



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero della Transizione Ecologica



Ricerca di Sistema elettrico

Simulazione delle prestazioni in opera delle
soluzioni standardizzate, allestimento di un
edificio equipaggiato con alcune delle
soluzioni a catalogo e monitoraggio delle
prestazioni in opera

F. Baldi, S. Beozzo, A. Gugliandolo, M. Ricci, M.-A. Segreto, A.
Tallini, E. Genova, C. Romeo

Report RdS/PTR2021/162

SIMULAZIONE DELLE PRESTAZIONI IN OPERA DELLE SOLUZIONI STANDARDIZZATE, ALLESTIMENTO DI UN EDIFICIO EQUIPAGGIATO CON ALCUNE DELLE SOLUZIONI A CATALOGO E MONITORAGGIO DELLE PRESTAZIONI IN OPERA

Autori: F. Baldi, S. Beozzo, A. Gugliandolo, M. Ricci, M.-A. Segreto, A. Tallini, E. Genova, C. Romeo (ENEA)

Con la collaborazione di: M. Artioli, M. Benedetti, A. Ciappa, A. Di Micco, I. Falcone, A. Marzo, A. Mione, E. Monno, I. Roselli, F. Saitta, P. Sdringola, T. Susca, S. Tamburrino, C. Tripepi, L. Volpe (ENEA)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: N. 1 - Tecnologie

Progetto: 1.6 - Efficienza energetica e dei prodotti e dei processi industriali

Work package: 2 - Miglioramento dell'efficienza energetica di processi di produzione e di gestione dell'ambiente costruito

Linea di attività: LA2.3 - Simulazione delle prestazioni in opera delle soluzioni, allestimento di un edificio equipaggiato con alcune delle soluzioni a catalogo e monitoraggio

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti

Responsabile del Work package: Maria-Anna Segreto

Si ringrazia per il supporto alle attività di test su tavole vibranti le aziende, FLORIM, nelle persone dell'Ing. Adriano Obino e dell'Arch. Serena Zanni, e CPL CONCORDIA, nella persona dell'Ing. Giovanni Sebastiani, il cui aiuto ha visto la compartecipazione di aziende diverse animate da uno stesso grande obiettivo dando un sensibile valore aggiunto al progetto, soprattutto nella fase di studio ed analisi del dimostratore.

Indice

SOMMARIO.....	4
ATTIVITÀ DI COORDINAMENTO E GESTIONE DEL WORK PACKAGE	6
INDICE DELLE FIGURE.....	8
SEZIONE I – SIMULAZIONI ENERGETICHE DELLE SOLUZIONI SVILUPPATE.....	10
1 INTRODUZIONE.....	10
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	12
2.1 RIASSUNTO DELLE SOLUZIONI STANDARDIZZATE	12
2.2 SIMULAZIONI SEMI-STAZIONARIE	12
2.3 SIMULAZIONI DINAMICHE.....	40
2.3.1 <i>Elenco completo delle simulazioni effettuate.</i>	41
2.3.2 <i>Analisi dei risultati per diverse tipologie di soluzione per l’involucro</i>	41
2.3.3 <i>Analisi dei risultati per diverse tipologie di impianto</i>	46
SEZIONE II – DIMOSTRATORE	52
3 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	52
3.1 SCELTA DELL’EDIFICIO.....	52
3.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA PER IL MONITORAGGIO	59
3.3 RAGGIUNGIMENTO IN OPERA DEL LIVELLO DI ISOLAMENTO.....	64
3.4 VERIFICA DEI TEMPI DI POSA IN OPERA	64
3.5 VERIFICA DELLE CONDIZIONI DI SALUBRITÀ DEL CANTIERE.....	68
4 CONCLUSIONI.....	68
6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	71

Sommario

Obiettivo del WP2 è ottimizzare il processo di riqualificazione degli edifici esistenti inteso come processo produttivo complesso, attraverso l'elaborazione e diffusione di soluzioni tecniche integrate economicamente sostenibili, garantendo rapidità, semplicità di messa in opera e durabilità, ottimizzando le fasi di produzione e cantierizzazione con lo scopo di abbattere i consumi energetici correlati, i costi di produzione, i costi legati alla fase di realizzazione (occupazione suolo pubblico, ponteggio, giorni/uomo) e di ridurre i disagi per l'utente (spostamenti, polveri, rumori). Ciò consente un miglioramento dell'efficienza energetica del processo con ricadute sull'ambiente costruito in termini di risparmio energetico.

Concentrandosi sulla promettente metodologia Off-Site Construction, il progetto ha individuato un catalogo di soluzioni costruttive standard e realizzato una prima valutazione dell'impatto di alcune soluzioni sulla filiera produttiva. La standardizzazione delle soluzioni rappresenta un'attività fondamentale e preliminare allo sviluppo di una metodologia di ottimizzazione globale della filiera.

Output fondamentale del WP è dunque la definizione di un catalogo di configurazioni costruttive standard per soluzioni di facciata da realizzare in modalità off-site che, attraverso la raccolta e diffusione di informazioni chiave relative alle modalità costruttive e alle prestazioni di tali configurazioni, ne agevoli la scelta da parte degli utenti finali, consentendo di accedere alla riqualificazione degli immobili con costi e tempi di realizzazione ridotti. Le soluzioni a catalogo oltre ad avere caratteristiche termiche ed energetiche tali da consentire importanti risparmi a livello locale (sul singolo edificio cui vengono applicate) hanno anche ricadute a largo spettro in termini energetici ed ambientali grazie allo studio approfondito della filiera che permette una riorganizzazione dei processi volta a supportare miglioramenti in termini di costi, tempi e qualità per l'intera Supply Chain.

La linea di attività 2.3 si svolge principalmente attraverso la realizzazione di modellazioni con conseguenti simulazioni energetiche muovendosi su due differenti direttrici: la prima è la verifica dei parametri caratteristici degli edifici post intervento con metodologia dinamica, consentendo maggiore dettaglio dei risultati, mentre la seconda è basata sulla simulazione di tipo semi-stazionario, che segue una linea più "legata al mercato" e al tipo di analisi effettuata in campo dai professionisti del settore.

Anche se, da capitolato, sono state previste analisi per 3 diverse latitudini per la valutazione delle performances delle soluzioni sviluppate una volta poste in opera, si è scelto di procedere verificando un numero maggiore di città e zone climatiche al fine di avere un quadro ancora più completo della risposta energetica sul territorio nazionale.

La tipologia edilizia sottoposta a simulazione ha avuto come destinazione d'uso il settore civile residenziale rappresentativo del Paese e i software utilizzati sono stati sia di tipo commerciale (Termo-Namirial) sia di tipo più conforme ad attività di ricerca (Design Builder e Trnsys) coadiuvati da software di analisi specifici.

L'obiettivo è stato quello di verificare prestazioni dinamiche ben definite, ma anche di controllare l'adattabilità delle soluzioni individuate all'analisi di professionisti con strumenti di uso più comune, visto che l'attuale normativa prescrive l'obbligo di modellazioni ad hoc in caso di ristrutturazioni e/o riqualificazioni. Ulteriore attività prevista ha riguardato l'analisi di una soluzione reale con allestimento di sistemi di misura e verifica. Ciò al fine di poter verificare la facilità di posa in opera, le tempistiche di posa in opera e le condizioni dell'area di cantiere. Sono state, inoltre, verificate anche ulteriori caratteristiche tecniche quali temperature interne, Uvalue in opera e flussi di calore attraverso la struttura. Il sistema di monitoraggio ha consentito di acquisire anche dati ambientali in continuo.

Attività di coordinamento e gestione del Work Package

Il Work Package 2 “Miglioramento dell’efficienza energetica di processi di produzione e di gestione dell’ambiente costruito”, che ha l’obiettivo di ottimizzare il processo di riqualificazione degli edifici esistenti attraverso l’elaborazione e diffusione di soluzioni tecniche integrate economicamente sostenibili, e ottimizzando le fasi di produzione e cantierizzazione con lo scopo di abbattere i consumi energetici correlati, i costi di produzione, i costi di realizzazione e di ridurre i disagi per l’utente, presenta una struttura articolata, con LA realizzate da ENEA e co-beneficiari che si interfacciano attraverso un continuo scambio di informazioni e output di progetto. Lo sfidante obiettivo del WP, infatti, ha creato la necessità di prevedere uno svolgimento contemporaneo di varie LA focalizzate sullo studio di diversi componenti delle soluzioni costruttive e sulla loro integrazione e standardizzazione, con il fine di produrre una base di informazioni rilevante per le LA dedicate allo studio e all’ottimizzazione dei relativi processi produttivi.

ENEA, in quanto responsabile del WP, svolge un importante ruolo di coordinamento sia interno all’ente (tra le diverse attività previste nelle LA ENEA) che esterno (tra le LA ENEA e quelle gestite direttamente dai co-beneficiari), andando anche a proporsi come principale interfaccia tra il team di progetto e i diversi stakeholder (in particolare le aziende che hanno collaborato con il team di progetto per il raggiungimento di specifici obiettivi, ma più in generale per definire il quadro delle necessità aziendali e delle principali barriere che ad oggi sussistono per l’adozione di processi produttivi più snelli, efficaci ed efficienti).

A causa delle restrizioni legate all’emergenza CoViD, per la terza annualità è risultato impossibile effettuare incontri in presenza. Tuttavia, sono continuati con regolarità rispetto all’annualità precedente gli incontri on-line tra ENEA e i diversi co-beneficiari. Tali incontri virtuali hanno una frequenza mediamente mensile per quanto riguarda le riunioni tra ENEA e il singolo co-beneficiario, mentre sono organizzati al bisogno incontri con più di un co-beneficiario (essenzialmente per soddisfare le necessità legate a chiarimenti ulteriori su forma o tipologia di informazioni da scambiare)

Per la terza annualità è da sottolineare un numero maggiore di incontri organizzato con l’Università della Tuscia (CINTEST); ciò si è reso necessario soprattutto per l’organizzazione di meeting specifici ai quali hanno partecipato aziende della filiera di produzione del sistema prefabbricato oggetto del progetto. ENEA in questo caso ha organizzato, pianificato e supervisionato gli incontri con le aziende

Come già sottolineato nelle precedenti annualità, al fine di garantire una maggiore efficacia negli scambi tra coordinatore e i singoli co-beneficiari ENEA ha nominato internamente dei responsabili dei rapporti con le Università, che si interfacciano direttamente con i responsabili scientifici: l’Ing. Maria-Anna Segreto per l’Università di Messina, l’Ing. Mattia Ricci per il Politecnico di Milano, l’Ing. Francesco Baldi per il CINTEST e

l'Arch. Carlo Romeo per il CITERA. Sono stati organizzati nel corso della terza annualità frequenti incontri tra i diversi responsabili dei rapporti con le Università per facilitare ulteriormente l'allineamento tra le diverse attività di progetto.

Nella terza annualità ENEA ha ancora una volta ricoperto il ruolo di collettore e distributore di tutte le informazioni e i dati di output delle attività progettuali dei diversi co-beneficiari:

- gli studi de La Sapienza su un dimostratore su piccola scala sono di supporto e verifica a quanto realizzato sul dimostratore ENEA;
- le analisi del POLIMI affiancano in maniera parallela gli studi di ENEA e La Sapienza ed aiutano ad ampliare le possibilità di scelta per il fruitore finale delle soluzioni a catalogo;
- le attività di UNIME per lo sviluppo di strumenti di visualizzazione ed elaborazione dati consentono di raccogliere input per le attività ENEA legate al dimostratore;
- gli studi di CINTEST raccolgono in input quelle degli altri co-beneficiari valutando in maniera approfondita le varie fasi del processo produttivo del sistema analizzato.

Indice delle figure

Figura 1: Modellazione dell'edificio ricorrente e delle trasmittanze	15
Figura 2: dati locali utilizzati per la simulazione.....	16
Figura 3: dati climatici mensili	16
Figura 4: esempio di calcolo delle dispersioni dell'edificio ricorrente per la città di Bologna	18
Figura 5. esempio di calcolo delle perdite per ventilazione dell'edificio ricorrente per la città di Bologna ...	19
Figura 6: esempio di calcolo degli apporti solari (Bologna).....	20
Figura 7: Riepilogo apporti (Bologna).....	21
Figura 8: esempio di dati utilizzati per la città di Bologna.....	22
Figura 9: risultati di calcolo della situazione ante intervento per la città di Bologna	23
Figura 10: Calcolo dei fabbisogni per la situazione ante intervento per la città di Bologna	25
Figura 11: calcolo delle quote di energia disaggregate per tipologia di servizio per la situazione ante intervento a Bologna	26
Figura 12: calcolo degli indici di prestazione energetica disaggregati per tipologia di servizio per la situazione ante intervento a Bologna	26
Figura 13: classe energetica della situazione ex ante per la città di Bologna	27
Figura 14: stagioni di climatizzazione	28
Figura 15: dispersioni	29
Figura 16: fabbisogni di energia utile	30
Figura 17: fabbisogni di energia primaria.....	31
Figura 18: tabelle con dati di calcoli	34
Figura 19: Prestazioni energetiche per Bologna per tutte le configurazioni scelte ex ante ed ex post	34
Figura 20: Prestazioni energetiche per Roma per tutte le configurazioni scelte ex ante ed ex post.....	35
Figura 21: Prestazioni energetiche per Palermo in tutte le configurazioni ex ante ed ex post	35
Figura 22: Risparmio energetico in percentuale per tutte le configurazioni ex ante ed ex post per la città di Bologna.....	36
Figura 23: Risparmio energetico in percentuale per tutte le configurazioni ex ante ed ex post per la città di Roma.....	36
Figura 24: Risparmio energetico in percentuale per tutte le configurazioni ex ante ed ex post per la città di Roma.....	37
Figura 25: Distribuzione delle temperature medie annuali sul territorio italiano. (Rif. meteobook.it).....	38
Figura 26: Grafico cumulativo delle simulazioni effettuate per il calcolo delle performances energetiche per le 21 città scelte in tutte le configurazioni ex ante ed ex post.....	39
Figura 27: Grafico cumulativo delle simulazioni effettuate per il calcolo della CO ₂ per le 21 città scelte in tutte le configurazioni ex ante ed ex post.....	39
Figura 28: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi alla riduzione dei consumi di gas naturale per il riscaldamento	42
Figura 29: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi alla riduzione delle emissioni totali	42
Figura 30: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi alla riduzione dei costi operativi totali (elettricità e gas naturale)	43
Figura 31: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi alla riduzione dei consumi elettricità per il raffrescamento	43
Figura 32: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi al calcolo del numero di classi energetiche guadagnate.....	44
Figura 33: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi alla riduzione dei consumi di gas naturale per il riscaldamento. Impianto I1.....	45
Figura 34: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi al calcolo del numero di classi energetiche guadagnate. Impianto I1	45
Figura 35: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi ai consumi di gas naturale per il riscaldamento.....	47

Figura 36: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi ai consumi di elettricità per il riscaldamento.	47
Figura 37: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi ai costi operativi annuali.	48
Figura 38: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi alla riduzione dei costi operativi.	48
Figura 39: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi alle emissioni annuali	49
Figura 40: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi alla riduzione delle emissioni.	49
Figura 41: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi al calcolo del numero di classi energetiche guadagnate.....	50
Figura 42: Caratteristiche principali del dimostratore	53
Figura 43: Sistemi di aggancio alla struttura	53
Figura 44: Facciata Nord dell'edificio dimostratore	54
Figura 45: immagini relative al dimostratore, ai particolari di montaggio e di aggancio della struttura.....	56
Figura 46: indicazione dei punti sui quali sono state effettuate le verifiche di fissaggio.....	57
Figura 47: ancoraggi testati	57
Figura 48: Risultati dei test sugli ancoraggi	59
Figura 49: immagine relativa alla termocamera FLIR.....	60
Figura 50: termoflussimetro ThermoZig.....	60
Figura 51: esempio di dati estratti dal test report delle termoflussimetria. In questo caso trattasi di una misura ex ante da cui si evince un valore di trasmittanza finale pari a $1.425 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$	61
Figura 52: grafico termoflussimetria ante intervento (flusso termico).....	62
Figura 53: grafico termoflussimetria ante intervento (temperatura interna ed esterna)	62
Figura 54: misura termoflussimetrica nella situazione ex post.....	63
Figura 55: Immagine della centralina climatica.....	63
Figura 56: Misuratore di temperatura Elitech RC-4HC.....	64
Figura 57: schema cappotto con sistema tradizionale	65
Figura 58: schema isolamento con OSC	66
Figura 59: comparazione dei tempi di lavorazione tra ST e OSC.....	66
Figura 60: tabella comparativa dell'efficacia delle soluzioni ST e OSC.....	67
Figura 61: Confronto dei differenti parametri per le due soluzioni ST e OSC	67

SEZIONE I – SIMULAZIONI ENERGETICHE DELLE SOLUZIONI SVILUPPATE

1 Introduzione

Per Off-Site Construction (OSC) si intende un sistema tecnologico che consente la realizzazione di elementi costruttivi in un luogo diverso rispetto a quello in cui si trova il cantiere. Una tipologia costruttiva, che sta prendendo sempre più piede e di cui è interessante comprenderne le prospettive e le grandi potenzialità, soprattutto in un periodo come quello che stiamo attraversando, in cui la riqualificazione energetica del parco edilizio esistente riveste un ruolo sempre più pressante sul mercato. Tra le altre cose, il riuso del patrimonio edilizio esistente è diventato centrale nel mondo delle costruzioni, mentre alla realizzazione di nuovi interventi è attribuito un ruolo marginale; la **deep renovation** dell'esistente è diventato un nuovo paradigma verso cui rivolgere l'attenzione ma tenendo presente precisi punti fermi quali la possibilità di intervenire senza costringere gli abitanti a spostarsi e, quindi, realizzazione con tempi di cantiere ridotti al minimo indispensabile.

Questo tipo di costruzione rappresenta una nuova sintesi tra costruzioni, manifattura e digitalizzazione poiché controllando in maniera centralizzata i diversi parametri è possibile ottenere un prodotto in minor tempo con un significativo abbattimento delle spese ed è, inoltre, possibile impiegare le tecnologie dell'industria 4.0 permettendo la produzione in serie con una maggiore efficienza, controllo e velocità.

L'OSC offre degli evidenti vantaggi nell'ambito delle costruzioni perché permette di velocizzare il processo di costruzione, di impegnare manodopera qualificata, che lavora in un ambiente chiuso e controllato su cui non ha incidenza il clima esterno, di progettare con precisione, riducendo gli errori e la produzione di materiali di scarto, di portare in edilizia la qualità e le garanzie di prestazione tipiche di un processo industriale.

Il nostro Paese può sicuramente acquisire, sviluppare e fare proprio questo modello anche perché, essendo la seconda manifattura d'Europa, l'ibridazione dell'edilizia con la manifattura digitale non può che aggiungere qualità e precisione all'intero processo.

Nell'ultimo secolo, sono state molteplici gli sforzi di introdurre in edilizia elementi prefabbricati, ma solo grazie alle recenti innovazioni nel campo digitale si è ottenuta un'espansione nell'uso di componenti assemblabili in cantiere.

La tecnologia dell'OSC nasce con l'obiettivo di traslare buona parte dell'impegno realizzativo di una costruzione, dal sito di fabbricazione a un'ambiente, più controllato e preciso, ossia l'impianto di produzione poiché questo può dare un prodotto di più alta qualità, maggiormente controllato e provato e con caratteristiche energetiche e strutturali più facilmente verificabili e certificabili.

Con l'OSC, inoltre, si riducono i tempi di lavoro in cantiere e si ha la possibilità di riorganizzare sia le tecnologie che i processi di produzione. Potenzialmente, un processo di questo tipo, risulta essere più efficiente e anche

gli sprechi vengono ridotti al minimo. Possiamo sicuramente affermare che l'OSC, oggi, rappresenta uno dei principali trend di settore che avranno largo sviluppo nei prossimi anni.

L'assemblaggio in loco porta sicuramente numerosi vantaggi quali, ad esempio, l'ottimizzazione delle risorse e dei processi cantieristici, la riduzione delle tempistiche di realizzazione, nonché la riduzione dei costi e della presenza umana sul cantiere, con ricadute positive per la sicurezza sul lavoro.

Volendo classificare gli indubbi vantaggi generati dall'utilizzo in cantiere dell'OSC potremmo procedere come segue:

- **Qualità del prodotto finale:** l'assemblaggio dei componenti in officina, consente di ottenere un prodotto con qualità e precisione di tipo industriale incrementando così l'affidabilità del risultato finale e riducendo in maniera considerevole il margine di errore e gli imprevisti in cantiere. Questi ultimi, Infatti possono arrivare a rappresentare fino al 10% del costo dell'intervento. La qualità del prodotto si riconduce, ovviamente, ad un maggiore controllo delle caratteristiche tecniche e, di conseguenza, ad un prodotto che può restituire maggiori risultati in termini di efficientamento energetico.
- **Customizzazione del prodotto:** la prefabbricazione in ambiente controllato permette un'accurata progettazione che consente di seguire il design e l'architettura del progetto nelle sue unicità particolarizzandolo anche in funzione di specifiche esigenze tecniche o richieste estetiche dell'utenza. Ogni elemento può essere dimensionato su misura, ottimizzando le componenti progettuali e scegliendo tra una vasta gamma di materiali e finiture.
- **Ottimizzazione di tempi e costi:** l'industrializzazione delle componenti in officina porta ad avere un cantiere di rapida esecuzione, in quanto il lavoro on-site si riduce al solo processo di assemblaggio di elementi prefiniti. Diminuire i tempi significa diminuire i costi, sia di gestione del cantiere stesso legati alle attrezzature ed alla sicurezza, riducendo anche le componenti di imprevisto ed incertezza on-site. Ciò ci permette di controbilanciare il maggior costo del prodotto.
- **Abbattimento degli impatti ambientali:** ripercorrendo il punto precedente, possiamo affermare che un cantiere veloce riduce anche l'impatto ambientale, soprattutto rispetto alle soluzioni in calcestruzzo. Oltre alla diminuzione dell'impiego di risorse idriche, minori rifiuti da smaltire e minori trasporti, vi sono anche tutti i vantaggi correlati alla facilità di un futuro disassemblaggio e riutilizzo delle componenti, specialmente della struttura intelaiata che potrà essere riciclata al 100%.

Obiettivo del report è quello di analizzare e confermare che i vantaggi sopra menzionati sono raggiunti sia attraverso modellazioni (dinamiche e semi-stazionarie) sia in campo.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Riassunto delle soluzioni standardizzate

La definizione delle soluzioni standardizzate è stata oggetto dei report delle annualità precedenti. In particolare, nella LA2.5 sono state individuate le soluzioni standardizzate per l'involucro edilizio, riassunte in Tabella 1.

Tabella 1: Tabella riassuntiva delle soluzioni standardizzate per l'involucro edilizio

	Tipologia di soluzione	Tipologia isolante	Spessore
SC1	Cappotto	Lana di roccia	12 cm
SC2	Cappotto	Fibra di legno	14 cm
PV1	Parete ventilata	Poliuretano espanso rigido	8 cm
PV2	Parete ventilata	Lana di roccia	12 cm
SI1	Isolamento interno	Aerogel	5 cm
SI2	Isolamento interno	Polistirene estruso	10 cm

Allo stesso modo, le attività svolte all'interno della LA 2.2 hanno portato alla definizione di sei impianti di riferimento, pensati per diverse zone climatiche, le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 2.

