y(j)$

Next j

' Trova l'intervallo corretto per xTarget

For i = 1 To n

If xTarget >= x(i - 1) And xTarget <= x(i) Then

Exit For

End If

Next i

' Calcola il valore interpolato usando la formula della spline cubica

$CubicSplineInterpolation = a(i - 1) + b(i) * (xTarget - x(i - 1)) + c(i - 1) * (xTarget - x(i - 1)) ^ 2 + d(i) * (xTarget - x(i - 1)) ^ 3$

End Function

APPENDICE B

Questionario di valutazione post-occupazionale.

1 - Comfort termico stagione *INVERNALE*

1) In inverno, come si sente all'interno della sua abitazione nei confronti del comfort termico?

Estremamente freddo	Molto freddo	Freddo	Leggermente freddo	Neutrale	Leggermente caldo	Caldo	Molto caldo	Estremamente e caldo
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

2) In inverno, come trova le condizioni di comfort dell'ambiente termico?

Confortevoli	Leggermente a disagio	A disagio	Molto a disagio	Estremamente a disagio
0	1	2	3	4

3) In inverno, come preferirebbe le condizioni di comfort dell'ambiente termico?

Molto più fredde	Più fredde	Leggermente più fredde	Senza cambiamenti	Leggermente più calde	Più calde	Molto più calde
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

4) In inverno, tenendo conto delle sole sue preferenze personali, accetterebbe le attuali condizioni di comfort dell'ambiente termico?

- SI
- NO

5) In inverno, qual è la sua opinione riguardo le condizioni di comfort dell'ambiente termico?

Perfettamente tollerabile	Leggermente intollerabile	Intollerabile	Difficile da tollerare	Estremamente intollerabile
---------------------------	---------------------------	---------------	------------------------	----------------------------

6) In inverno, la temperatura interna di set-point, impostata tramite il termostato, com'è rispetto ad uno standard di 20°C?

(0 rappresenta la condizione peggiore; 5 rappresenta la condizione di 20°C; 10 rappresenta la condizione migliore)

Molto più bassa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Molto più alta
-----------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----------------

7) In inverno, com'è cambiata la percezione della temperatura interna nella sua residenza TRA PRIMA DELL'INTERVENTO e DOPO?

(0 rappresenta la condizione peggiore; 5 rappresenta la condizione inalterata; 10 rappresenta la condizione migliore)

Molto più fredda	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Molto più calda
Molto peggiorata	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Molto migliorata
Molto variabile durante il giorno	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Molto stabile
Molto insoddisfatto	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Molto soddisfatto

8) Ha riscontrato problemi di condensa o muffa tra PRIMA e DOPO l'intervento?

- NO
- SI
- in qualche punto
- dove: _____

9) Durante il periodo di riscaldamento se fosse stato a disagio PRIMA dell'intervento, come descriverebbe meglio la fonte di questo disagio?

(possibili scelte multiple; lo spazio in basso serve a scrivere qualsiasi sua opinione in merito alla fonte di disagio).

- Movimento dell'aria troppo alto
- Aria troppo secca
- Aria troppo umida
- Superfici circostanti calde / fredde (pavimento, soffitto, pareti o finestre)
- Impossibilità di regolare correttamente il riscaldamento
- Il sistema di riscaldamento non risponde abbastanza velocemente al termostato
- Non lo so
- Altro

2 - Comfort termico stagione ESTIVA

10) In estate, come si sente rispetto le condizioni di comfort dell'ambiente termico?

Estremamente caldo	Molto caldo	Caldo	Leggermente caldo	Neutrale	Leggermente e freddo	Freddo	Molto freddo	Estremamente freddo
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

11) In estate, qual è la sua opinione riguardo le condizioni di comfort dell'ambiente termico?

Perfettamente tollerabile	Leggermente intollerabile	Intollerabile	Difficile da tollerare	Estremamente intollerabile
---------------------------	---------------------------	---------------	------------------------	----------------------------

12) La sua residenza possedeva un sistema di raffrescamento PRIMA dell'intervento?

- SI
 NO

13) La sua residenza ORA, possiede un sistema di raffrescamento?

- SI
 NO

14) In estate, com'è cambiata la percezione della temperatura interna nella sua residenza TRA PRIMA DELL'INTERVENTO e DOPO?