Tabella 2: quadro sinottico delle tipologie impiantistiche individuate

	Impianto 1 (I1)	Impianto 2 (I2)	Impianto 3 (I3)	Impianto 4 (I4)	Impianto 5 (I5)	Impianto 6 (I6)
Generazione	Caldaia condensazione	Caldaia condensazione	Pompa di calore	Sistema ibrido	Pompa di calore	Sistema ibrido
Distribuzione	Acqua	Acqua	Acqua	Acqua	Aria	Aria
Emissione	Radiatori	Fan coil	Fan coil	Fan coil	Bocchette/split	Bocchette/split
Zone climatiche	C – D	E – F	A – B – C	D – E	A – B – C	D – E
Costo di investimento	● ○ ○ ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○
Efficienza	● ● ● ○ ○ ○	● ● ● ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●
Complessità	● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○
Integrabilità FER	● ● ● ○ ○ ○	● ● ● ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●

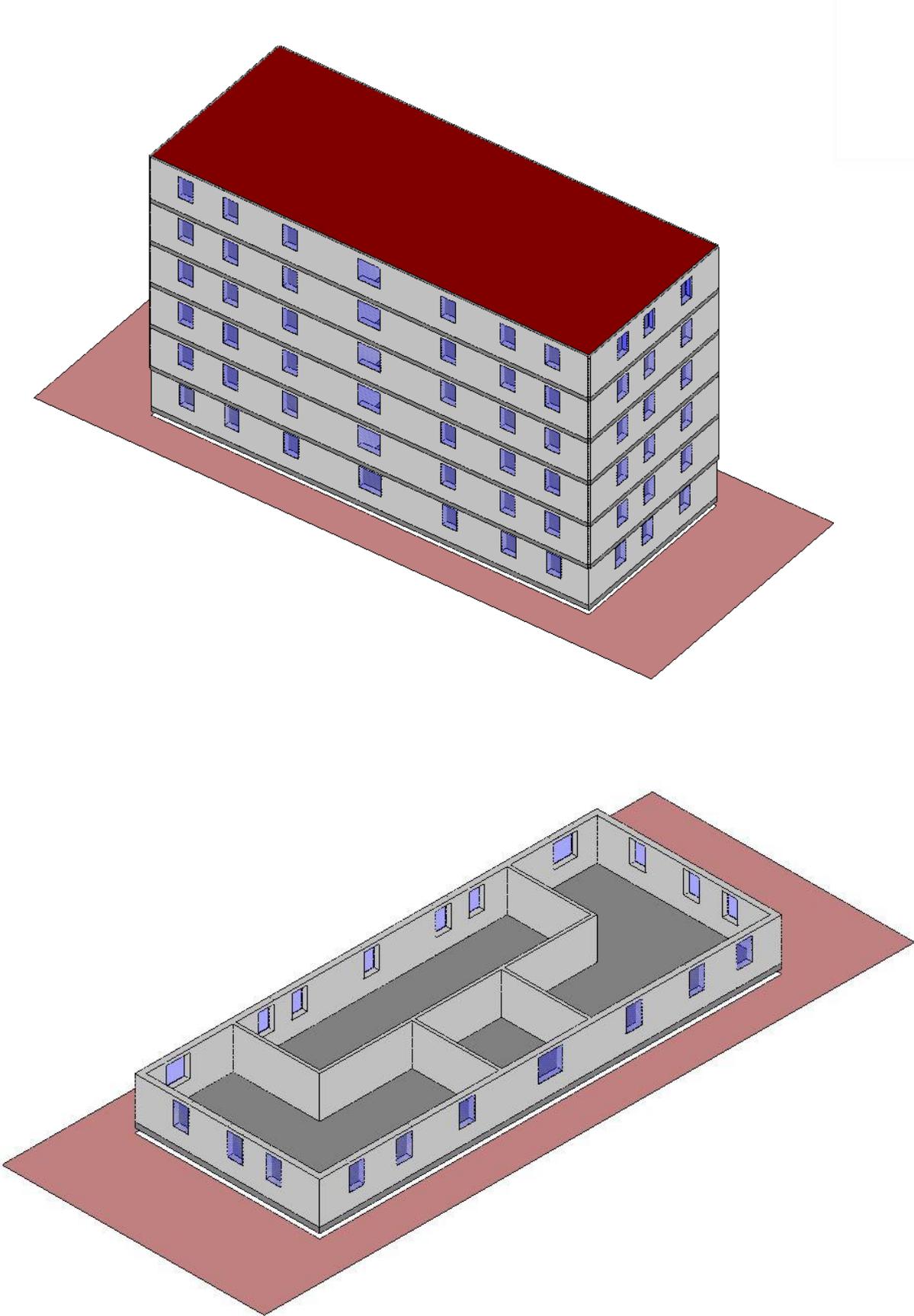
2.2 Simulazioni semi-stazionarie

Le simulazioni di tipo semi-stazionarie sono state sviluppate utilizzando un software di tipo commerciale (Termo di Namirial) e ciò con lo scopo di effettuare un'analisi di tipo tecnico largamente utilizzata sul mercato dai professionisti.

Lo scopo delle modellazioni effettuate è quello di fornire dati utili a capirne meglio il comportamento dell'edificio in modo da poter confrontare diverse strategie e scegliere quella che garantisce, a parità di comfort, il minor uso di energia.

Per la realizzazione del modello dell'edificio si deve disporre di tutti i dati geometrici e dei materiali che lo compongono, oltre a quelli relativi agli impianti tecnologici, ai dati climatici relativi alla località in cui sorge l'edificio ed in ultimo quelli relativi all'occupazione da parte degli utenti. Nel caso in esame sono stati utilizzati i dati dell'edificio ricorrente analizzato nella prima annualità:

1. struttura intelaiata in calcestruzzo armato con tamponamenti in laterizi forati, di cui si comincia a definire una grande varietà di tipologie, funzione dell'indice di foratura e della fornace di produzione;
2. l'edificio, privo di piano cantinato, si sviluppa per sei elevazioni ed è dotato di un solo corpo scala, a servizio di tre unità immobiliari per piano (incluso quello terraneo);
3. ciascuna unità immobiliare ha una superficie utile di 90 m², intermedia fra i valori estremi che definiscono la classe di superficie 80÷99 m²;
4. il corpo scala-ascensore e il disimpegno d'accesso agli appartamenti hanno un'area di sedime complessiva di 30 m²;
5. la superficie lorda di piano è pari a 1,2 volte la superficie netta, cioè 360 m²;
6. l'edificio è profondo 12 m (di conseguenza la larghezza è pari a 30 m);
7. l'altezza netta di piano è pari a 2,70 m, valore minimo dell'altezza interna dei locali d'abitazione stabilito con D.M. del 5 luglio 1975;
8. lo spessore dei solai di piano è pari a 30 cm al finito (in tal modo l'interpiano risulta pari a 3 m);
9. la copertura è piana;
10. la superficie degli infissi non è inferiore a 1/8 della superficie di pavimento, come stabilito nell'articolo 5 del D.M. del 5 luglio 1975 in merito alla superficie finestrata apribile.



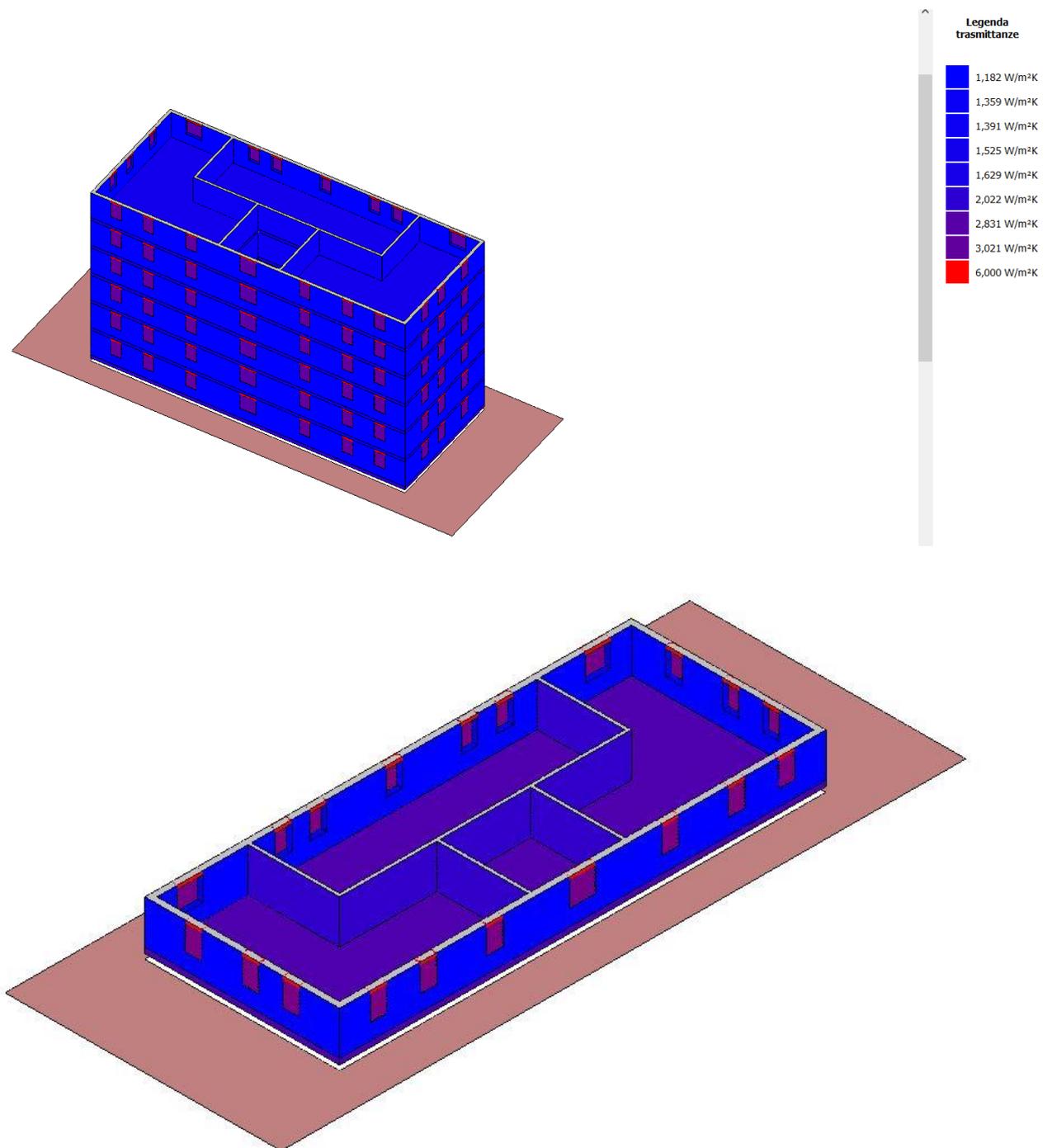


Figura 1: Modellazione dell'edificio ricorrente e delle trasmissionze

Il calcolo viene effettuato considerando tutte le condizioni relative alle strutture ed impianti dell'edificio e considerando le reali condizioni a contorno relative a temperature esterne, esposizione al vento e irraggiamento.

A titolo di esempio si riportano i dati considerati per una delle simulazioni effettuate:

Dati località **Dati mensili**

Comune  

Provincia Codice ISTAT Codice catastale

Regione

Altitudine m Latitudine Longitudine

Gradi giorno °C Zona climatica

Zona di vento

Temperatura esterna di progetto

Invernale °C

Estiva °C

Umidità relativa interna

Invernale %

Estiva %

Zona geografica

Province di riferimento

Giorni di riscaldamento

Coefficiente di schermatura dal vento Conduttività terreno W/mK

Irradianza sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione W/m²

Figura 2: dati locali utilizzati per la simulazione

Dati località **Dati mensili**

Temperatura esterna media mensile [°C]

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
	1,3	5,4	9,6	13,6	17,7	22,2	24,8	21,6	19,3	15,6	9,3	3,8

Irradiazione giornaliera media mensile sul piano orizzontale [MJ/m²]

Tipo	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Diretta	2,1	4,4	5,7	8,8	10,8	10,8	14,0	10,0	7,3	3,3	1,9	1,0
Diffusa	2,4	3,6	5,4	7,0	9,4	9,8	9,6	8,5	6,7	4,3	2,9	2,1
	4,5	8,0	11,1	15,8	20,2	20,6	23,6	18,5	14,0	7,6	4,8	3,1

Pressione parziale di vapore esterna [Pa]

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
	538	522	690	975	1.151	1.412	1.415	1.448	1.505	1.340	904	646

Velocità del vento [m/s]

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
	1,6	2,0	2,6	2,1	2,4	1,6	2,3	2,0	2,1	1,6	1,5	1,8

Figura 3: dati climatici mensili

Per l'edificio sono state effettuate modellazioni in merito a dispersioni e perdite

Perdita di calore per trasmissione

Perdite di calore per trasmissione verso l'esterno

Strutture Esterne

Struttura	Esposizione	A [m ²]	U [W/m ² K]	H [W/K]
Muratura in laterizio semipieno 29	Nord	169,560	1,182	200,474
Sottofinestra F1 100*150	Sud	18,000	1,182	21,282
Cassonetto F1 100*150	Sud	5,400	6,000	32,400
Muratura in laterizio semipieno 29	Sud	169,560	1,182	200,474
Cassonetto F1 100*150	Nord	5,400	6,000	32,400
Sottofinestra F1 100*150	Nord	18,000	1,182	21,282
Cassonetto F1 100*150	Est	9,000	6,000	54,000
Sottofinestra F1 100*150	Est	30,000	1,182	35,470
Muratura in laterizio semipieno 29	Est	413,820	1,182	489,268
Cassonetto F1 100*150	Ovest	10,800	6,000	64,800
Sottofinestra F1 100*150	Ovest	36,000	1,182	42,564
Muratura in laterizio semipieno 29	Ovest	345,808	1,182	408,856
Sottofinestra F2 155*150	Est	18,600	1,182	21,991
Cassonetto F2 155*150	Est	5,580	6,000	33,480
Basamento	Orizzontale	325,256	2,022	657,739
Copertura	Orizzontale	324,620	1,629	528,670
F1 100*150	Sud	27,000	3,021	81,568
F1 100*150	Nord	27,000	3,021	81,568
F1 100*150	Est	45,000	3,021	135,947
F1 100*150	Ovest	54,000	3,021	163,136
F2 155*150	Est	27,900	2,831	78,992
Totale		2.086,303		3.386,360

Ponte termico	Esposizione	l [m]	ψ [W/mK]	H [W/K]
Finestre	Ovest	180,000	0,395	71,100
Finestre	Nord	90,000	0,395	35,550
Finestre	Sud	90,000	0,395	35,550
Finestre	Est	223,200	0,395	88,164
Basamento	Nord	12,000	0,153	1,836
Basamento	Sud	12,000	0,153	1,836
Basamento	Est	30,000	0,153	4,590
Copertura	Nord	12,000	0,196	2,352
Copertura	Est	30,000	0,196	5,880
Copertura	Sud	12,000	0,196	2,352
Columns	Sud	16,200	1,223	19,813
Columns	Nord	16,200	1,223	19,813
Columns	Est	97,200	1,223	118,876
Columns	Ovest	64,800	1,223	79,250
Totale				486,961

H ₀	3.873,322
----------------	-----------

Riscaldamento

Perdita di calore per trasmissione verso locali non riscaldati

Strutture verso il locale Z1

Struttura	A [m ²]	U [W/m ² K]	H [W/K]
Muratura in laterizio semipieno 20 Interna	326,274	1,391	453,816
	326,274		453,816
Totale			453,816
b_{tr}			0,400

H _U Z1 [W/K]	181,526
-------------------------	---------

H _U [W/K]	181,526
----------------------	---------

Mese	gg	θ _{int,let,H} [°C]	θ _e [°C]	Δθ [°C]	H _{tr,adj} [W/K]	Fr*Φ _r [W]	Q _{sol,op} [kWh]	Q _{H,tr} [kWh]
Gennaio	31	20,0	1,3	18,7	4.054,848	3.376,978	1.823,297	57.193,967
Febbraio	28	20,0	5,4	14,6	4.054,848	4.626,483	2.752,604	40.221,062
Marzo	31	20,0	9,6	10,4	4.054,848	4.717,380	3.826,395	31.148,631
Aprile	30	20,0	13,6	6,4	4.054,848	4.296,050	4.934,498	16.930,982
Maggio	31	20,0	17,7	2,3	4.054,848	4.751,981	6.294,132	4.270,502
Giugno	30	20,0	22,2	-2,2	4.054,848	5.193,874	6.145,175	-8.740,880
Luglio	31	20,0	24,8	-4,8	4.054,848	6.077,043	7.291,680	-17.160,529
Agosto	31	20,0	21,6	-1,6	4.054,848	4.865,595	5.867,255	-6.983,640
Settembre	30	20,0	19,3	0,7	4.054,848	3.910,277	4.531,979	414,648
Ottobre	31	20,0	15,6	4,4	4.054,848	3.301,648	2.714,554	13.106,326
Novembre	30	20,0	9,3	10,7	4.054,848	3.369,115	1.778,170	31.973,726
Dicembre	31	20,0	3,8	16,2	4.054,848	3.332,903	1.196,670	50.245,785
Totale								212.620,580

Figura 4: esempio di calcolo delle dispersioni dell'edificio ricorrente per la città di Bologna

Perdita di calore per ventilazione

V [m ³]	n [1/h]	q _{ve} [m ³ /h]	H [W/K]
4.793,781	0,00	0,000	0,000

Mese	gg	$\theta_{int,set,H}$ [°C]	θ_e [°C]	$\Delta\theta$ [°C]	H _{ve,adj} [W/K]	Q _{H,ve} [kWh]
Gennaio	31	20,0	1,3	18,7	0,000	0,000
Febbraio	28	20,0	5,4	14,6	0,000	0,000
Marzo	31	20,0	9,6	10,4	0,000	0,000
Aprile	30	20,0	13,6	6,4	0,000	0,000
Maggio	31	20,0	17,7	2,3	0,000	0,000
Giugno	30	20,0	22,2	-2,2	0,000	0,000
Luglio	31	20,0	24,8	-4,8	0,000	0,000
Agosto	31	20,0	21,6	-1,6	0,000	0,000
Settembre	30	20,0	19,3	0,7	0,000	0,000
Ottobre	31	20,0	15,6	4,4	0,000	0,000
Novembre	30	20,0	9,3	10,7	0,000	0,000
Dicembre	31	20,0	3,8	16,2	0,000	0,000
Totale						0,0

Mese	gg	$\theta_{int,set,C}$ [°C]	θ_e [°C]	$\Delta\theta$ [°C]	H _{ve,adj} [W/K]	Q _{C,ve} [kWh]
Gennaio	31	26,0	1,3	24,7	0,000	0,000
Febbraio	28	26,0	5,4	20,6	0,000	0,000
Marzo	31	26,0	9,6	16,4	0,000	0,000
Aprile	30	26,0	13,6	12,4	0,000	0,000
Maggio	31	26,0	17,7	8,3	0,000	0,000
Giugno	30	26,0	22,2	3,8	0,000	0,000
Luglio	31	26,0	24,8	1,2	0,000	0,000
Agosto	31	26,0	21,6	4,4	0,000	0,000
Settembre	30	26,0	19,3	6,7	0,000	0,000
Ottobre	31	26,0	15,6	10,4	0,000	0,000
Novembre	30	26,0	9,3	16,7	0,000	0,000
Dicembre	31	26,0	3,8	22,2	0,000	0,000
Totale						0,000

Legenda

V: volume netto locale

n: ricambi d'aria

q_{ve}: portata d'aria

H_{ve,adj}: coefficiente di scambio termico

$\theta_{int,set}$: temperatura interna

θ_e : temperatura esterna

Q_{H,ve}: energia scambiata nel periodo di riscaldamento

Q_{C,ve}: energia scambiata nel periodo di raffrescamento

Figura 5. esempio di calcolo delle perdite per ventilazione dell'edificio ricorrente per la città di Bologna

Apporti solari attraverso superfici trasparenti

Riscaldamento

F1 100*150 su Muratura in laterizio semipieno 29 (esposizione Est)

Mese	gg	I_{sol} [W/m ²]	ggj	F_{hor}	F_{fin}	F_{ov}	$F_{sh,gl}$	A_g [m ²]	$A_{sol,w}$ [m ²]	$Q_{sol,w,mn}$ [kWh]
Gennaio	31	41,2	0,646	1,000	1,000	1,000	1,000	1,120	0,723	22,162
Febbraio	28	71,3	0,668	1,000	1,000	1,000	1,000	1,120	0,748	35,810
Marzo	31	91,5	0,678	1,000	1,000	1,000	1,000	1,120	0,759	51,671
Aprile	30	124,2	0,684	1,000	1,000	1,000	1,000	1,120	0,766	68,506
Maggio	31	151,7	0,687	1,000	1,000	1,000	1,000	1,120	0,769	86,836
Giugno	30	151,7	0,686	1,000	1,000	1,000	1,000	1,120	0,769	83,955
Luglio	31	176,7	0,686	1,000	1,000	1,000	1,000	1,120	0,769	101,034
Agosto	31	142,3	0,686	1,000	1,000	1,000	1,000	1,120	0,769	81,382
Settembre	30	112,9	0,680	1,000	1,000	1,000	1,000	1,120	0,762	61,952
Ottobre	31	63,3	0,671	1,000	1,000	1,000	1,000	1,120	0,751	35,382
Novembre	30	41,7	0,657	1,000	1,000	1,000	1,000	1,120	0,736	22,084
Dicembre	31	26,7	0,647	1,000	1,000	1,000	1,000	1,120	0,724	14,365
Totale										665,137

Figura 6: esempio di calcolo degli apporti solari (Bologna)

Riepilogo

Mese	$Q_{sol,w}$ [kWh]
Gennaio	3.072,106
Febbraio	4.582,132
Marzo	6.092,577
Aprile	7.589,118
Maggio	9.456,528
Giugno	9.127,558
Luglio	10.854,016
Agosto	8.907,390
Settembre	7.093,236
Ottobre	4.388,228
Novembre	2.951,596
Dicembre	1.979,745
Totale	76.094,231

Legenda

gg: trasmissione solare

F_{hor} : fattore di riduzione ombreggiatura dovuta ad ostruzioni

F_{fin} : fattore di riduzione ombreggiatura dovuta ad aggetti verticali

F_{ov} : fattore di riduzione ombreggiatura dovuta ad aggetti orizzontali

$F_{sh,gl}$: fattore di riduzione dovuto a tendaggi

A_g : area trasparente

$A_{sol,w}$: area equivalente

$Q_{sol,w,mn}$: apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente su componenti vetrati

$Q_{sd,w}$: apporti serra diretti attraverso le partizioni trasparenti

$Q_{sol,w}$: apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente su componenti vetrati comprensivi dei contributi serra

Riepilogo

Mese	$Q_{sol,op,mn}$ [kWh]	$Q_{sol,mn,u}$ [kWh]	$Q_{sol,op}$ [kWh]
Gennaio	1.823,297	0,000	1.823,297
Febbraio	2.752,604	0,000	2.752,604
Marzo	3.826,395	0,000	3.826,395
Aprile	4.934,498	0,000	4.934,498
Maggio	6.294,132	0,000	6.294,132
Giugno	6.145,175	0,000	6.145,175
Luglio	7.291,680	0,000	7.291,680
Agosto	5.867,255	0,000	5.867,255
Settembre	4.531,979	0,000	4.531,979
Ottobre	2.714,554	0,000	2.714,554
Novembre	1.778,170	0,000	1.778,170
Dicembre	1.196,670	0,000	1.196,670
Totale	49.156,410	0,000	49.156,410

Legenda

F_{hor} : fattore di riduzione ombreggiatura dovuta ad ostruzioni

F_{fin} : fattore di riduzione ombreggiatura dovuta ad aggetti orizzontali

F_{ov} : fattore di riduzione ombreggiatura dovuta ad aggetti verticali

α_{sol} : coefficiente di assorbimento della radiazione solare

A_c : area della struttura

$U_{c,eq}$: trasmittanza termica della struttura

R_{se} : Resistenza superficiale esterna della struttura

$A_{sol,op}$: area equivalente

$Q_{sol,op,mn}$: apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente su componenti opachi

$Q_{sol,mn,u}$: apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare negli ambienti non climatizzati adiacenti

$Q_{sd,op}$: apporti serra diretti attraverso le partizioni opache

Q_{si} : apporti serra indiretti attraverso le partizioni opache e trasparenti

$Q_{sol,op}$: apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente su componenti opachi comprensivi degli apporti serra e degli apporti degli ambienti non climatizzati adiacenti

Figura 7: Riepilogo apporti (Bologna)

In ottemperanza alle vigenti normative sono stati considerati i seguenti dati:

- Temperatura esterna media mensile
- Dati della Radiazione solare mensili
- Condizioni di Temperatura (20°C) ed Umidità Relativa (50%) interna costanti

Parametri climatici della località

Gradi giorno

2259 °C

Temperatura minima di progetto

-5 °C

Altitudine

54 m

Zona climatica

E

Giorni di riscaldamento

183

Velocità del vento

2,0 m/s

Zona di vento

1

Province di riferimento

BO

MO

Temperature medie mensili (°C)

GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1,3	5,4	9,6	13,6	17,7	22,2	24,8	21,6	19,3	15,6	9,3	3,8

Irradianza media mensile (W/m²)

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
Orizz.	52,1	92,6	128,5	182,9	233,8	238,4	273,1	214,1	162,0	88,0	55,6	35,9
S	87,9	126,2	117,8	117,8	117,9	109,7	126,6	123,3	128,4	94,9	78,3	52,6
SE/SO	69,5	105,7	112,0	130,5	141,5	134,4	158,3	141,9	129,9	83,8	63,9	42,4
E/O	41,2	71,3	91,5	124,2	151,7	151,7	176,7	142,3	112,9	63,3	41,7	26,7
NE/NO	20,8	37,7	59,9	91,9	126,1	132,5	148,1	111,3	78,1	40,6	24,4	16,3
N	19,1	30,1	44,1	63,2	96,1	106,9	112,2	80,0	55,2	33,7	22,3	15,7

Figura 8: esempio di dati utilizzati per la città di Bologna

Ciò che risulta è detto Bilancio termico dell'edificio, che ci consente di indicare l'energia necessaria al riscaldamento per la stagione invernale e, eventualmente, al raffrescamento per la stagione estiva.

Nel caso in esame sono state scelte 21 città italiane, a copertura dell'intero territorio nazionale, alle quali sono state applicate 3 soluzioni a catalogo (quelle che meglio si prestano a coprire le esigenze tutte le zone climatiche italiane) e sono state verificate le risposte in termini di rispetto dei requisiti di trasmittanza, di risparmio energetico in kWh/mq*a ed in termini di emissioni di CO₂.

L'attività si è svolta cominciando con la simulazione della situazione ante intervento, cioè simulando l'edificio ricorrente così come è stato realizzato. Dalla simulazione sono emersi i valori relativi ai fabbisogni ed alla classe energetica:

Risultati di calcolo

Dati energetici edificio

 Mostra grafici

Certificazione	EPH,nren	EPW,nren	EPC,nren	EPV,nren	EPL,nren	EPT,nren	EPgl,nren	UM EP	etaH	etaW	etaC	Classe
Subalterno	220,9	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	224,1	kWh/m ²	0,5214	0,4893	---	G

Fabbisogno riscaldamento con ventilazione effettiva della certificazione [kWh]

Mese	QHtr	QHve	QHint	Qsd,w	Qsd,op	Qsi	QHsol,w	QHsol,op	QH,nd	QHgn,out	Qp,nren,H	Qp,ren,H	Qp,tot,H
Gennaio	57.194,0	0,0	334,8	0,0	0,0	0,0	3.072,1	1.823,3	53.787,9	69.223,2	99.613,8	92,3	99.706,1
Febbraio	40.221,1	0,0	302,4	0,0	0,0	0,0	4.582,1	2.752,6	35.345,7	45.485,7	69.476,5	63,1	69.539,6
Marzo	31.148,6	0,0	334,8	0,0	0,0	0,0	6.092,6	3.826,4	24.772,6	31.874,9	48.620,6	46,1	48.666,7
Aprile	9.923,0	0,0	162,0	0,0	0,0	0,0	3.597,8	2.328,2	6.304,3	8.109,0	12.385,5	15,3	12.400,9
Ottobre	10.001,2	0,0	183,6	0,0	0,0	0,0	2.218,0	1.364,5	7.628,2	9.812,3	14.980,7	17,7	14.998,4
Novembre	31.973,7	0,0	324,0	0,0	0,0	0,0	2.951,6	1.778,2	28.702,0	36.933,1	56.363,0	52,4	56.415,4
Dicembre	50.245,8	0,0	334,8	0,0	0,0	0,0	1.979,7	1.196,7	47.931,5	61.684,9	90.705,2	83,4	90.788,6
	230.707,4	0,0	1.976,4	0,0	0,0	0,0	24.494,0	15.069,8	204.472,3	263.123,0	392.145,2	370,4	392.515,6

Riscaldamento ACS Raffrescamento Ventilazione Illuminazione Trasporto Energia elettrica prodotta

Fabbisogno acqua calda sanitaria della certificazione [kWh]

Mese	QW	QWgn,out	Qp,nren,W	Qp,ren,W	Qp,tot,W
Gennaio	237,3	256,3	368,8	0,3	369,1
Febbraio	214,3	231,5	353,5	0,3	353,9
Marzo	237,3	256,3	390,9	0,4	391,2
Aprile	229,6	248,0	378,8	0,5	379,2
Maggio	237,3	256,3	622,1	5,6	627,7
Giugno	229,6	248,0	602,0	5,4	607,4
Luglio	237,3	256,3	622,1	5,6	627,7
Agosto	237,3	256,3	622,1	5,6	627,7
Settembre	229,6	248,0	602,0	5,4	607,4
Ottobre	237,3	256,3	391,2	0,5	391,7
Novembre	229,6	248,0	378,4	0,4	378,8
Dicembre	237,3	256,3	376,8	0,3	377,2
	2.793,6	3.017,2	5.708,8	30,2	5.739,0

Riscaldamento ACS Raffrescamento Ventilazione Illuminazione Trasporto Energia elettrica prodotta

Figura 9: risultati di calcolo della situazione ante intervento per la città di Bologna

Per ognuna delle simulazioni effettuate (situazione ante intervento + situazione post intervento), per le 21 città, per le tre soluzioni scelte, sono stati, infine calcolati i fabbisogni così come da figure di seguito inserite:

Fabbisogno energetico utile

Riscaldamento

Mese	Q _{cl} [kWh]	Q _{cl,ut} [kWh]	Q _{cl} [kWh]	Q _{cl,ut} [kWh]	η _{cl}	η _{cl,ut}	Q _{cl,ut} [kWh]
Gennaio	57.194,0	0,0	334,8	3.072,1	0,060	1,000	53.787,9
Febbraio	40.221,1	0,0	302,4	4.582,1	0,121	0,998	35.345,7
Marzo	31.148,6	0,0	334,8	6.092,6	0,206	0,992	24.772,6
Aprile	9.923,0	0,0	162,0	3.597,8	0,379	0,962	6.304,3
Ottobre	10.001,2	0,0	183,6	2.218,0	0,240	0,988	7.628,2
Novembre	31.973,7	0,0	324,0	2.951,6	0,102	0,999	28.702,0
Dicembre	50.245,8	0,0	334,8	1.979,7	0,046	1,000	47.931,5
Totale							204.472,3

Raffrescamento

Mese	Q _{cl} [kWh]	Q _{cl,ut} [kWh]	Q _{cl} [kWh]	Q _{cl,ut} [kWh]	η _{cl}	η _{cl,ut}	Q _{cl,ut} [kWh]
Giugno	4.509,7	0,0	205,2	5.964,8	1,368	0,980	1.750,4
Luglio	940,3	0,0	334,8	10.854,0	11,899	1,000	10.248,5
Agosto	3.463,2	0,0	140,4	3.956,1	1,183	0,953	795,7
Totale							12.794,6

Acqua calda sanitaria

Mese	gg	V _{sc} [l]	T _{sc} [°C]	T _{sc} [°C]	Q _{sc,ut}
Gennaio	31	250,00	13,65	40,00	237,26
Febbraio	28	250,00	13,65	40,00	214,30
Marzo	31	250,00	13,65	40,00	237,26
Aprile	30	250,00	13,65	40,00	229,61
Maggio	31	250,00	13,65	40,00	237,26
Giugno	30	250,00	13,65	40,00	229,61
Luglio	31	250,00	13,65	40,00	237,26
Agosto	31	250,00	13,65	40,00	237,26
Settembre	30	250,00	13,65	40,00	229,61
Ottobre	31	250,00	13,65	40,00	237,26
Novembre	30	250,00	13,65	40,00	229,61
Dicembre	31	250,00	13,65	40,00	237,26
Totale					2.793,60

Fabbisogno energia primaria per il riscaldamento della zona

Mese	Q _{cl,ut} [kWh]	Q _{cl} [kWh]	η _{cl} [%]	Q _{prim,H} [kWh]	Q _{prim,H} [kWh]	Q _{prim,H} [kWh]				
Gennaio	53.787,9	53.778,4	92,0	93,0	90,8	73,2	53,9	99.613,8	92,3	99.706,1
Febbraio	35.345,7	35.337,2	92,0	93,0	90,8	69,0	50,8	69.476,5	63,1	69.539,6
Marzo	24.772,6	24.763,1	92,0	93,0	90,8	69,1	50,9	48.620,6	46,1	48.666,7
Aprile	6.304,3	6.299,7	92,0	93,0	90,8	69,1	50,8	12.385,5	15,3	12.400,9
Ottobre	7.628,2	7.623,0	92,0	93,0	90,8	69,1	50,9	14.980,7	17,7	14.998,4
Novembre	28.702,0	28.692,8	92,0	93,0	90,8	69,1	50,9	56.363,0	52,4	56.415,4
Dicembre	47.931,5	47.922,0	92,0	93,0	90,8	71,7	52,8	90.705,2	83,4	90.788,6
Totale	204.472,3	204.416,3	92,0	93,0	90,8	70,7	52,1	392.145,2	370,4	392.515,6

Fabbisogno energia primaria per il raffrescamento della zona

Mese	Q _{cl,ut} [kWh]	η _{cl} [%]	Q _{prim,C} [kWh]	Q _{prim,C} [kWh]	Q _{prim,C} [kWh]				
Giugno	1.750,4	100,0	---	---	---	---	0,0	0,0	0,0
Luglio	10.248,5	100,0	---	---	---	---	0,0	0,0	0,0
Agosto	795,7	100,0	---	---	---	---	0,0	0,0	0,0
Totale	12.794,6	100,0	---	---	---	---	0,0	0,0	0,0

Fabbisogno energia primaria per l'acqua calda sanitaria della zona

Mese	$Q_{W,sa}$ [kWh]	η_{tr} [%]	η_d [%]	η_{reg} [%]	η_g [%]	$Q_{trans,w}$ [kWh]	$Q_{vent,w}$ [kWh]	$Q_{rec,w}$ [kWh]
Gennaio	237,3	100,0	92,6	73,2	64,3	368,8	0,3	369,1
Febbraio	214,3	100,0	92,6	69,0	60,6	353,5	0,3	353,9
Marzo	237,3	100,0	92,6	69,1	60,6	390,9	0,4	391,2
Aprile	229,6	100,0	92,6	69,1	60,5	378,8	0,5	379,2
Maggio	237,3	100,0	92,6	44,9	37,8	622,1	5,6	627,7
Giugno	229,6	100,0	92,6	44,9	37,8	602,0	5,4	607,4
Luglio	237,3	100,0	92,6	44,9	37,8	622,1	5,6	627,7
Agosto	237,3	100,0	92,6	44,9	37,8	622,1	5,6	627,7
Settembre	229,6	100,0	92,6	44,9	37,8	602,0	5,4	607,4
Ottobre	237,3	100,0	92,6	69,1	60,6	391,2	0,5	391,7
Novembre	229,6	100,0	92,6	69,1	60,6	378,4	0,4	378,8
Dicembre	237,3	100,0	92,6	71,7	62,9	376,8	0,3	377,2
Totale	2.793,6	100,0	92,6	56,7	48,7	5.708,8	30,2	5.739,0

Legenda

- Q_{tr} : energia scambiata per trasmissione
- Q_{vent} : energia scambiata per ventilazione
- Q_{int} : energia da apporti gratuiti interni
- $Q_{sol,t}$: energia da apporti solari interni (superfici trasparenti)
- γ : rapporto tra apporti interni e energia scambiata per trasmissione e ventilazione
- μ : fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti
- $Q_{H,c}$: fabbisogno energetico utile per il riscaldamento
- $Q_{C,c}$: fabbisogno energetico utile per il raffrescamento
- $Q_{W,sa}$: fabbisogno energetico utile per l'acqua calda sanitaria
- $Q'_{H,c}$: fabbisogno energetico utile per il riscaldamento al netto dei recuperi
- $Q'_{C,c}$: fabbisogno energetico utile per il raffrescamento
- η_e : rendimento di emissione
- η_r : rendimento di regolazione
- η_d : rendimento di distribuzione
- η_{ge} : rendimento di generazione
- η_g : rendimento globale
- Q_p : fabbisogno di energia primaria

Figura 10: Calcolo dei fabbisogni per la situazione ante intervento per la città di Bologna

Energia primaria e quote rinnovabili

Subalterno

Ep rinnovabile [kWh]

Servizio	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giù	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Totale
H	92	63	46	15	0	0	0	0	0	18	52	83	370
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W	0	0	0	0	6	5	6	6	5	0	0	0	30
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	92	63	46	16	6	5	6	6	5	18	53	84	401

Ep non rinnovabile [kWh]

Servizio	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giù	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Totale
H	99.614	69.476	48.621	12.386	0	0	0	0	0	14.998	56.363	90.706	392.145
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W	389	354	391	379	622	602	622	622	602	391	378	377	5.709
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	99.983	69.830	49.011	12.764	622	602	622	622	602	15.372	56.741	91.082	397.864

Ep totale [kWh]

Servizio	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giù	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Totale
H	99.706	69.540	48.667	12.401	0	0	0	0	0	14.998	56.415	90.789	392.516
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W	389	354	391	379	628	607	628	628	607	392	379	377	5.739
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100.075	69.893	49.058	12.780	628	607	628	628	607	15.390	56.794	91.166	398.255

Quota rinnovabile

Servizio	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giù	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Totale
H	0%	0%	0%	0%	---	---	---	---	---	0%	0%	0%	0%
C	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
W	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	1%
V	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
L	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
T	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%

Figura 11: calcolo delle quote di energia disaggregate per tipologia di servizio per la situazione ante intervento a Bologna

Indici di prestazione energetica

Subalterno

EP rinnovabile [kWh/m²]

Servizio	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giù	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Totale
H	0,05	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,21
C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
W	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,05	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,23

EP non rinnovabile [kWh/m²]

Servizio	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giù	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Totale
H	56,11	39,13	27,38	6,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,44	31,75	51,09	220,87
C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
W	0,21	0,20	0,22	0,21	0,35	0,34	0,35	0,35	0,34	0,22	0,21	0,21	3,22
V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	56,31	39,33	27,60	7,19	0,35	0,34	0,35	0,35	0,34	8,66	31,96	51,30	224,08

EP totale [kWh/m²]

Servizio	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giù	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Totale
H	56,16	39,17	27,41	6,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,45	31,77	51,13	221,08
C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
W	0,21	0,20	0,22	0,21	0,35	0,34	0,35	0,35	0,34	0,22	0,21	0,21	3,23
V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	56,37	39,37	27,63	7,20	0,35	0,34	0,35	0,35	0,34	8,67	31,99	51,35	224,31

Figura 12: calcolo degli indici di prestazione energetica disaggregati per tipologia di servizio per la situazione ante intervento a Bologna

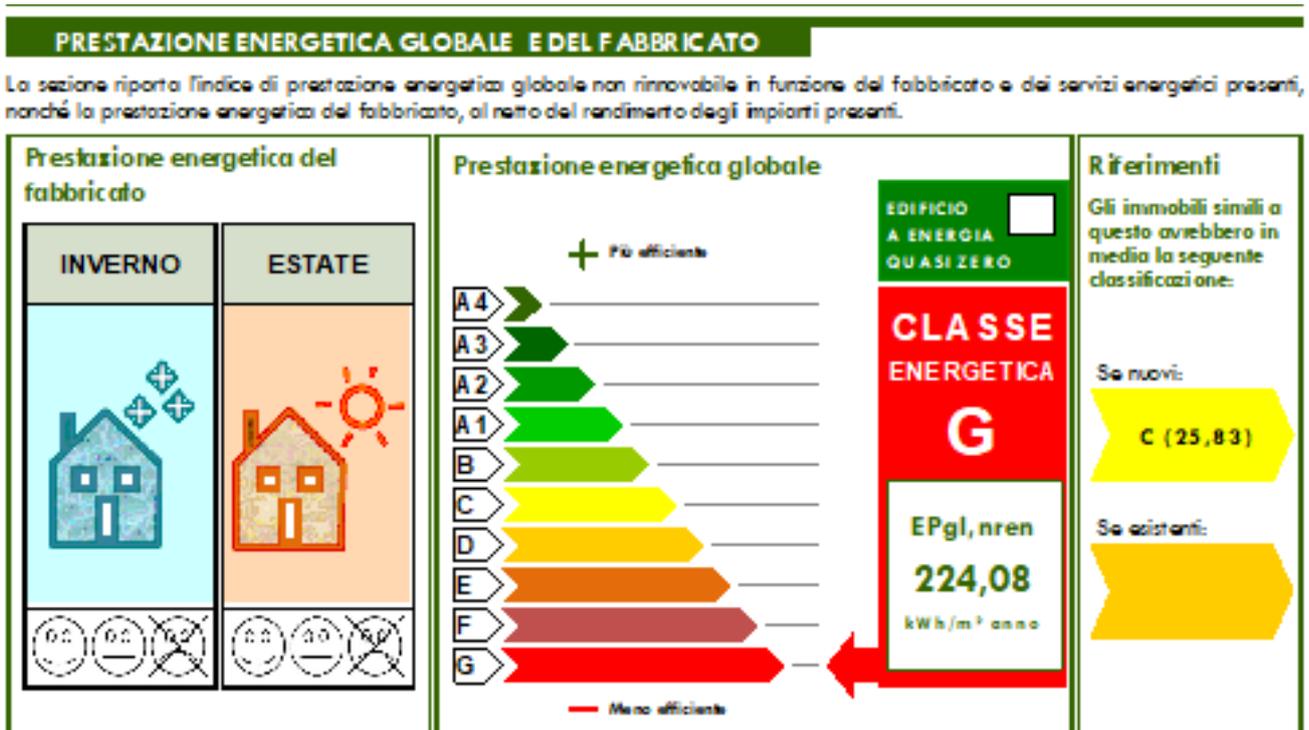


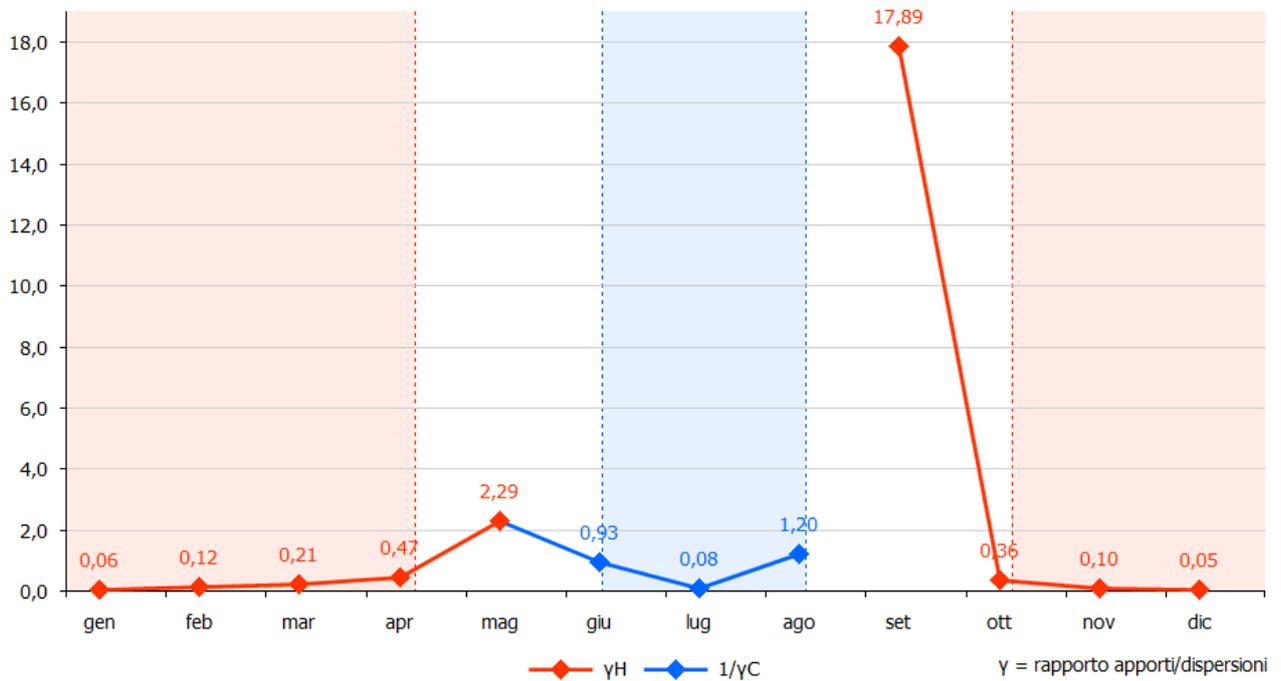
Figura 13: classe energetica della situazione ex ante per la città di Bologna

Si presentano di seguito i grafici dei calcoli ex ante per la città di Bologna elaborati con il software Namirial, i dati saranno utilizzati da base per il confronto con le soluzioni ex post. Si sottolinea che lo stesso tipo di dati sono stati elaborati per le 21 città prese in considerazione per 3 diverse soluzioni di isolamento considerando due diverse tipologie di requisito da rispettare:

1. Trasmittanza limite di legge con requisito ante 2020
2. Trasmittanza limite di legge con requisito post 2020

Stagioni di riscaldamento e raffrescamento Dispersioni Fabbisogni energia utile Fabbisogni energia primaria

Stagioni di riscaldamento e raffrescamento



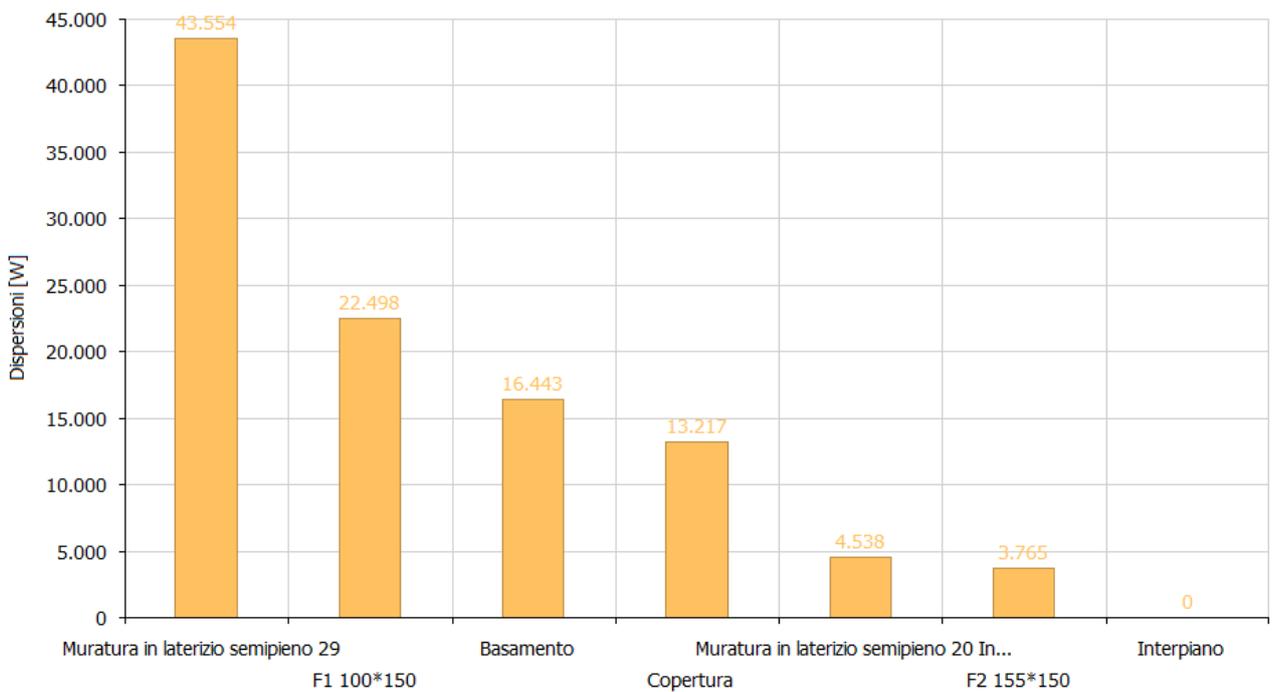
Periodo riscaldamento 15 ottobre - 15 aprile