(0 rappresenta la condizione peggiore; 5 rappresenta la condizione inalterata; 10 rappresenta la condizione migliore)

Molto peggiorata	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Molto migliorata
Molto variabile durante il giorno	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Molto stabile
Molto insoddisfatto	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Molto soddisfatto

3 - Comfort generale DOPO l'intervento di riqualificazione

15) Come valuta l'isolamento acustico rispetto a prima dell'intervento?

(0 rappresenta molto peggiorato; 5 rappresenta la condizione inalterata; 10 rappresenta molto migliorato)

Molto peggiorato	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Molto migliorato
------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	------------------

16) Come preferirebbe le condizioni di comfort acustico dell'ambiente?

Nessun cambiamento	Leggermente più silenziose	Più silenziose	Molto più silenziose
1	2	3	4

17) Com'è cambiato il comfort generale nella sua abitazione DOPO l'intervento?

(0 rappresenta molto peggiorato; 5 rappresenta la condizione inalterata; 10 rappresenta molto migliorato)

Molto peggiorato	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Molto migliorato
------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	------------------

18) Consiglierebbe gli interventi effettuati ad altri condomini?

- Assolutamente si
- Si
- Forse
- No
- Assolutamente no

19) Nel caso in cui abbia sostituito i serramenti, quanto è soddisfatto/a dell'efficacia dell'intervento?

(0 rappresenta molto insoddisfatto; 5 rappresenta la condizione inalterata; 10 rappresenta molto soddisfatto)

Molto insoddisfatto	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Molto soddisfatto
---------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	-------------------

20) Ha suggerimenti per migliorare ulteriormente il benessere dentro la sua abitazione? Gli interventi di riqualificazione hanno migliorato il comfort generale nella sua abitazione? (Le lascio lo spazio per scrivere qualsiasi sua opinione in merito).

RINGRAZIAMENTI

Un sincero ringraziamento va all'azienda Chiurlo, per avermi dato l'opportunità di sviluppare questo lavoro di tesi in un ambiente stimolante e formativo. In particolare, desidero ringraziare Thomas Clari per il suo supporto costante, gli ingegneri Fabiano Di Lazzaro ed Enrico Fasano per i preziosi consigli tecnici. Un ringraziamento va anche al professore Enrico Fabrizio per le indicazioni fondamentali che hanno contribuito alla riuscita di questo lavoro.

A Vittoria, per la sua dolcezza e il suo essere sempre premurosa e comprensiva. Mi è stata vicina in ogni momento, affrontando lunghe trasferte pur di sostenermi, e con la sua semplice presenza è sempre riuscita a darmi conforto e serenità anche nei momenti più difficili.

Al mio papà Paolo e alla mia mamma Francesca, che con amore e generosità mi hanno sostenuto in ogni tappa di questo percorso. Mio padre, anche nei momenti più difficili, ha saputo trovare dentro di sé una forza straordinaria, trasmettendomi ogni giorno determinazione e coraggio. Mia madre, che con la sua gentilezza e il suo altruismo è sempre riuscita a portare luce anche nei momenti più grigi. Senza di loro tutto questo non sarebbe stato possibile.

A mia sorella Anna, che mi è sempre stata accanto con solarità e altruismo, rendendosi sempre disponibile. Ti ringrazio di cuore per tutto quello che fai per me. Un ringraziamento speciale va alle mie nonne, Rosina e Renza, che con il loro esempio mi hanno insegnato il valore del rispetto e della perseveranza. A Davide, che grazie alle sue competenze informatiche e alla sua tenacia è riuscito a salvarmi la tesi. Grazie anche a tutta la mia famiglia.

Un ringraziamento va a tutti i miei amici, i quali mi hanno accompagnato e sostenuto lungo tutto questo percorso. Abbiamo condiviso momenti belli e meno belli, ma ognuno di voi, a modo suo, mi è sempre stato accanto. Grazie a Toso, Pasc e Gian con cui ho potuto vivere molti momenti spensierati durante questi anni a Torino. Un grazie sentito anche a tutti voi che, pur venendo da lontano, mi siete stati vicini e mi avete supportato in questa giornata per me davvero importante.

Infine, voglio ringraziare anche me stesso, per la determinazione e la voglia di imparare che non mi hanno mai abbandonato durante tutto il percorso. Perché è anche grazie a me se oggi posso guardare con orgoglio il traguardo raggiunto.