Periodo raffrescamento 12 giugno - 13 agosto

Figura 14: stagioni di climatizzazione

Stagioni di riscaldamento e raffrescamento Dispersioni Fabbisogni energia utile Fabbisogni energia primaria

Dispersioni per tipologia di struttura

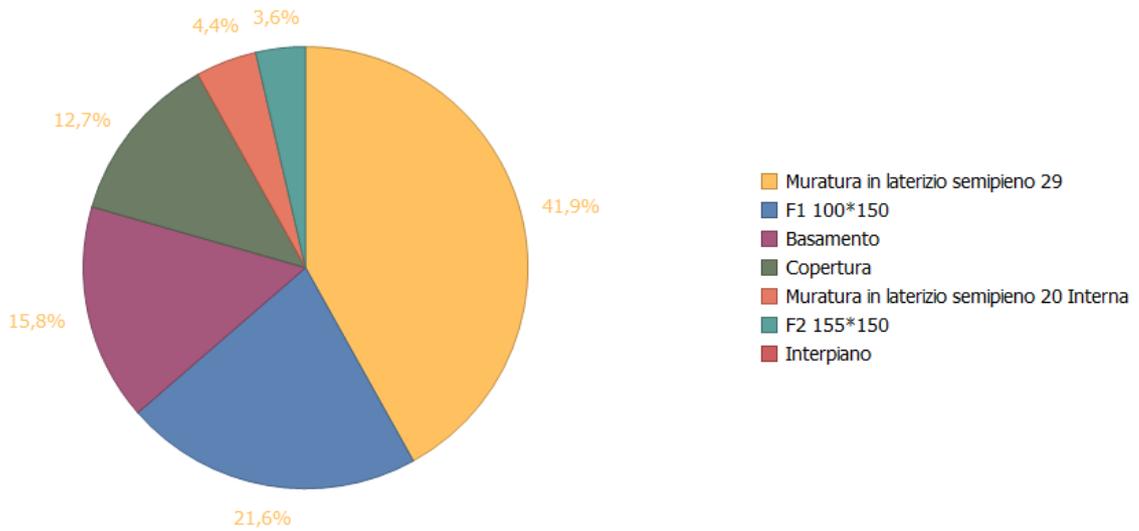


Tipo grafico Istogramma

Zona termica 

Stagioni di riscaldamento e raffrescamento **Dispersioni** Fabbisogni energia utile Fabbisogni energia primaria

Dispersioni per tipologia di struttura

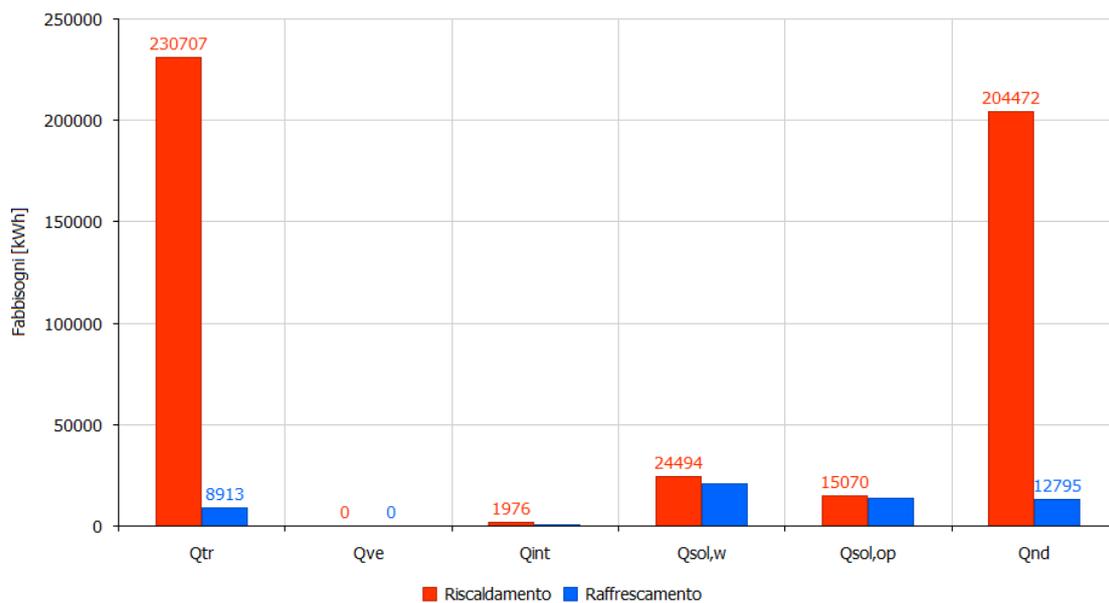


Tipo grafico

Figura 15: dispersioni

Stagioni di riscaldamento e raffrescamento **Dispersioni** Fabbisogni energia utile Fabbisogni energia primaria

Fabbisogni di energia utile



Tipo grafico

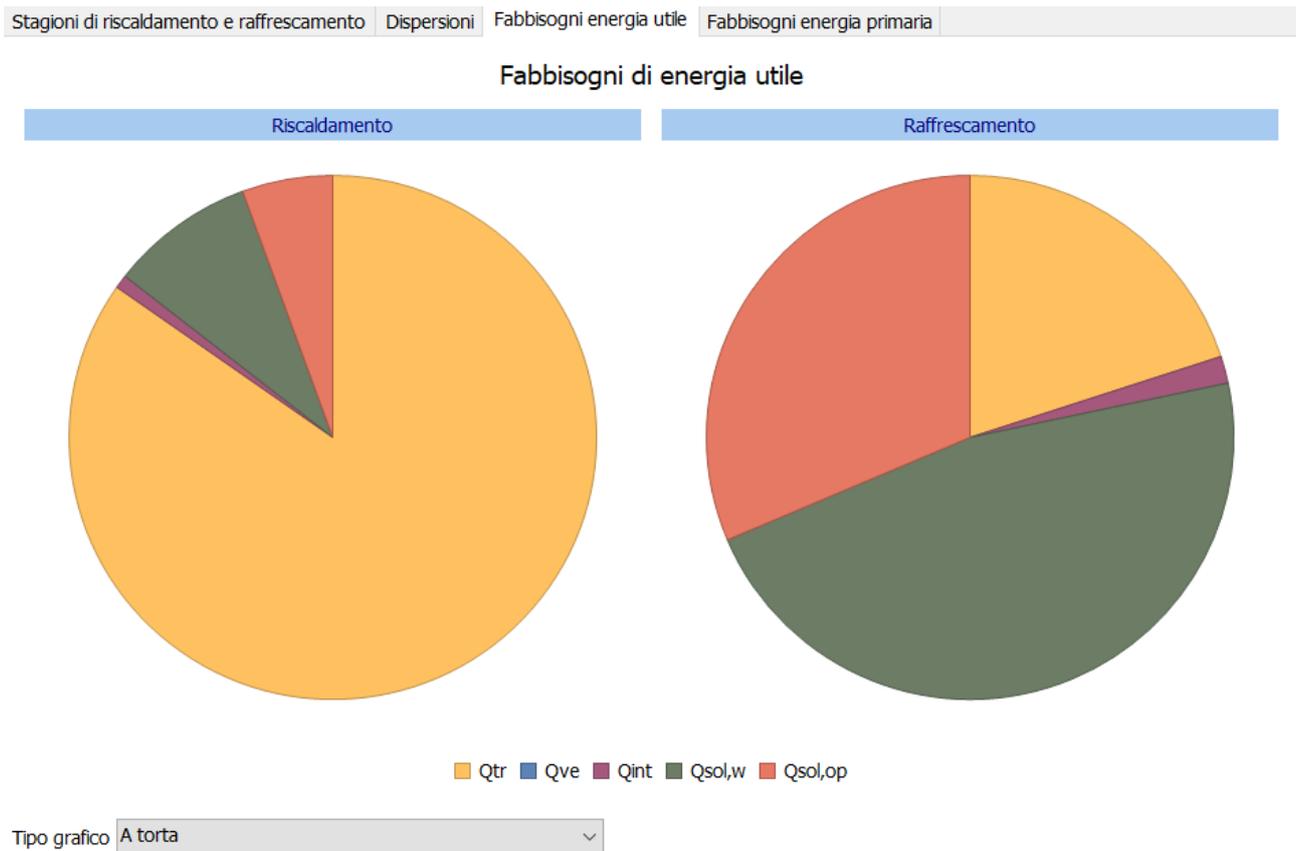
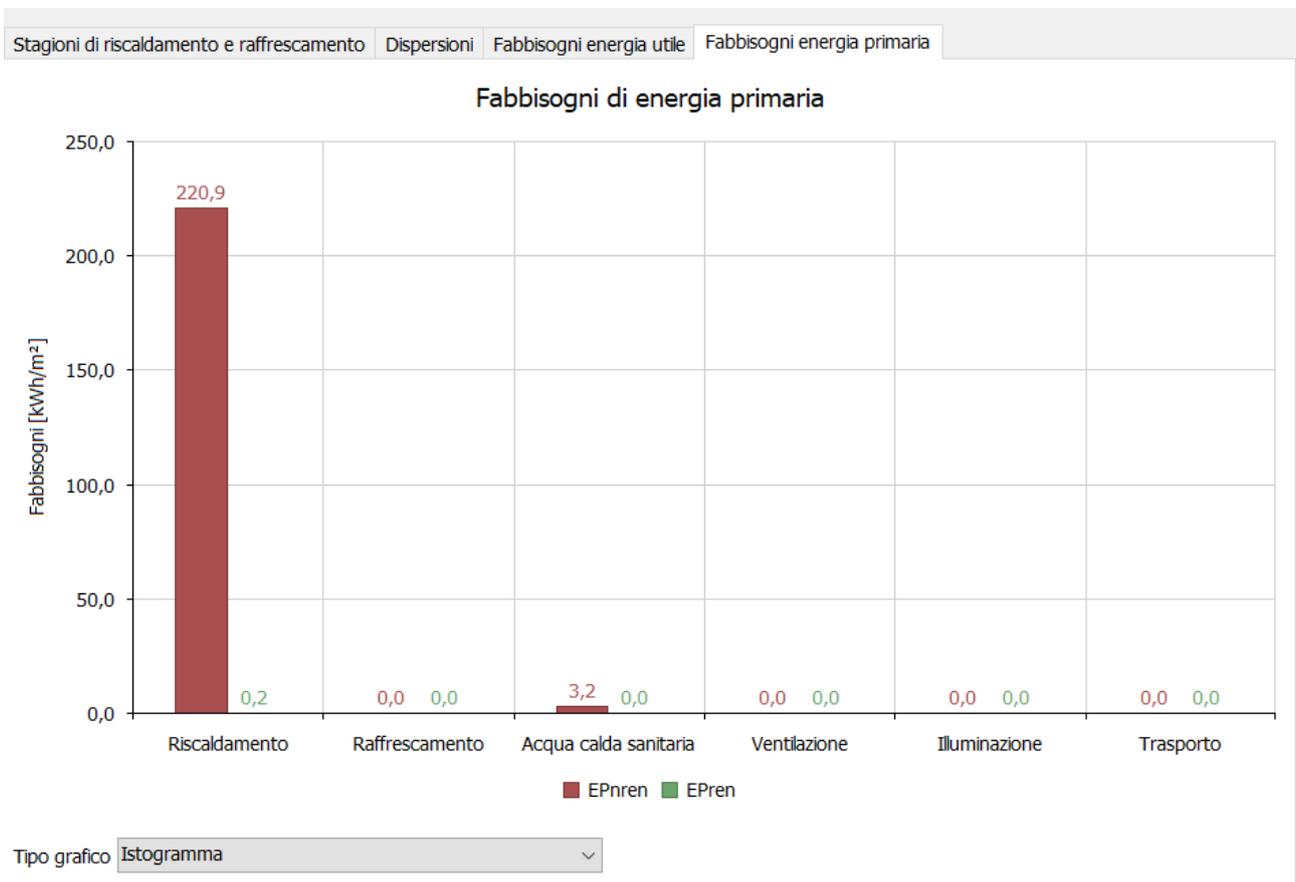


Figura 16: fabbisogni di energia utile



Fabbisogni di energia primaria

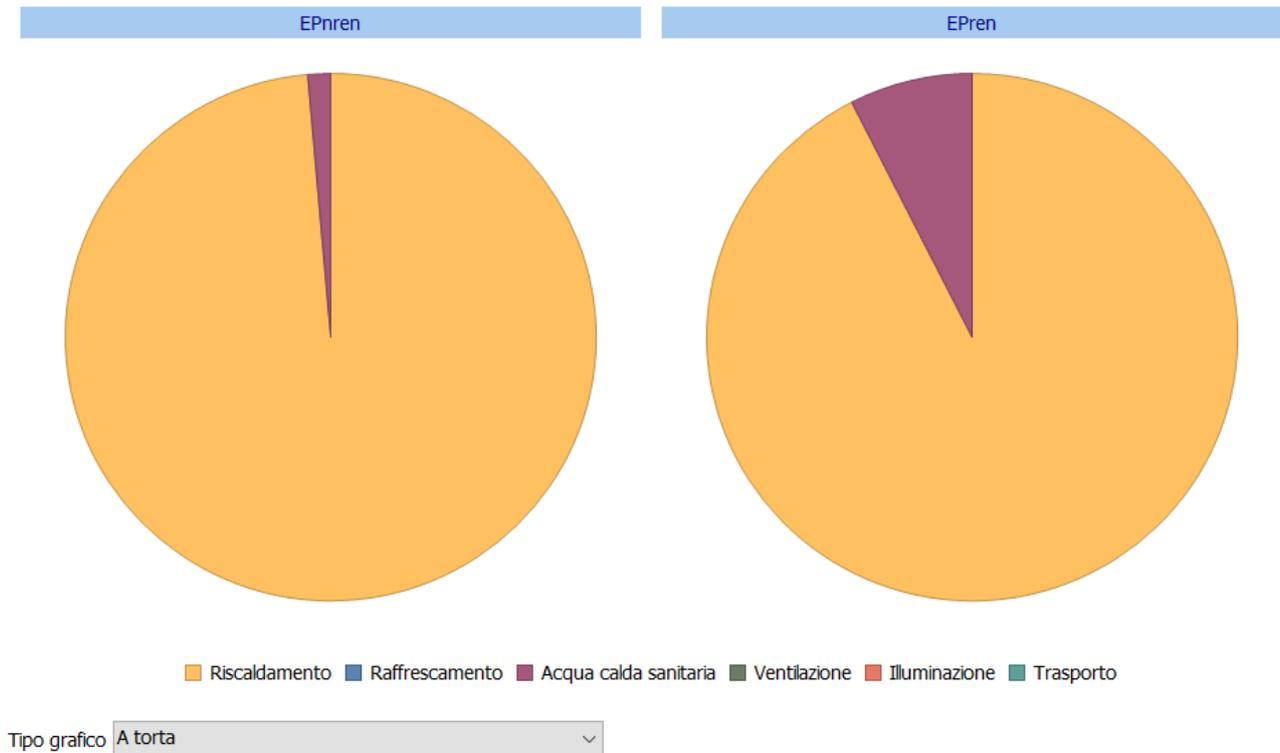


Figura 17: fabbisogni di energia primaria

In merito alle verifiche post intervento, si precisa che, in tutti i casi, sono state effettuate le verifiche di Glaser in merito alla formazione di condensa. Si inserisce di seguito un esempio relativo alla città di Bologna con un intervento ex post di inserimento di XPS:

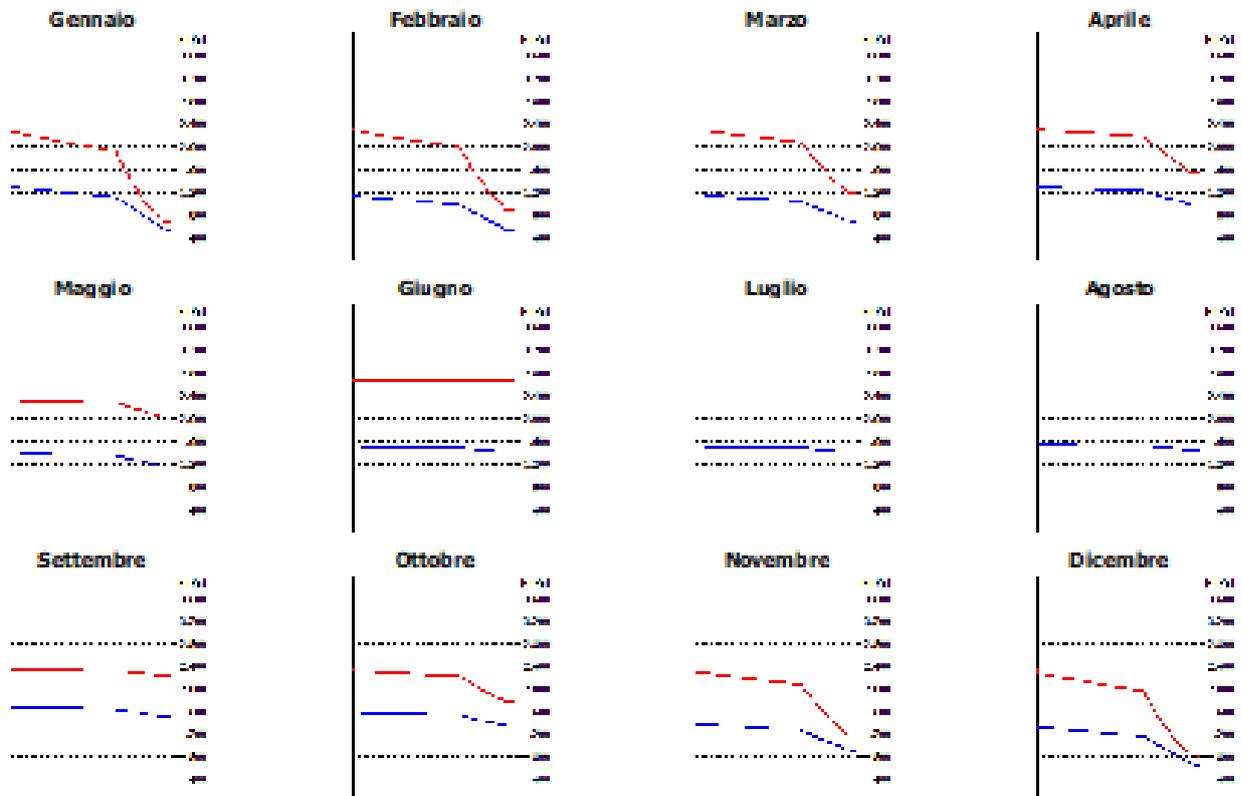
C. VERIFICA TERMOIGROMETRICA

Il calcolo delle pressioni parziali di vapore è effettuato secondo il criterio delle classi di concentrazione

Muratura in laterizio semipieno 29

N	Descrizione dall'interno verso l'esterno	ρ	Spessore [cm]	R [m ² K/W]
1	intonaco di calce e gesso	10,0	2,0	0,029
2	Blocco semipieno di laterizio spessore 250	9,0	25,0	0,625
3	XPS	60,0	12,0	3,750
4	Malta di calce o di calce e cemento	22,0	2,0	0,022
Resistenza superficiale interna				0,130
Resistenza superficiale esterna				0,040
Totale			41,0	4,596

Mese	T _i [°C]	R [Pa]	T _e [°C]	P _e [Pa]	T _a [°C]	T _{amb} [°C]	h _{a,ext}	g _e [kg/m ²]	M _a [kg/m ²]
Gennaio	20,0	1.303	1,3	538	19,0	14,3	0,6853	0,0000	0,0000
Febbraio	20,0	1.141	5,8	532	19,2	12,3	0,4714	0,0000	0,0000
Marzo	20,0	1.160	9,6	690	19,8	12,5	0,2821	0,0000	0,0000
Aprile	20,0	1.303	13,6	975	19,7	14,3	0,1137	0,0000	0,0000
Maggio	18,0	1.351	17,7	1.151	0,0	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
Giugno	22,2	1.512	22,2	1.412	0,0	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
Luglio	24,8	1.514	24,8	1.414	0,0	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
Agosto	21,6	1.548	21,6	1.448	0,0	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
Settembre	19,3	1.605	19,3	1.505	0,0	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
Ottobre	20,0	1.598	15,0	1.340	19,8	17,5	0,4325	0,0000	0,0000
Novembre	20,0	1.305	9,3	908	19,8	15,3	0,5567	0,0000	0,0000
Dicembre	20,0	1.332	3,8	646	19,1	14,5	0,6622	0,0000	0,0000



I_{str} Struttura: 0,9470

La struttura non presenta rischi di formazione muffe.

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Le simulazioni sono state effettuate a parità di condizioni per tutte e 21 le città prese in considerazione.

L'edificio è stato modellato in tutte le sue parti ed oltre, alle tre città indicate in fase preliminare di progetto (Bologna, Roma e Palermo), sono state modellate altre 18 città:

Pescara
Crotone
Salerno
Bologna
Trieste
Roma (Ciampino)
Genova
Brescia
Ascoli Piceno
Campobasso
Torino
Bari
Cagliari
Palermo (Boccadifalco)
Firenze (aeroporto)
Bolzano
Perugia
Verona

SOLUZIONI MODELLATE	PESCARA	PESCARA risparmi %	CROTONE	CROTONE risparmi %	SALERNO	SALERNO risparmi %	TRIESTE	TRIESTE risparmi %
Performance ante intervento (kWh/mq*anno)	158,5	-	82,2	-	106,9	-	175	-
Performance con PCS ante 2020 (kWh/mq*anno)	107,4	32%	54,5	34%	71,7	33%	118,8	32%
Performance con STIFERITE ante 2020 (kWh/mq*anno)	107	32%	54,3	34%	71,4	33%	118,4	32%
Performance con XPS ante 2020 (kWh/mq*anno)	107,4	32%	54,5	34%	71,7	33%	118,8	32%
Performance con PCS post 2020 (kWh/mq*anno)	105,7	33%	53,6	35%	70,5	34%	116,9	33%
Performance con STIFERITE post 2020 (kWh/mq*anno)	105,8	33%	53,6	35%	70,5	34%	117	33%
Performance con XPS post 2020 (kWh/mq*anno)	105,7	33%	53,6	35%	70,5	34%	116,9	33%
Performance ante intervento (kg CO2/anno)	36,32	-	18,84	-	24,48	-	40,09	-
Performance con PCS ante 2020 (kg CO2/anno)	24,61	32%	12,49	34%	16,42	33%	27,22	32%
Performance con STIFERITE ante 2020 (kg CO2/anno)	24,52	32%	12,44	34%	16,36	33%	27,12	32%
Performance con XPS ante 2020 (kg CO2/anno)	24,61	32%	12,49	34%	16,42	33%	27,22	32%
Performance con PCS post 2020 (kg CO2/anno)	24,22	33%	12,27	35%	16,15	34%	26,79	33%
Performance con STIFERITE post 2020 (kg CO2/anno)	24,23	33%	12,28	35%	16,16	34%	26,8	33%
Performance con XPS post 2020 (kg CO2/anno)	24,22	33%	12,27	35%	16,15	34%	26,79	33%

SOLUZIONI MODELLATE	GENOVA	GENOVA risparmi %	BRESCIA	BRESCIA risparmi %	ASCOLI PICENO	ASCOLI PICENO risparmi %	CAMPOBASSO	CAMPOBASSO risparmi %	TORINO	TORINO risparmi %
Performance ante intervento (kWh/mq*anno)	131,2	-	239,2	-	210,1	-	222,4	-	246	-
Performance con PCS ante 2020 (kWh/mq*anno)	88,1	33%	170,6	29%	148,6	29%	155,1	30%	176,7	28%
Performance con STIFERITE ante 2020 (kWh/mq*anno)	87,8	33%	170	29%	148,1	30%	154,6	30%	176,1	28%
Performance con XPS ante 2020 (kWh/mq*anno)	88,1	33%	170,6	29%	148,6	29%	155,1	30%	176,7	28%
Performance con PCS post 2020 (kWh/mq*anno)	86,7	34%	168	30%	146,4	30%	152,7	31%	174	29%
Performance con STIFERITE post 2020 (kWh/mq*anno)	86,7	34%	168,1	30%	146,5	30%	152,8	31%	174,1	29%
Performance con XPS post 2020 (kWh/mq*anno)	86,7	34%	168	30%	146,4	30%	152,7	31%	174	29%
Performance ante intervento (kg CO2/anno)	30,06	-	54,81	-	48,15	-	50,94	-	56,37	-
Performance con PCS ante 2020 (kg CO2/anno)	20,19	33%	39,09	29%	34,06	29%	35,54	30%	40,48	28%
Performance con STIFERITE ante 2020 (kg CO2/anno)	20,12	33%	38,95	29%	33,94	30%	35,41	30%	40,34	28%
Performance con XPS ante 2020 (kg CO2/anno)	20,19	33%	39,09	29%	34,06	29%	35,54	30%	40,48	28%
Performance con PCS post 2020 (kg CO2/anno)	19,86	34%	38,5	30%	33,55	30%	34,99	31%	39,87	29%
Performance con STIFERITE post 2020 (kg CO2/anno)	19,87	34%	38,51	30%	33,56	30%	35	31%	39,88	29%
Performance con XPS post 2020 (kg CO2/anno)	19,86	34%	38,5	30%	33,55	30%	34,99	31%	39,87	29%

SOLUZIONI MODELLATE	BARI	BARI risparmi %	CAGLIARI	CAGLIARI risparmi %	FIRENZE	FIRENZE risparmi %	BOLZANO	BOLZANO risparmi %
Performance ante intervento (kWh/mq*anno)	120,4	-	112,5	-	148,5	-	209,6	-
Performance con PCS ante 2020 (kWh/mq*anno)	81,7	32%	75,7	33%	99,5	33%	144,9	31%
Performance con STIFERITE ante 2020 (kWh/mq*anno)	81,4	32%	75,4	33%	99,2	33%	144,4	31%
Performance con XPS ante 2020 (kWh/mq*anno)	81,7	32%	75,7	33%	99,5	33%	144,9	31%
Performance con PCS post 2020 (kWh/mq*anno)	80,4	33%	74,5	34%	97,9	34%	142,6	32%
Performance con STIFERITE post 2020 (kWh/mq*anno)	80,5	33%	74,5	34%	98	34%	142,6	32%
Performance con XPS post 2020 (kWh/mq*anno)	80,4	33%	74,5	34%	97,9	34%	142,6	32%
Performance ante intervento (kg CO2/anno)	27,58	-	25,78	-	34,02	-	48,02	-
Performance con PCS ante 2020 (kg CO2/anno)	18,72	32%	17,35	33%	22,81	33%	33,2	31%
Performance con STIFERITE ante 2020 (kg CO2/anno)	18,66	32%	17,28	33%	22,72	33%	33,08	31%
Performance con XPS ante 2020 (kg CO2/anno)	18,72	32%	17,35	33%	22,81	33%	33,2	31%
Performance con PCS post 2020 (kg CO2/anno)	18,43	33%	17,07	34%	22,43	34%	32,66	32%
Performance con STIFERITE post 2020 (kg CO2/anno)	18,44	33%	17,07	34%	22,44	34%	32,68	32%
Performance con XPS post 2020 (kg CO2/anno)	18,43	33%	17,07	34%	22,43	34%	32,66	32%

SOLUZIONI MODELLATE	PERUGIA	PERUGIA risparmi %	VERONA	VERONA risparmi %	BOLOGNA	BOLOGNA risparmi %	ROMA	ROMA risparmi %	PALERMO	PALERMO risparmi %
Performance ante intervento (kWh/mq*anno)	228,5	-	226,1	-	240,2	-	188,6	-	79,6	-
Performance con PCS ante 2020 (kWh/mq*anno)	160,2	30%	159,5	29%	168,50	30%	132,20	30%	55,90	30%
Performance con STIFERITE ante 2020 (kWh/mq*anno)	159,6	30%	159	30%	167,90	30%	132,40	30%	56,00	30%
Performance con XPS ante 2020 (kWh/mq*anno)	160,2	30%	159,5	29%	168,50	30%	132,20	30%	55,90	30%
Performance con PCS post 2020 (kWh/mq*anno)	157,7	31%	157,1	31%	165,90	31%	132,80	30%	55,90	30%
Performance con STIFERITE post 2020 (kWh/mq*anno)	157,8	31%	157,2	30%	166,00	31%	130,50	31%	56,00	30%
Performance con XPS post 2020 (kWh/mq*anno)	157,7	31%	157,1	31%	165,90	31%	131,00	31%	55,90	30%
Performance ante intervento (kg CO2/anno)	52,35	-	51,81	-	55,02	-	43,22	-	18,23	-
Performance con PCS ante 2020 (kg CO2/anno)	36,7	30%	36,55	29%	38,61	30%	30,30	30%	12,80	30%
Performance con STIFERITE ante 2020 (kg CO2/anno)	36,57	30%	36,42	30%	38,47	30%	30,34	30%	12,83	30%
Performance con XPS ante 2020 (kg CO2/anno)	36,7	30%	36,55	29%	38,61	30%	30,30	30%	12,80	30%
Performance con PCS post 2020 (kg CO2/anno)	36,14	31%	36	31%	38,02	31%	30,43	30%	12,80	30%
Performance con STIFERITE post 2020 (kg CO2/anno)	36,15	31%	36,01	30%	38,03	31%	29,90	31%	12,83	30%
Performance con XPS post 2020 (kg CO2/anno)	36,14	31%	36	31%	38,02	31%	30,01	31%	12,80	30%

Figura 18: tabelle con dati di calcoli

Dall’analisi effettuata si evince chiaramente che tutte le soluzioni prospettate consentono almeno il 30% di risparmio totale in termini di energia primaria ed almeno il 29% di risparmio di emissioni di CO₂. Si esplicitano di seguito i grafici per le tre città inizialmente scelte per la simulazione, Bologna, Roma e Palermo:

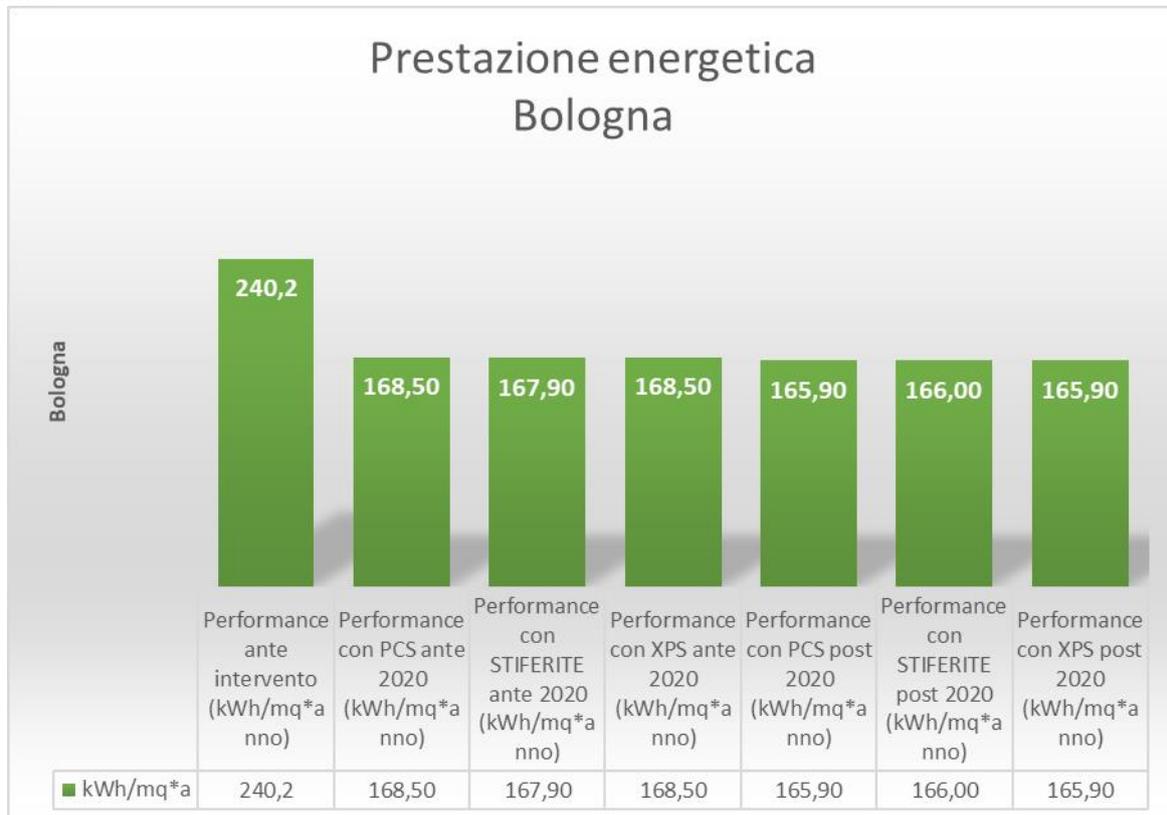


Figura 19: Prestazioni energetiche per Bologna per tutte le configurazioni scelte ex ante ed ex post

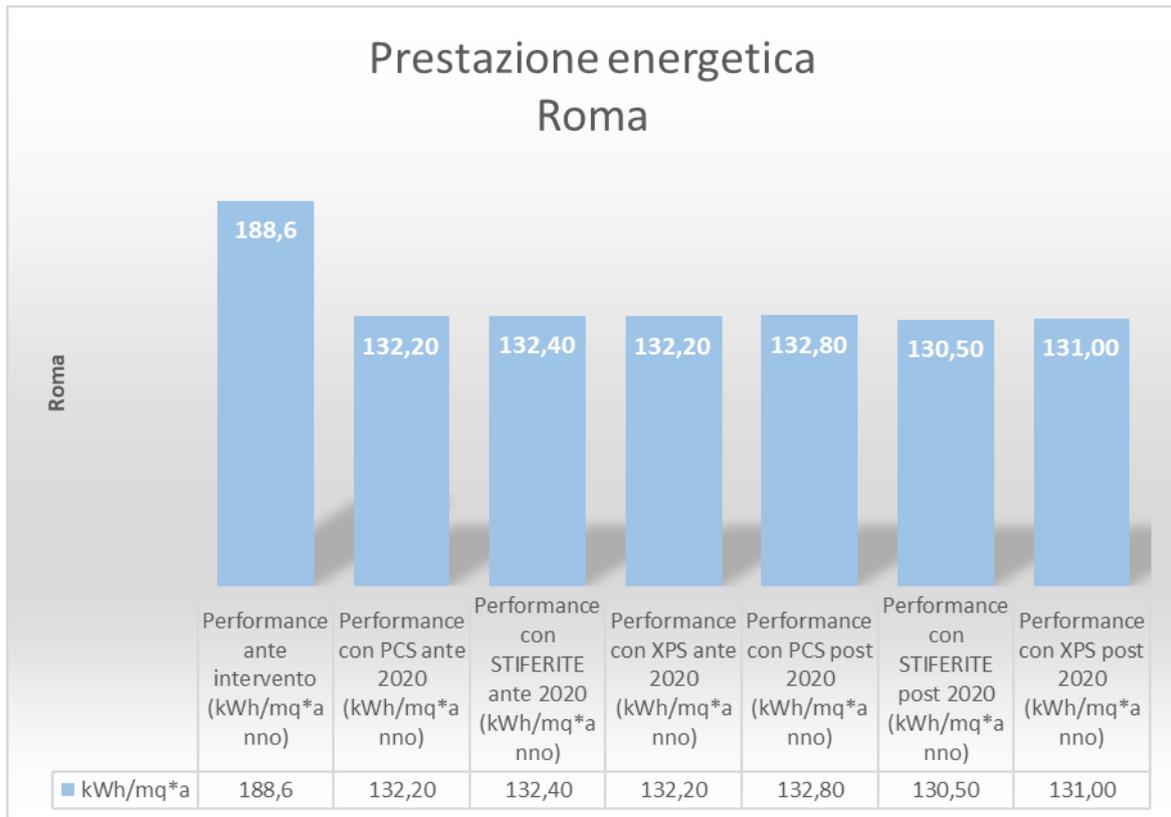


Figura 20: Prestazioni energetiche per Roma per tutte le configurazioni scelte ex ante ed ex post

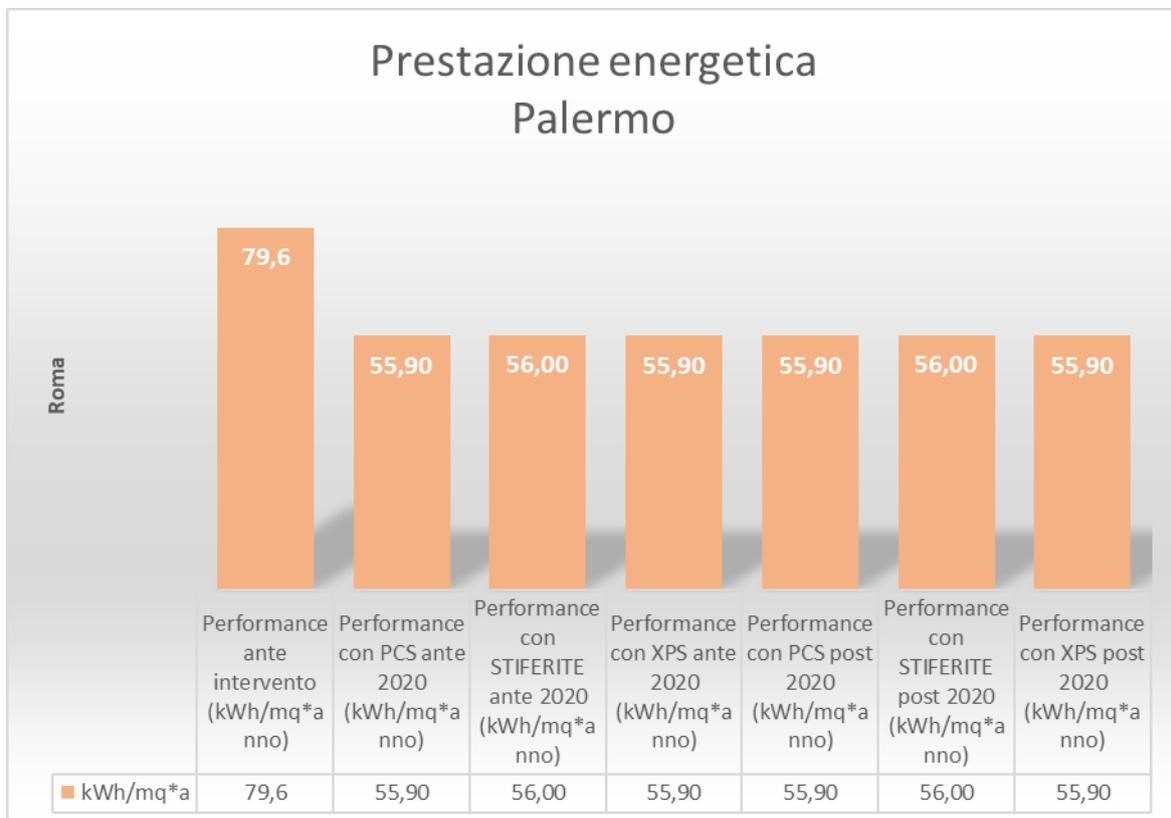


Figura 21: Prestazioni energetiche per Palermo in tutte le configurazioni ex ante ed ex post

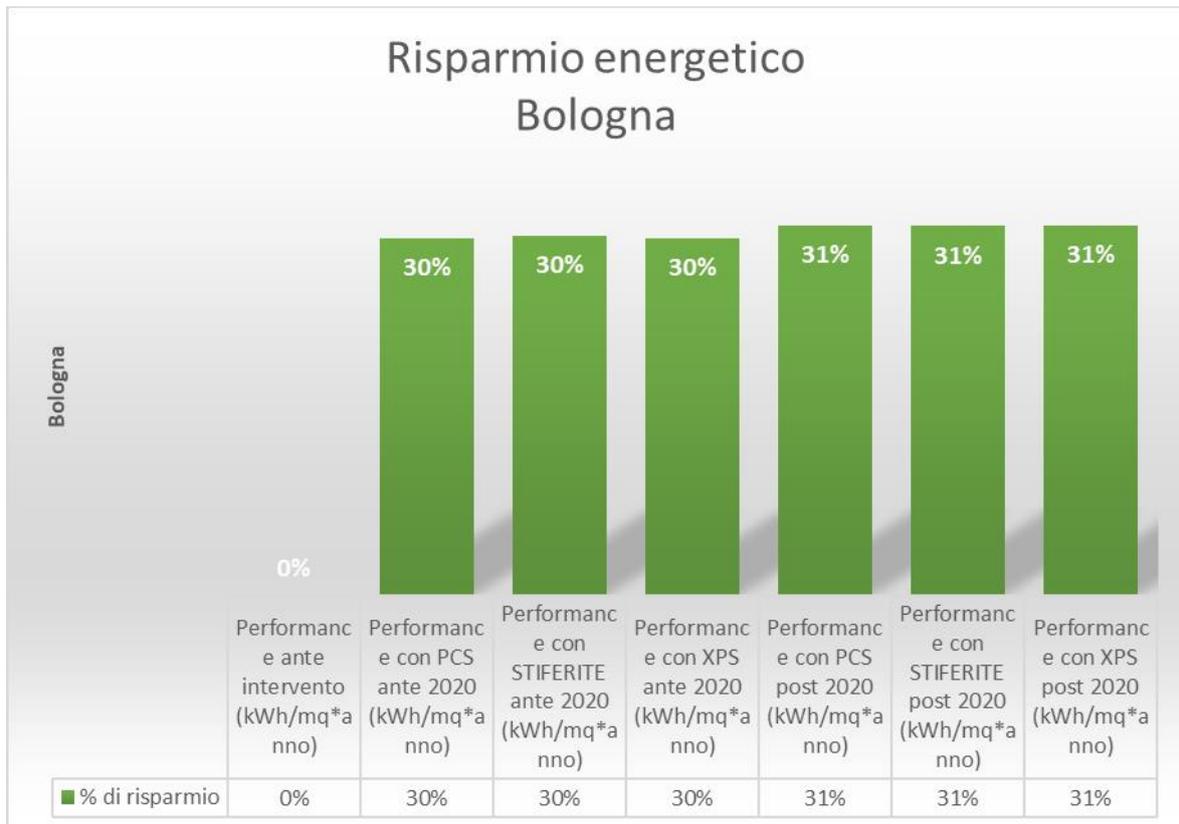


Figura 22: Risparmio energetico in percentuale per tutte le configurazioni ex ante ed ex post per la città di Bologna

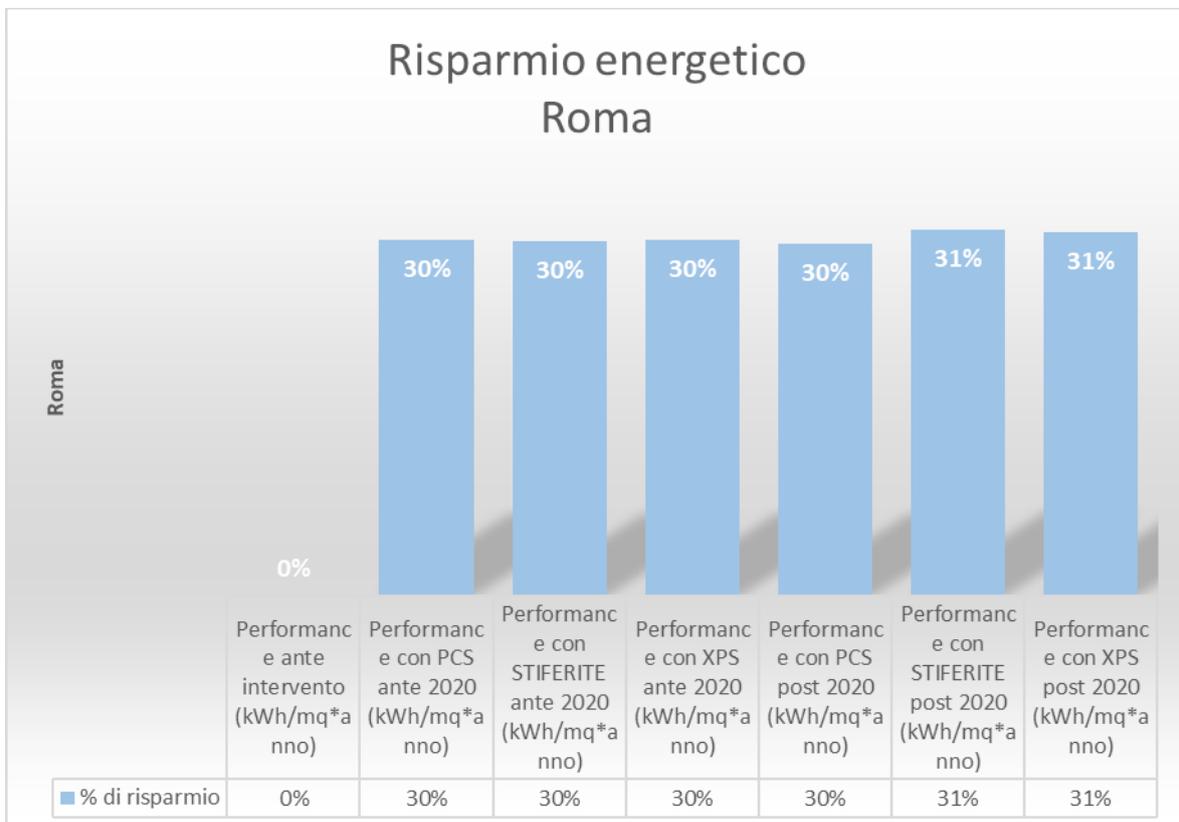


Figura 23: Risparmio energetico in percentuale per tutte le configurazioni ex ante ed ex post per la città di Roma

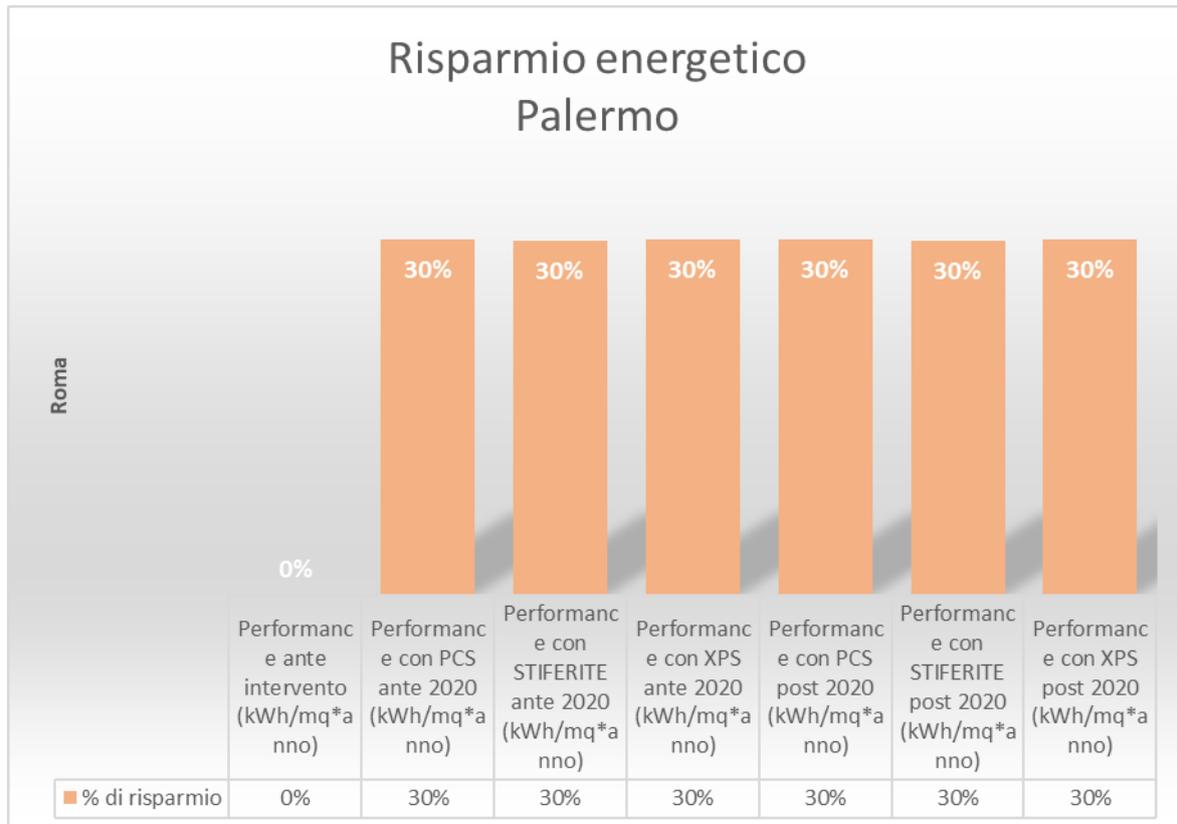


Figura 24: Risparmio energetico in percentuale per tutte le configurazioni ex ante ed ex post per la città di Roma

Si precisa che le città sono state scelte in modo tale da rappresentare l'intero territorio nazionale dal punto di vista climatico:

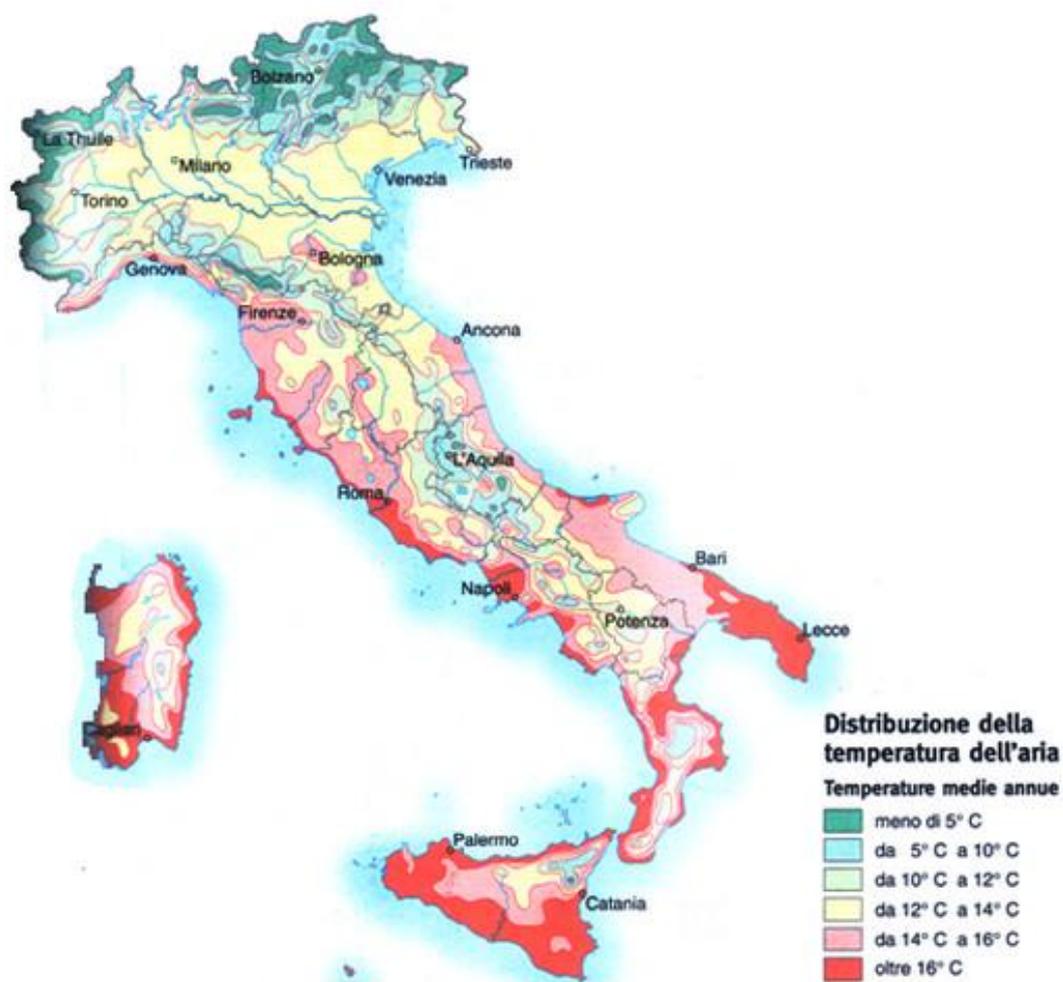


Figura 25: Distribuzione delle temperature medie annuali sul territorio italiano. (Rif. meteobook.it)

Si riportano di seguito i grafici cumulativi di tutte le simulazioni effettuate per le 21 città scelte a rappresentatività dell'intero territorio italiano.

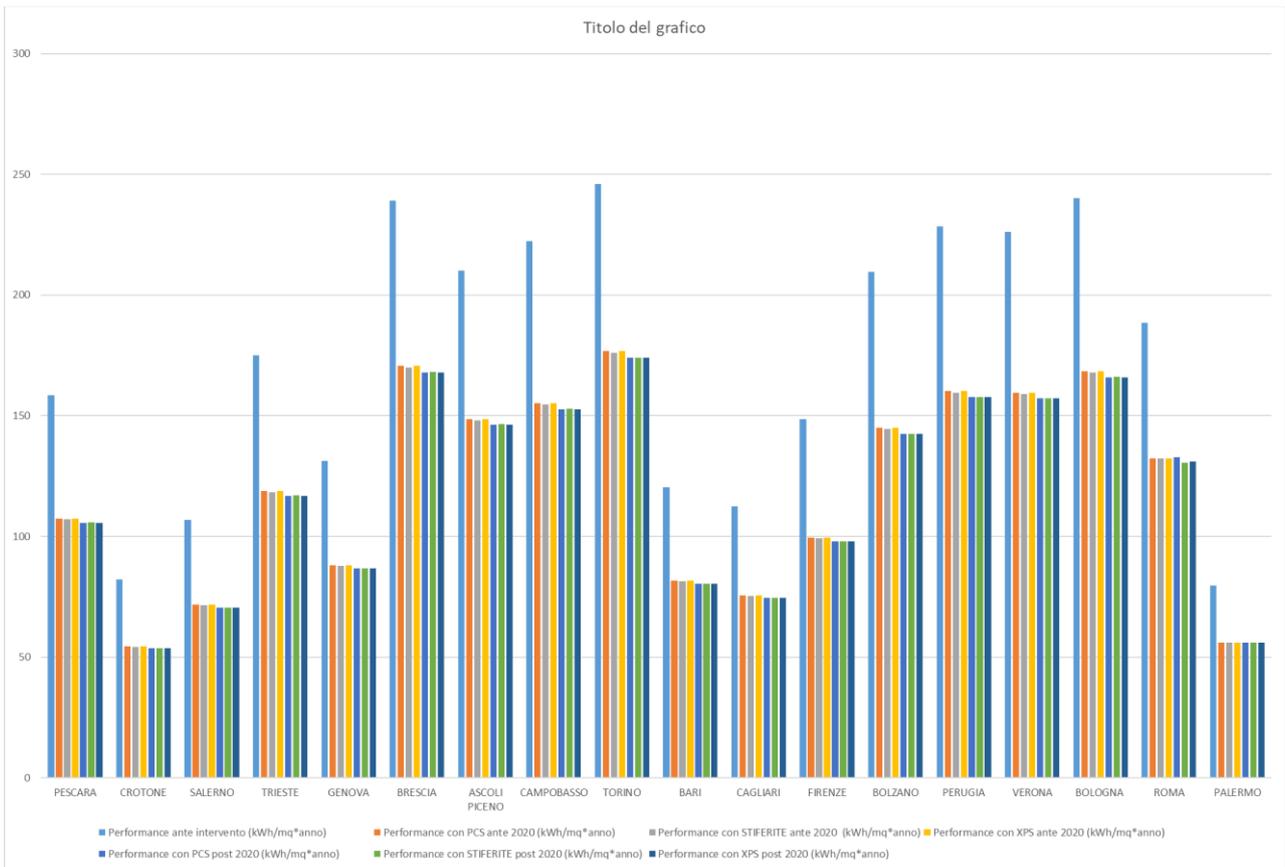


Figura 26: Grafico cumulativo delle simulazioni effettuate per il calcolo delle performances energetiche per le 21 città scelte in tutte le configurazioni ex ante ed ex post

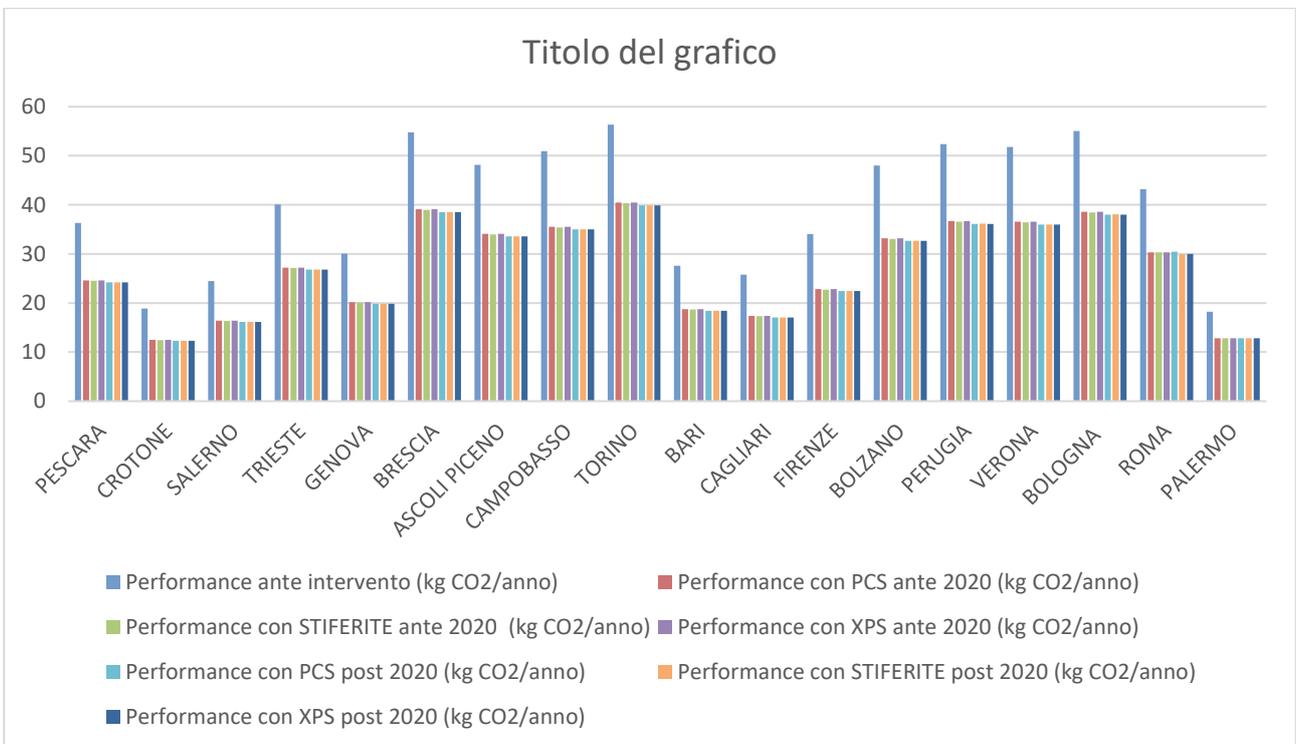


Figura 27: Grafico cumulativo delle simulazioni effettuate per il calcolo della CO₂ per le 21 città scelte in tutte le configurazioni ex ante ed ex post

Le simulazioni effettuate ci permettono di dire che anche con l'utilizzo di software che lavorano in regime semi-stazionario, è possibile effettuare analisi energetiche che consentano confronti ex ante/ex post per la valutazione dei risparmi energetici conseguiti. Gli stessi risparmi possono poi essere disaggregati in funzione dei diversi servizi per l'eventuale calcolo di indici specifici eventualmente applicando la modalità *Tailored Grafico cumulativo* delle simulazioni effettuate per il calcolo delle performances energetiche per le 21 città scelte in tutte le configurazioni ex ante ed ex post (modalità A3 adattata all'utenza) prevista dalla norma UNI 11300. Questa tipologia di calcolo supporta i professionisti a valutare i risparmi conseguiti ed a valutare la possibilità di accesso a meccanismi incentivanti o detrazioni fiscali legate alla riqualificazione energetica degli edifici. Tali modalità consentono anche un calcolo approfondito dei tempi di ritorno dell'investimento e, quindi, la valutazione di tutti gli indicatori economici che esprimono un chiaro quadro della fattibilità dell'intervento quali, ad esempio, VAN, TIR, TRs, Tra, VAN/I.

2.3 Simulazioni dinamiche

Le simulazioni dinamiche sono state svolte utilizzando il modello realizzato in ambiente Designbuilder/Energyplus, con riferimento a un edificio ricorrente. Le caratteristiche dell'edificio e del modello sono riassunte in Sezione **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, mentre per una descrizione completa e dettagliata della procedura di identificazione dell'edificio ricorrente, delle sue caratteristiche costruttive e delle scelte modellistiche effettuate si invita il lettore a fare riferimento al Report legato alle attività ENEA di Ricerca di Sistema per l'annualità 2019.

Il modello Energyplus dell'edificio ricorrente è stato simulato nelle sue condizioni pre-ristrutturazione, e in presenza degli interventi di ristrutturazione previsti dal catalogo delle soluzioni, identificate nelle attività ENEA di Ricerca di Sistema del 2020, e disponibili nel Report della prima annualità. Anche in questo caso uno schema riassuntivo del catalogo delle soluzioni, e quindi dell'insieme delle simulazioni effettuate è fornito in Sezione **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, mentre si suggerisce al lettore interessato ad una descrizione di dettaglio delle soluzioni a catalogo a fare riferimento al Report sopra menzionato.

Le simulazioni sono effettuate con riferimento alle condizioni climatiche di 21 città italiane, scelte in base alla disponibilità dei rispettivi file climatici, necessari per le simulazioni in ambiente Energyplus.

In aggiunta all'analisi puramente quantitativa effettuata per le 21 località sopra menzionate, sono state scelte tre diverse città italiane, considerate come rappresentative di tre condizioni climatiche distinte e a tre latitudini differenti:

- Bologna (zona climatica invernale E, zona climatica estiva E) per rappresentare le latitudini settentrionali.
- Roma (zona climatica invernale D, zona climatica estiva E) per rappresentare le latitudini centrali.
- Palermo (zona climatica invernale B, zona climatica estiva F) per rappresentare le latitudini meridionali.

Per queste località sono state effettuate delle analisi più approfondite, anche a livello qualitativo, volte a verificare con maggiore dettaglio quanto accada all'interno dell'edificio in presenza degli interventi di efficienza energetica proposti in questo progetto, ovvero la **riqualificazione dell'involucro** (a parte la copertura) e la **sostituzione degli impianti**.

Il numero di soluzioni testate dipende dalla zona climatica invernale, in quanto questa influenza la scelta della componente impiantistica della soluzione. Essendo in tutti i casi anche inclusa la condizione senza alcun intervento sull'impianto, questo si è tradotto in un totale di 2408 scenari (e, di conseguenza, simulazioni).

Per ciascuno scenario, verranno valutati i seguenti indicatori di prestazione (KPI):

- Consumi di gas naturale per riscaldamento [kWh, TEP, €]
- Consumi di elettricità per riscaldamento [kWh, TEP, €]

- Consumi di elettricità per il raffrescamento estivo [kWh, TEP, €]
- Consumi totali [TEP, €]
- Frazione elettrica dei consumi per HVC [-]¹

2.3.1 Elenco completo delle simulazioni effettuate.

Per l'edificio di riferimento, si è scelto di simulare anch'esso nelle varie località utilizzando lo stesso modello EnergyPlus. Per ottenere le prestazioni richieste dalla normativa di riferimento [CIT], è stato inserito nella parete originale uno strato di isolante dello spessore necessario al raggiungimento del valore minimo.

I valori calcolati sono presentati in Tabella:

Zona Climatica Invernale	Trasmittanza massima [W/m ² K]			Spessore isolante [cm]		
	Pareti esterne	Copertura	Basamento	Pareti esterne	Copertura	Basamento
B	0.43	0.35	0.44	4.7	7.0	5.7
C	0.34	0.33	0.38	6.7	7.6	6.8
D	0.29	0.26	0.29	8.3	10.2	9.5
E	0.26	0.22	0.26	9.6	12.4	10.7

2.3.2 Analisi dei risultati per diverse tipologie di soluzione per l'involucro

Le analisi presentate in questa sezione vanno a valutare l'impatto delle differenti soluzioni per l'isolamento dell'involucro edilizio.

I risultati riportati in Fig. 28 - 32 sono riferiti al caso in cui non vi siano modifiche all'impianto di riscaldamento dell'edificio (quindi, ad esempio, nessuna sostituzione della caldaia).

Il miglioramento in termini di riduzione dei consumi di gas naturale, prevalente nel caso di mantenimento dell'impianto convenzionale, è rappresentato in 28. Si può vedere come il risultato, in termini di riduzione percentuale, sia analogo per tutte le soluzioni presentate in tutte le zone termiche, confermando quindi la bontà del lavoro di definizione delle soluzioni standard in termini di omogeneizzazione. Anche il risultato numerico è ragguardevole: i consumi di gas naturale vengono ridotti, in tutti i casi, dal 30% fino quasi al 50%, ove parte della variabilità è da attribuire alle condizioni climatiche specifiche all'interno di ciascuna zona climatica, e parte all'effetto della sostituzione delle finestre (i risultati mostrano sia le simulazioni con infissi "vecchi", che in presenza di intervento di sostituzione degli infissi).

Come lecito attendersi, vista la prevalenza del vettore gas naturale per i consumi energetici degli edifici, l'effetto sulle emissioni (presentato in 29) e quello sui costi energetici (Figura 300) sono analoghi a quanto mostrato nel caso dei consumi di gas naturale. La principale differenza si può vedere nella maggiore differenziazione dei risultati tra le varie zone climatiche, soprattutto nel caso dei costi: nelle zone climatiche caratterizzate dagli inverni più miti il consumo energetico (e quindi le emissioni e i costi associati) per il raffrescamento estivo è maggiore, e quest'ultimo è influenzato in misura inferiore dall'intervento di isolamento dell'involucro, come visibile in 31: in questo caso, infatti, la riduzione dei consumi stimata varia tra lo 0% e il 20%, con valori medi più vicini al 10% soprattutto per le zone climatiche più fredde.

In ultima analisi, si è voluta valutare anche l'influenza della scelta della tipologia di soluzione standardizzata a cappotto sul numero di classi energetiche guadagnate dall'edificio, vista anche la rilevanza di questa misura per l'accesso a meccanismi incentivanti. Come si può vedere in 32, a seconda del caso specifico, si stima che sia possibile guadagnare fino a due classi energetiche con il solo isolamento dell'involucro (ed eventualmente sostituzione degli infissi). Anche in questo caso i risultati risultano scarsamente influenzati dalla scelta del sistema a cappotto, mentre si può osservare una marginale influenza della zona termica: in particolare, la zona termica D appare quella in cui sia più probabile il verificarsi dell'incremento di due classi senza dover ricorrere ad altre soluzioni di efficientamento energetico.

¹ Questo indicatore vuole essere una stima di quale parte dei consumi possono essere teoricamente coperti da fonti rinnovabili, ipotizzando che questo possa avvenire solo per la componente elettrica dei consumi.

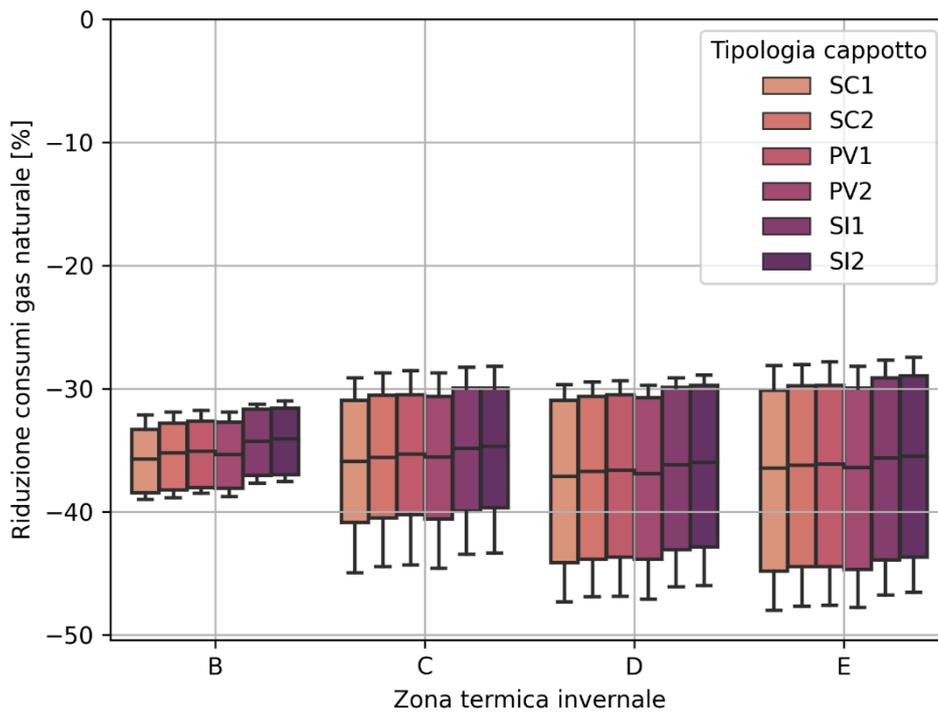


Figura 28: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi alla riduzione dei consumi di gas naturale per il riscaldamento

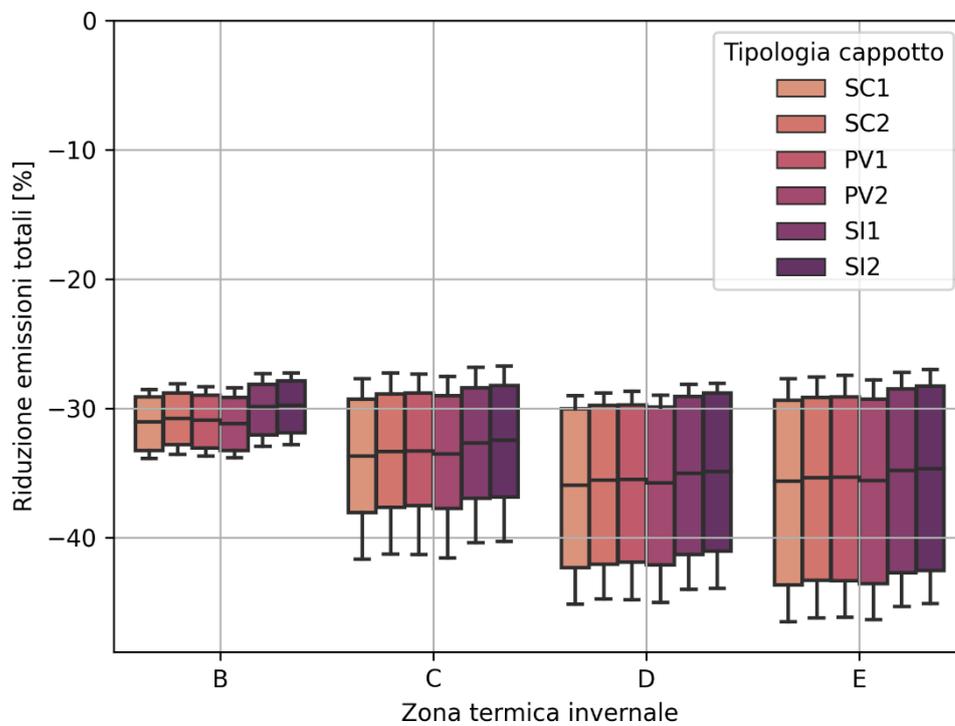


Figura 29: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi alla riduzione delle emissioni totali

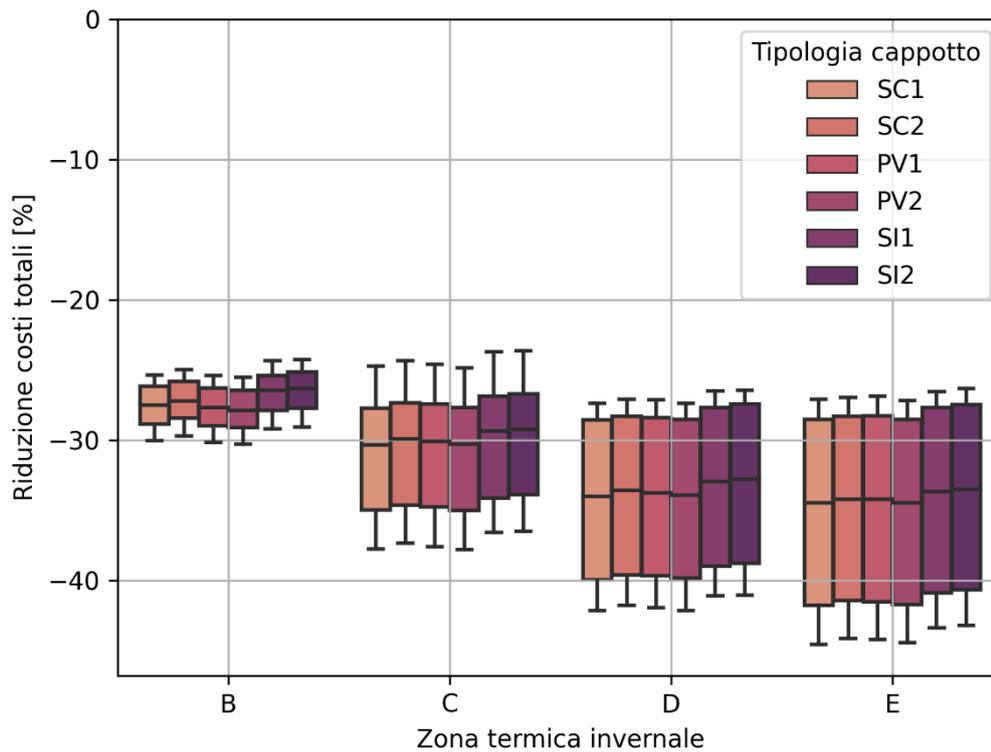


Figura 30: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi alla riduzione dei costi operativi totali (elettricità e gas naturale)

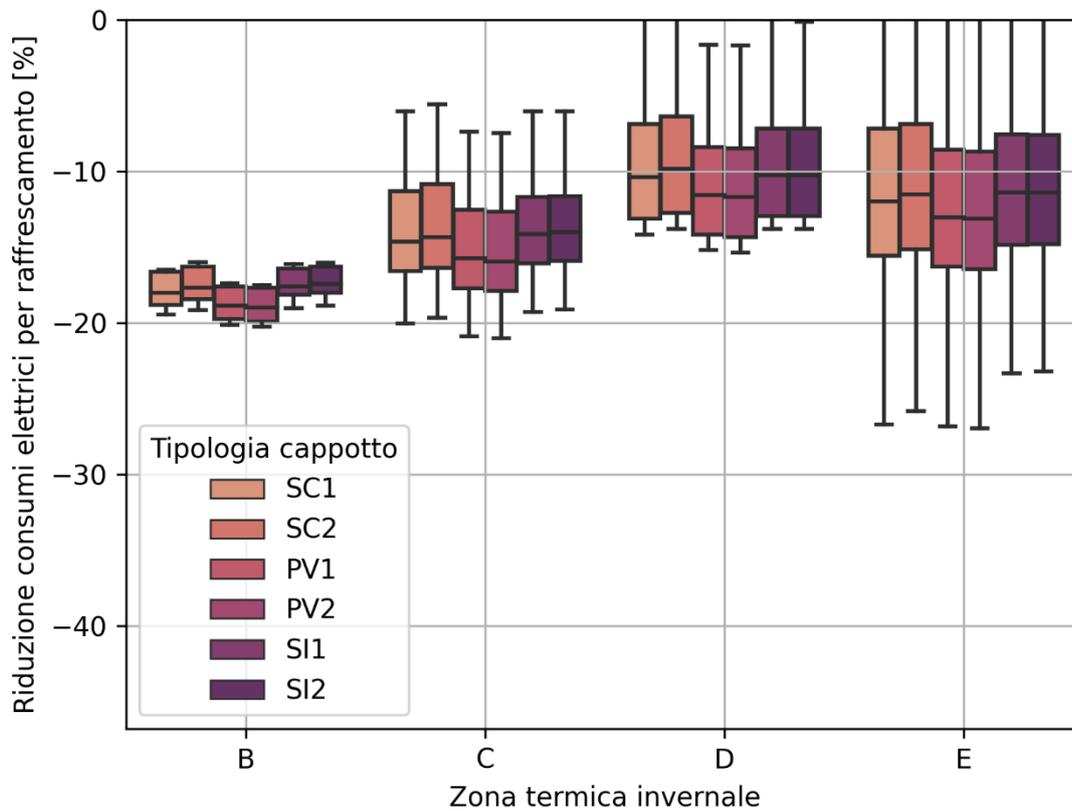


Figura 31: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi alla riduzione dei consumi elettricità per il riscaldamento

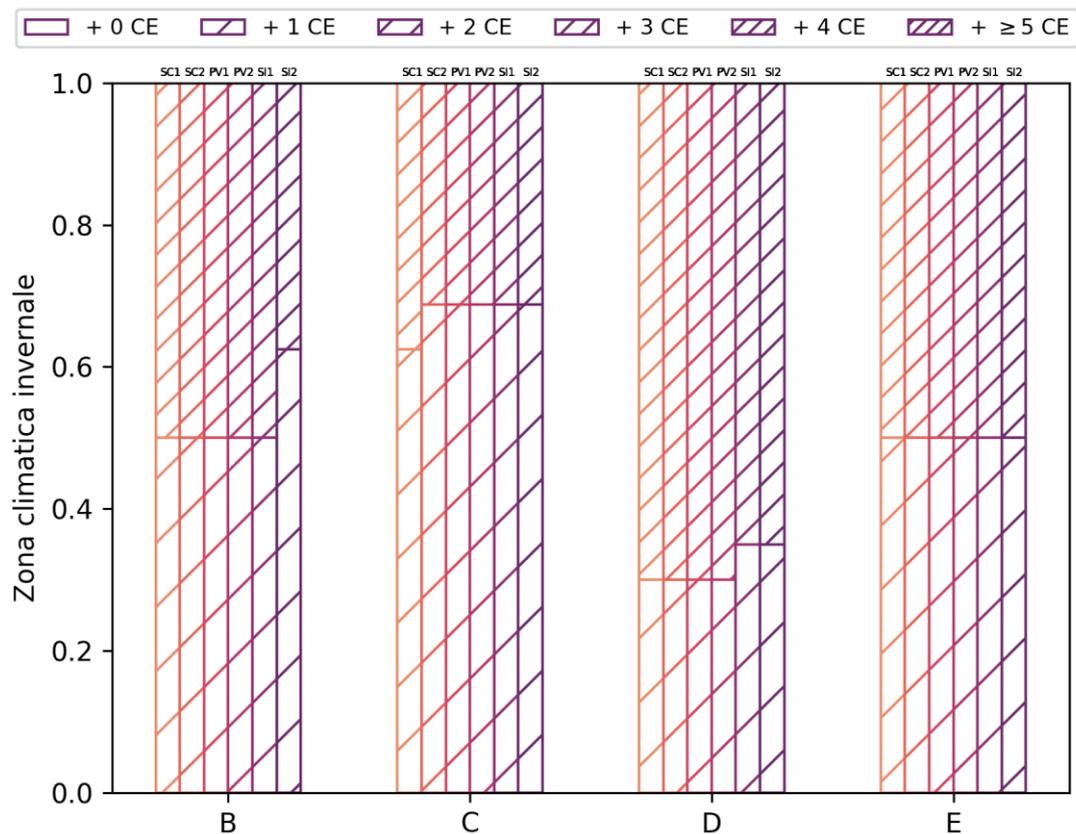


Figura 32: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi al calcolo del numero di classi energetiche guadagnate

Le stesse analisi sopra riportate sono state effettuate per il caso di sostituzione della caldaia (impianto I1) con una nuova con tecnologia a condensazione. Si riportano per semplicità la rappresentazione della riduzione dei consumi di gas naturale (Fig. 33) e del numero di classi guadagnate (Fig. 34). Si può notare come, in questo caso, la combinazione dei due interventi porti a un calo ancor più drastico dei consumi di gas naturale, che a seconda delle condizioni climatiche e del tipo di infissi possono essere ridotti fino a oltre il 60% rispetto al caso di riferimento. Questo effetto si può riscontrare chiaramente anche andando ad osservare l'effetto sulla classe energetica dell'edificio, che incrementa da un minimo di 2 fino a un massimo 4 classi energetiche.

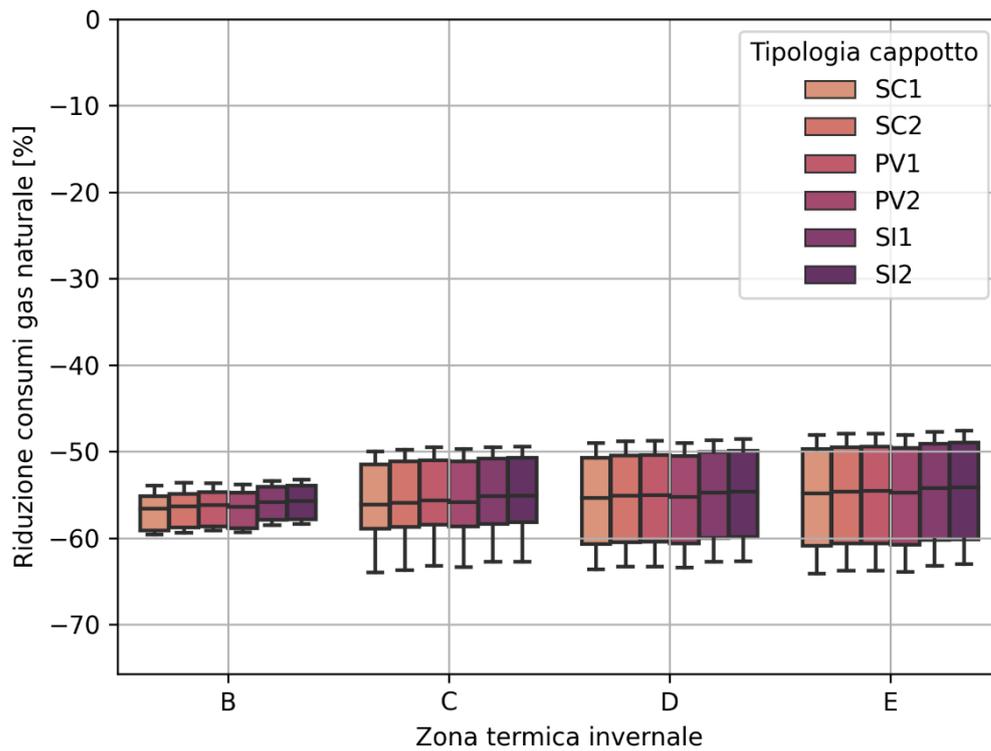


Figura 33: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi alla riduzione dei consumi di gas naturale per il riscaldamento. Impianto I1

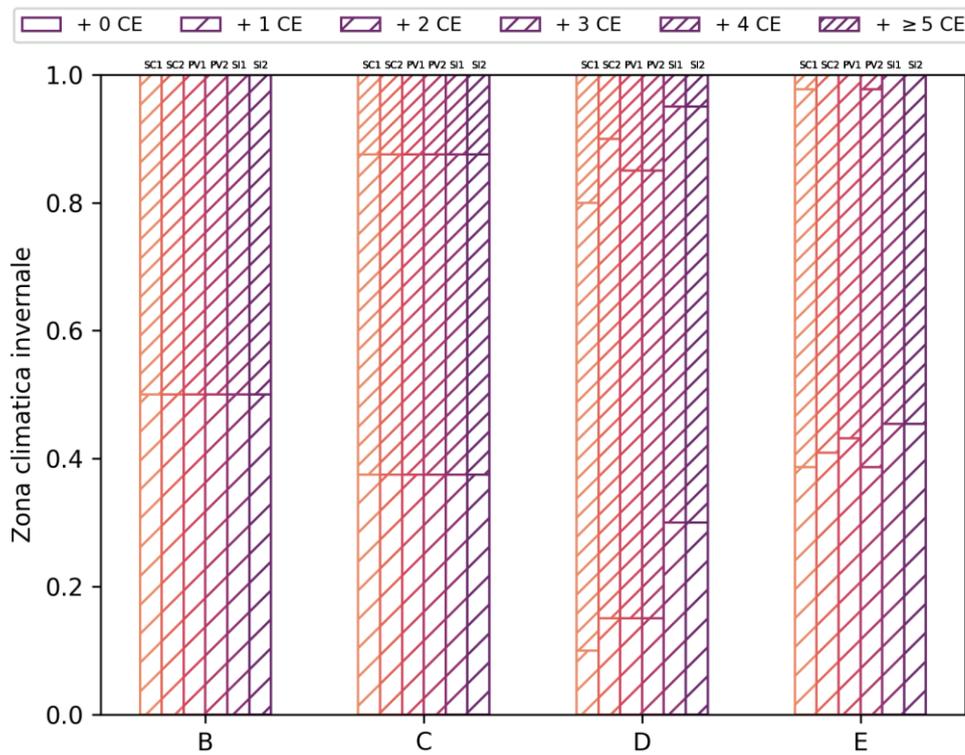


Figura 34: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di cappotto e zona termica invernale, relativi al calcolo del numero di classi energetiche guadagnate. Impianto I1

2.3.3 Analisi dei risultati per diverse tipologie di impianto

Come esplicitato nella parte introduttiva del report, lo scopo di questa linea di attività è stato anche quello di tenere in considerazione la possibilità di includere l'analisi delle potenzialità offerte dall'approfittare dell'opportunità di andare a intervenire sull'involucro edilizio per agire anche sugli impianti. Questa opportunità risulterebbe particolarmente valida nei casi di edifici di tipo condominiale sprovvisti di impianto centralizzato, o in quei casi in cui la presenza di un impianto centralizzato vecchio e inefficiente offra importanti possibilità di riqualificazione.

Si ricorda dunque la definizione, dettagliata nel report delle attività della LA 2.2 e riproposta in maniera riassuntiva in Sezione 2.1 di questo report, di un totale di sei tipologie impiantistiche, denominate da I1 a I6, a cui va aggiunto l'impianto di riferimento I0 che rappresenta le prestazioni di un impianto (centralizzato o meno) alimentato da una caldaia tradizionale. A parte gli impianti I0 e I1, tutti gli altri impianti non sono stati applicati a tutte le località, ma solo a quelle appartenenti alle zone termiche consigliate in quanto preferenziali come riportato in Tabella 2.

Vista la similarità tra loro delle prestazioni delle differenti soluzioni standardizzate per l'isolamento dell'involucro edilizio, come da definizione e come mostrato nelle simulazioni presentate in Sezione 2.3.2, si è scelto in questo caso di presentare in forma aggregata i risultati per tutte le tipologie di soluzione standardizzata. Non sono stati inclusi i casi di simulazione dell'edificio in presenza di intervento sul solo impianto, in quanto l'attività prevede la modifica dell'impianto come passaggio reso possibile dall'intervento sull'involucro.

L'impatto delle differenti tipologie di impianto, suddiviso sulle diverse zone climatiche, sui consumi di gas naturale ed elettrici è riportato rispettivamente in Figura 35 e Figura 36. I risultati per il caso base, ossia la riqualificazione dell'involucro edilizio senza alcuna azione sull'impianto, sono rappresentati nel verde più chiaro e, coerentemente con quanto presentato in Sezione 2.3.2, si trovano in un *range* indicativamente tra il 20% e il 40% di miglioramento di prestazioni rispetto all'edificio di riferimento.

Come evidenziato in precedenza, e come chiaramente mostrato in Figura 35, l'aggiunta della semplice sostituzione del generatore di calore con una caldaia a condensazione permette un ulteriore netto miglioramento dei risultati, con un calo dei consumi di gas naturale che può superare, a seconda dei casi, il 70%.

La tipologia di impianto I2, costituita dalla sostituzione dei terminali di emissione con dei ventilconvettori al posto dei normali radiatori, è consigliata (e quindi simulata) solo in zona E o F. Come lecito attendersi, in questo caso i benefici rispetto al caso dell'impianto I1 sono tutto sommato limitati, e generati dalla riduzione delle temperature di esercizio dell'impianto idrico, che permettono quindi minori dispersioni termiche ma, soprattutto, un funzionamento ad efficienza più elevata della caldaia a condensazione, le cui prestazioni sono influenzate in modo non trascurabile dalla temperatura di mandata della caldaia, con un incremento proporzionale alla riduzione di tale temperatura (che permette quindi di recuperare maggiore energia dai fumi di scarico). Il consumo elettrico aggiuntivo legato ai ventilatori dei ventilconvettori, come mostrato in Fig. 35, è trascurabile.

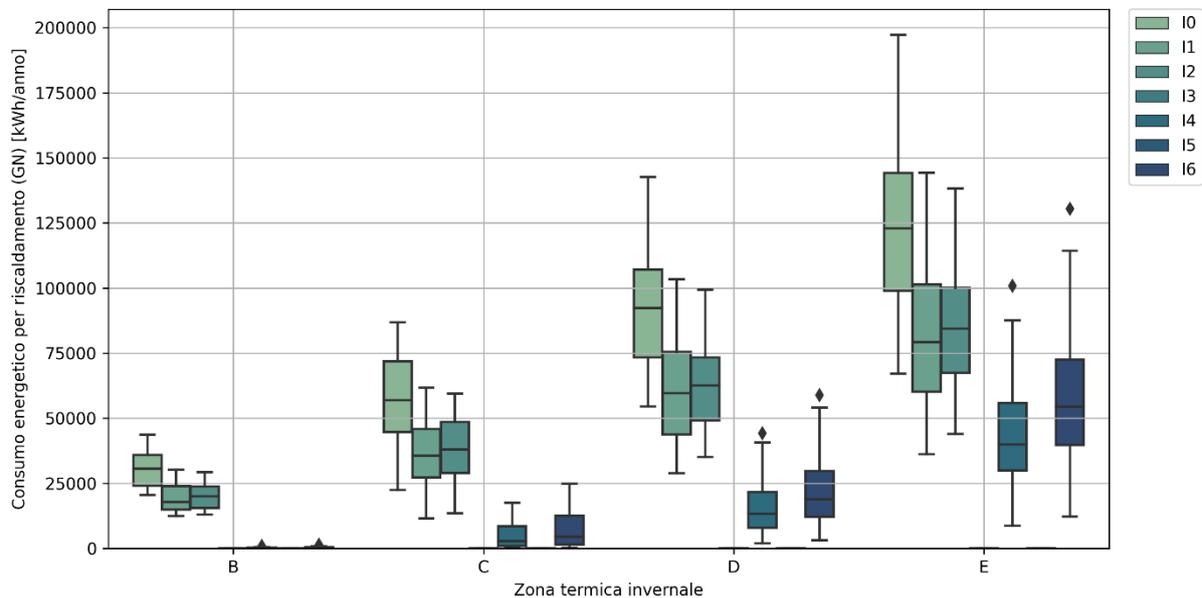


Figura 35: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi ai consumi di gas naturale per il riscaldamento.

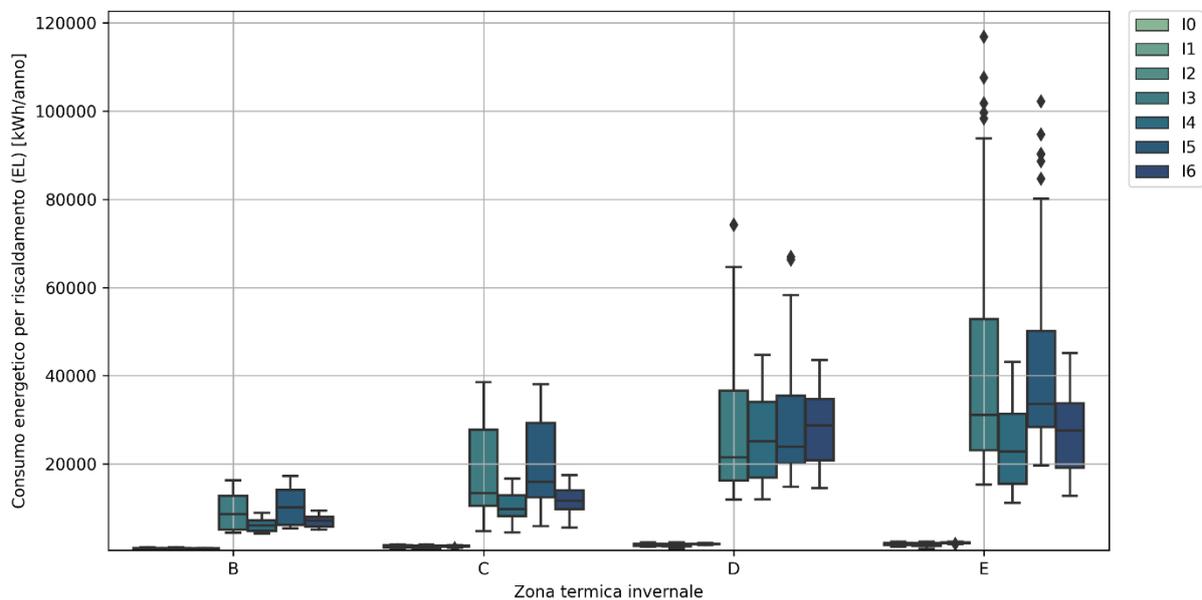


Figura 36: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi ai consumi di elettricità per il riscaldamento.

A questo proposito, al fine di confrontare le differenti tipologie di impianto che utilizzano differenti vettori energetici, è più significativo fare riferimento alle emissioni di CO₂, di fatto rappresentative anche del consumo di energia primaria, e dei costi operativi. I risultati relativi a questo tipo di analisi sono presentati da Fig. 36 a Fig. 39.

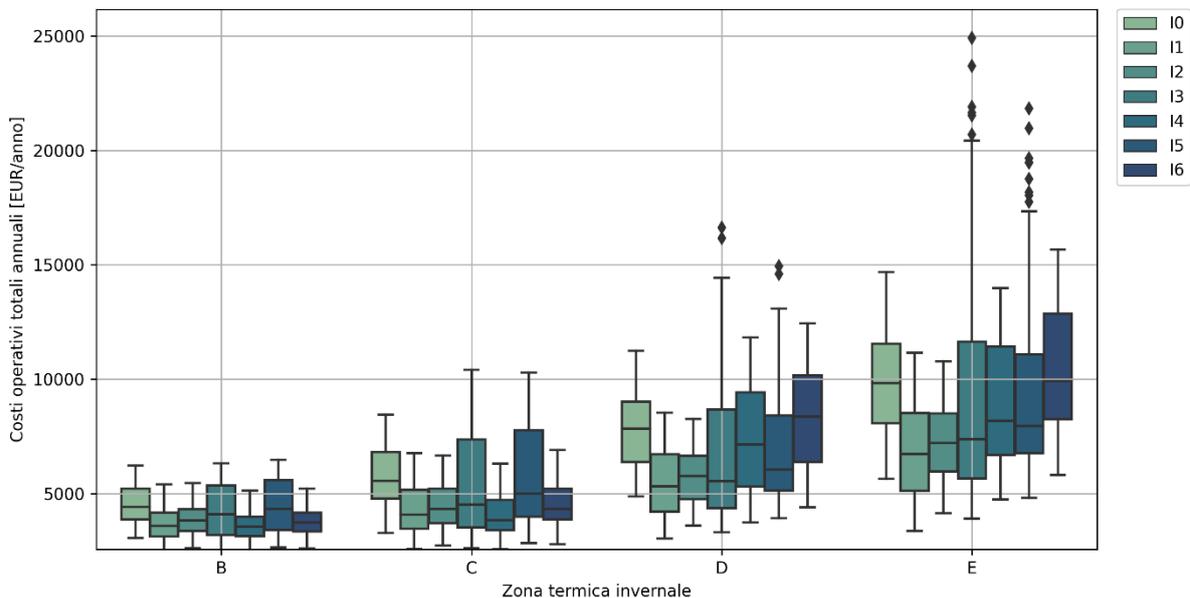


Figura 37: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi ai costi operativi annuali.

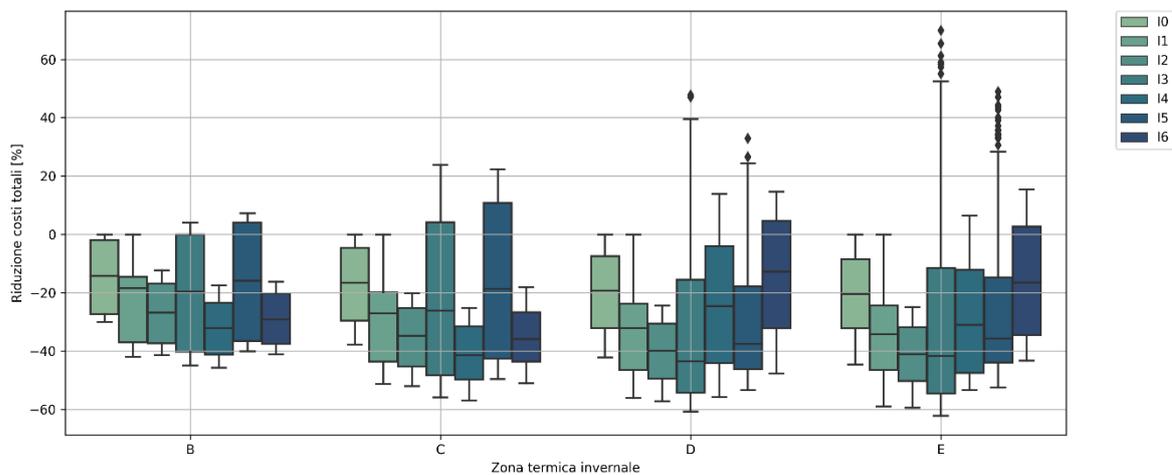


Figura 38: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi alla riduzione dei costi operativi.

I risultati relativi ai costi mostrano chiaramente l’influenza del basso costo del gas naturale per unità di energia che ha caratterizzato il mercato energetico fino a prima della pandemia, soprattutto in confronto ai prezzi del vettore energetico elettrico. In queste condizioni si può vedere come, in assenza di una generazione decentralizzata di energia rinnovabile, la scelta di passare al vettore elettrico non sia particolarmente conveniente dal punto di vista dei costi operativi: la riduzione dei consumi legata alla maggiore efficienza dell’unità di conversione dell’energia (la pompa di calore confrontata alla caldaia a gas) viene di fatto “annullata” dalla differenza di costo dei vettori energetici (il gas naturale, unità di energia, costa circa un terzo dell’elettricità). In queste condizioni si può verificare come gli impianti a pompa di calore possono, a seconda della zona climatica e delle caratteristiche specifiche geografiche, portare anche ad un incremento

dei costi rispetto al caso standard. La scelta della caldaia a condensazione, per quanto semplice, dal punto di vista dei costi operativi appare abbastanza chiaramente quella su cui è più sicuro fare affidamento.

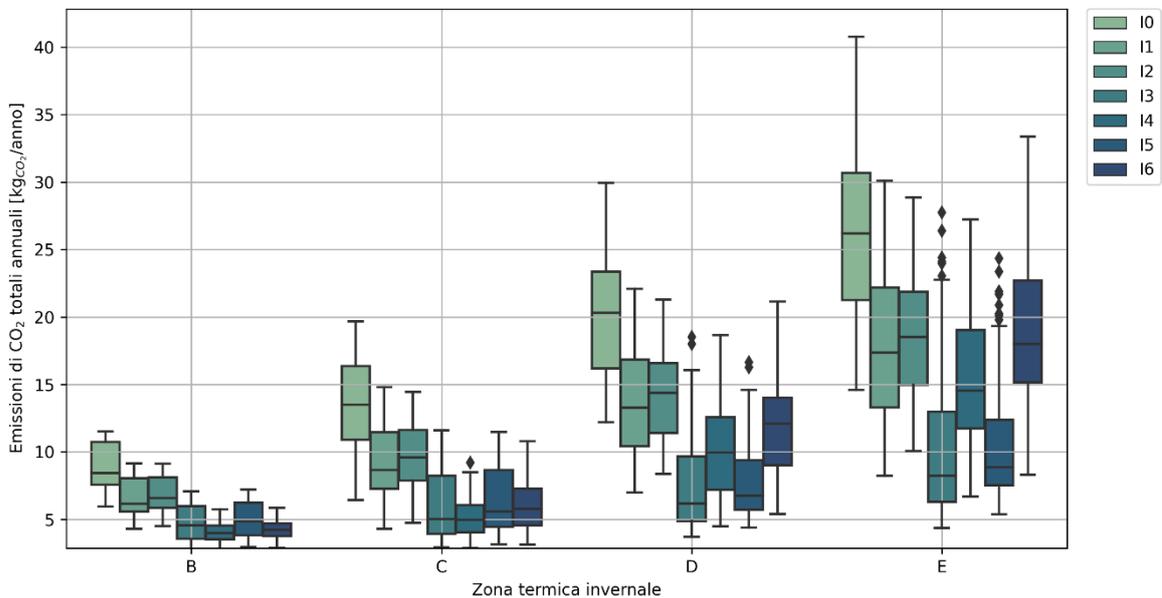


Figura 39: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi alle emissioni annuali .

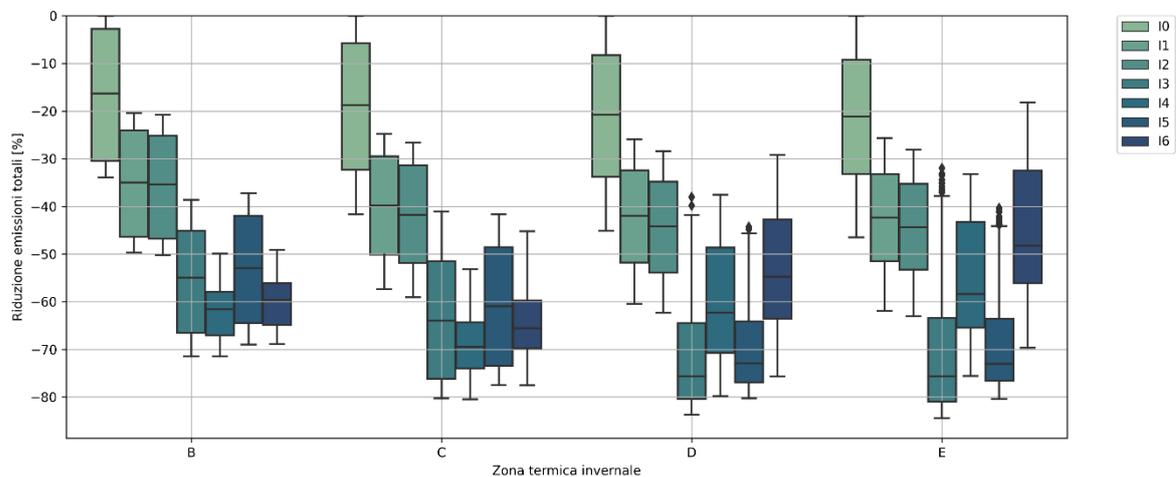


Figura 40: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi alla riduzione delle emissioni.

Dal punto di vista delle emissioni di gas serra (e, quindi, del consumo di energia primaria) la situazione cambia radicalmente, a fronte del fatto che, in questo caso, i coefficienti di conversione per i due vettori energetici sono sostanzialmente analoghi. Nel caso dell'analisi basata sulle emissioni di gas serra si può quindi notare che le quattro soluzioni impiantistiche (13, 14, 15 e 16) che includono la pompa di calore sono quelle che garantiscono riduzioni più importanti nel consumo di energia primaria e nelle emissioni. Questo è particolarmente vero nel caso dei climi più temperati, dove la pompa di calore può funzionare in condizioni più prossime a quelle ottimali: questo ha un beneficio positivo sul COP della pompa di calore, e nel caso degli

impianti ibridi tende a spostare una maggiore frazione delle ore di funzionamento dalla caldaia alla pompa di calore.

Si vuole fare notare, per quel che riguarda l'analisi dei risultati delle simulazioni incentrate sulla parte impiantistica dell'intervento, che nel caso delle zone climatiche più rigide (D ed E) i risultati per gli impianti unicamente basati sulle pompe di calore possono essere in qualche modo "falsati", soprattutto nel confronto con gli impianti ibridi, dal fatto che nel caso di questi ultimi si è imposto un limite di funzionamento della pompa di calore a 5°C di temperatura esterna, al di sotto della quale si attiva invece la caldaia. Questo accorgimento è pensato per evitare fenomeni di congelamento della condensa in prossimità dell'unità esterna della pompa di calore, cosa che invece non viene in alcun modo evitata nel caso degli impianti I3 e I5, la cui fattibilità può quindi essere messa in discussione (e, per questo, non sono stati consigliati per le zone climatiche più fredde).

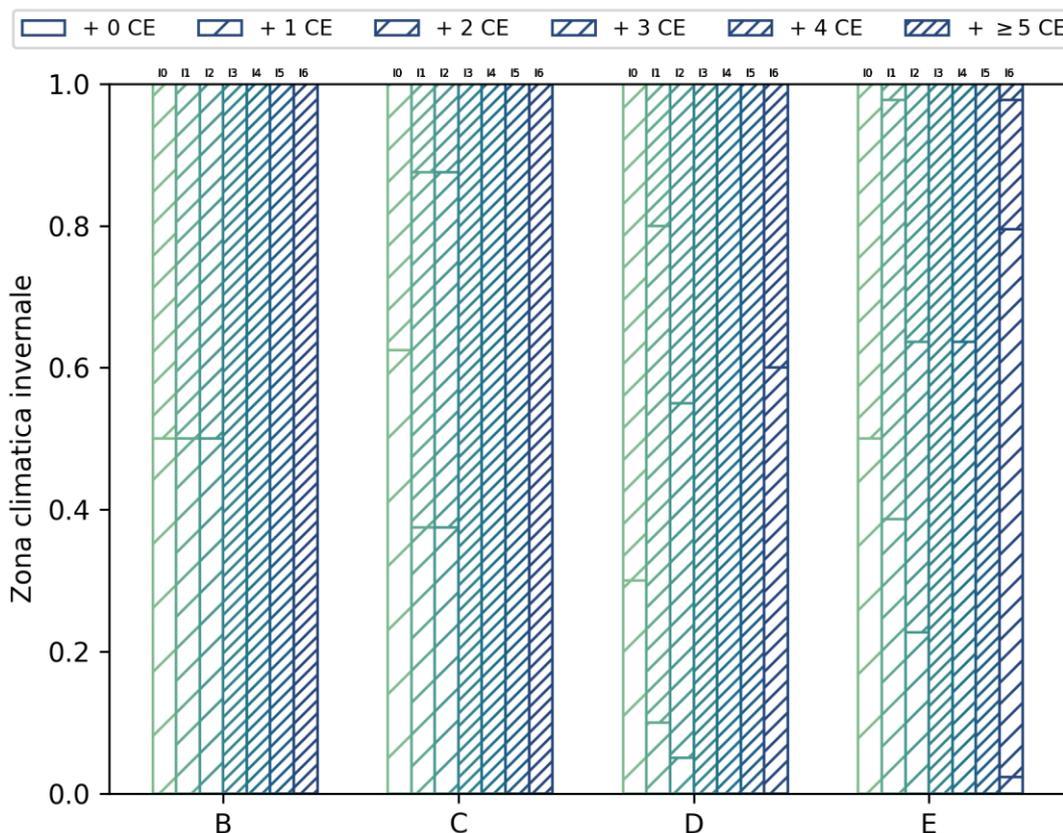


Figura 41: Risultati delle simulazioni dinamiche, aggregati per tipologia di impianto e zona termica invernale, relativi al calcolo del numero di classi energetiche guadagnate.

In Fig. 41 sono invece rappresentate, analogamente a quanto mostrato per le soluzioni di isolamento dell'involucro, le statistiche relative ai salti di classe che si possono effettuare per tipologia di impianto. La figura mostra chiaramente come andare ad agire anche sull'impianto possa portare a dei miglioramenti molto significativi della classe energetica dell'edificio, che può essere migliorata fino a 5 o più classi rispetto all'edificio di partenza.

Rispetto ai risultati mostrati nelle figure precedenti, si vuole porre inoltre l'attenzione su di una serie di aspetti che, pur non essendo esplicitamente rappresentati quantitativamente nei grafici possono comunque essere presi in considerazione nelle valutazioni legate alla scelta dell'impianto:

- La scelta di impianti basati, interamente o in parte sulle pompe di calore (I3-I6) contribuisce al processo di elettrificazione dei consumi, che costituisce già da oggi una priorità nell'ottica della

transizione energetica in atto, che prevede un passaggio sempre più spinto alle fonti rinnovabili elettriche (principalmente fotovoltaico ed eolico). Questo aspetto rende quindi questi impianti, a parità di altre condizioni, preferibili rispetto a quelli basati invece sull'utilizzo del gas naturale

- La scelta di impianti basati, interamente o in parte sulle pompe di calore (I3-I6) può essere propedeutica al passaggio a un sistema di raffrescamento centralizzato. Questo aspetto non è stato esplicitamente preso in conto in questo studio, ma i benefici in termini di costi di gestione, manutenzione che si verificano nel passaggio dall'impianto autonomo a quello centralizzato sono estendibili anche al caso dell'impianto di raffrescamento. Si vuole fare notare, a questo proposito, come questo possa avere anche un impatto importante dal punto di vista dell'aspetto esteriore dell'edificio, vista la generale scarsa qualità estetica delle unità esterne dei condizionatori individuali.
- La scelta di impianti basati, interamente o in parte sulle pompe di calore (I3-I6) può essere associata con successo all'installazione di impianti fotovoltaici, andando a contribuire alla massimizzazione dell'autoconsumo, e andando quindi a migliorarne le prestazioni economiche.
- Lo studio non ha tenuto in conto dei costi di installazione delle differenti tecnologie, che generalmente tendono a favorire le caldaie rispetto alle pompe di calore. Viste le prestazioni simili in termini di costi operativi, questo sposta a maggior ragione l'equilibrio verso la scelta delle caldaie dal punto di vista dei costi totali, il che (come presentato sia nei risultati che nelle considerazioni qui sopra) ha purtroppo un effetto negativo invece sull'aspetto ambientale.

SEZIONE II – DIMOSTRATORE

Lo scopo dell'attività è quello di monitorare un dimostratore reale che consenta di verificare in opera quanto modellato in termini di efficacia del sistema di isolamento, efficacia dei sistemi di aggancio, tempi di realizzazione e valutazione degli eventuali extra-costi rispetto alle soluzioni di tipo "tradizionale".

E' stata, inoltre, svolta una verifica in merito alla propensione dei fruitori all'utilizzo di tecnologie innovative in campo edilizio che aiutino, da un lato a migliorare le performances energetiche, e dall'altro ad innovare il settore edile dando una spinta all'ottimizzazione dei tempi e alla razionalizzazione del processo produttivo.

3 Descrizione delle attività svolte e risultati

3.1 Scelta dell'edificio

La scelta dell'edificio pilota non era stata definita in maniera puntuale in fase di scrittura del progetto. A causa dell'emergenza pandemica, numerosi sono stati gli ostacoli che sono nati e che hanno creato difficoltà nella scelta del luogo adatto.

Un ulteriore problematica che ha creato non poche difficoltà è stata quella legata al reperimento dei materiali: il 2021 è stato un anno particolarmente disagiato da questo punto di vista a causa del sommarsi di diverse situazioni (CoViD, aumento dei prezzi dei materiali, difficoltà nel reperimento delle materie prime e impennata di richiesta di materiali per l'edilizia legato alla possibilità di accedere a meccanismi incentivanti molto appetibili per il mercato.

Dopo le prime difficoltà, grazie alla ampia rete di partner aziendali di cui ENEA può avvalersi, è stato possibile trovare una soluzione che rispettasse le richieste progettuali e che al tempo stesso consentisse di superare o, comunque, aggirare, le difficoltà sopra esposte. Col supporto dell'azienda FLORIM è stato possibile utilizzare come dimostratore un edificio su cui l'azienda ha agito con un intervento di miglioramento energetico. L'azienda si è prestata, mettendo a disposizione una delle facciate sulla quale effettuare le misure, i rilievi e le controlli finalizzate alle verifiche previste dal progetto. Questa soluzione ci ha, inoltre, permesso di effettuare le verifiche su una delle soluzioni già testate durante la seconda annualità sulle tavole vibranti (su un pilot in scala ridotta presso il C.R. ENEA di Casaccia. Vedi Report ENEA WP2 2020) , permettendo in tal modo un continuum sulle prove già effettuate.

L'edificio dimostratore, anzitutto, doveva rispettare le caratteristiche dell'edificio ricorrente e, quindi, essere, se non identico, ma simile ad un edificio con le seguenti caratteristiche:

1. struttura intelaiata in calcestruzzo armato con tamponamenti in laterizi forati, di cui si comincia a definire una grande varietà di tipologie, funzione dell'indice di foratura e della fornace di produzione;
2. l'edificio, privo di piano cantinato, si sviluppa per sei elevazioni ed è dotato di un solo corpo scala, a servizio di tre unità immobiliari per piano (incluso quello terraneo);
3. ciascuna unità immobiliare ha una superficie utile di 90 m², intermedia fra i valori estremi che definiscono la classe di superficie 80÷99 m²;
4. il corpo scala-ascensore e il disimpegno d'accesso agli appartamenti hanno un'area di sedime complessiva di 30 m²;
5. la superficie lorda di piano è pari a 1,2 volte la superficie netta, cioè 360 m²;
6. l'edificio è profondo 12 m (di conseguenza la larghezza è pari a 30 m);
7. l'altezza netta di piano è pari a 2,70 m, valore minimo dell'altezza interna dei locali d'abitazione stabilito con D.M. del 5 luglio 1975;
8. lo spessore dei solai di piano è pari a 30 cm al finito (in tal modo l'interpiano risulta pari a 3 m);
9. la copertura è piana;
10. la superficie degli infissi non è inferiore a 1/8 della superficie di pavimento, come stabilito nell'articolo 5 del D.M. del 5 luglio 1975 in merito alla superficie finestrata apribile.

La facciata scelta ha un'esposizione a Nord col fine di valutare le prestazioni nella situazione meno prestante durante il periodo di riscaldamento.

La realizzazione del dimostratore ha previsto una serie di indagini e progettazione preliminari per verificare il rispetto dei parametri richiesti dal progetto. Insieme all'ufficio tecnico e progettazione di Florim sono state definite le caratteristiche della facciata, è stato individuato il cantiere del dimostratore ed è stato definito un cronoprogramma delle azioni da compiere. Sono stati definiti disegni e particolari costruttivi e sono state analizzate le fasi di lavorazione per capire quali passi sono previsti dall'apertura del cantiere alla posa finale della facciata. Ciò al fine di definire in maniera precisa le modalità ed i tempi di monitoraggio.

Le caratteristiche principali del dimostratore sono quelle di seguito riportate:

Località	Bologna
Sistema	Facciata isolata con struttura in profili estrusi in alluminio
Finitura	Gres in lastre da 60 x 120 cm
Isolante	12 cm con $\lambda = 0.032 \text{ W/m}^2\text{K}$
Dimensione totale intervento	1300 m ²
Dimensione intervento dimostratore	221 m ²

Figura 42: Caratteristiche principali del dimostratore

Sull'edificio sono stati eseguiti interventi di efficientamento energetico su 4 facciate per complessivi 1300 m², ma per il dimostratore è stata presa in considerazione soltanto la facciata Nord per complessivi 221 m².

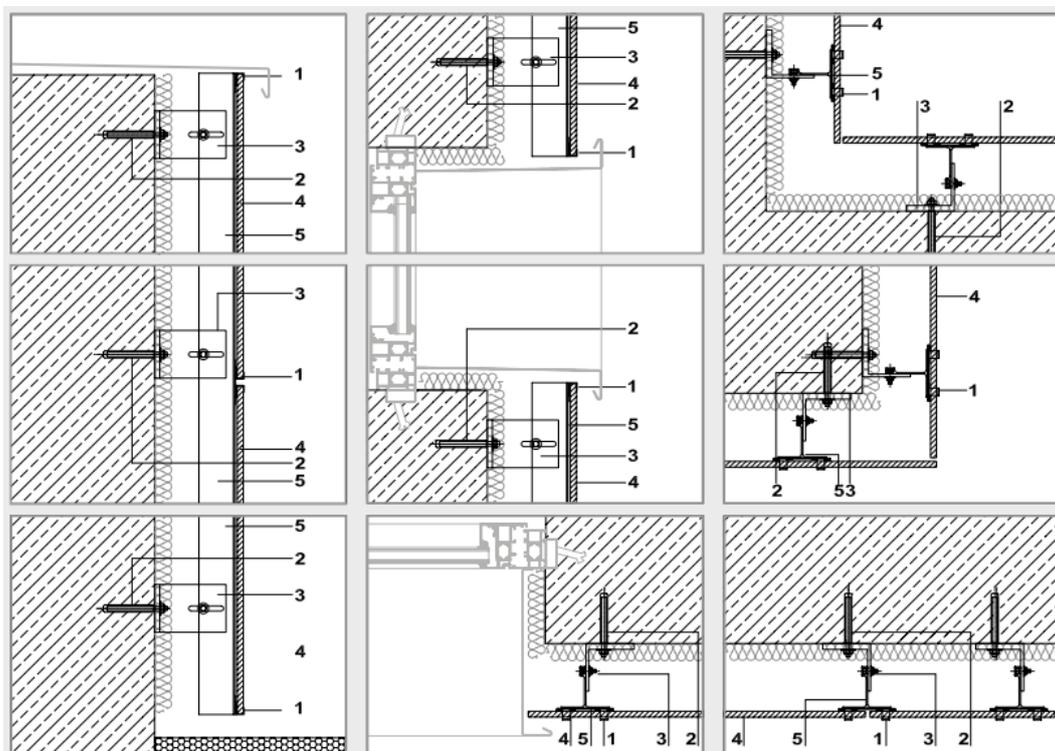


Figura 43: Sistemi di aggancio alla struttura

Trattandosi di un edificio “ricorrente” sul territorio nazionale (edificio dimostratore realizzato nel 1956), è stato possibile trovare tali condizioni. Sull’edificio è stata realizzata una struttura modulare prefabbricata con caratteristiche e requisiti finali di isolamento termico corrispondenti ad una delle soluzioni indicate a catalogo ed è stata equipaggiata in modo da poter effettuare verifiche strumentali, e nello specifico è stata predisposta per effettuare verifiche di vario tipo:

- Rilevazioni esterne tramite termocamera, al fine di verificare la temperatura superficiale esterna delle superfici interessate
- Rilevazioni con termoflussimetri, per la verifica delle temperature superficiali sia interne che esterne delle pareti e conseguente flusso termico
- Rilevazioni di temperatura dell’aria interna ed esterna
- Sistema di verifica dei tempi di posa
- Rilevazioni delle condizioni ambientali tramite centralina climatica

Scopo del monitoraggio è stato quello di verificare:

1. raggiungimento in opera dei livelli di isolamento desiderati
2. verifica dei tempi di posa in opera
3. verifica delle condizioni di salubrità del cantiere
4. fissaggio degli elementi

Si allegano di seguito alcune immagini del dimostratore:



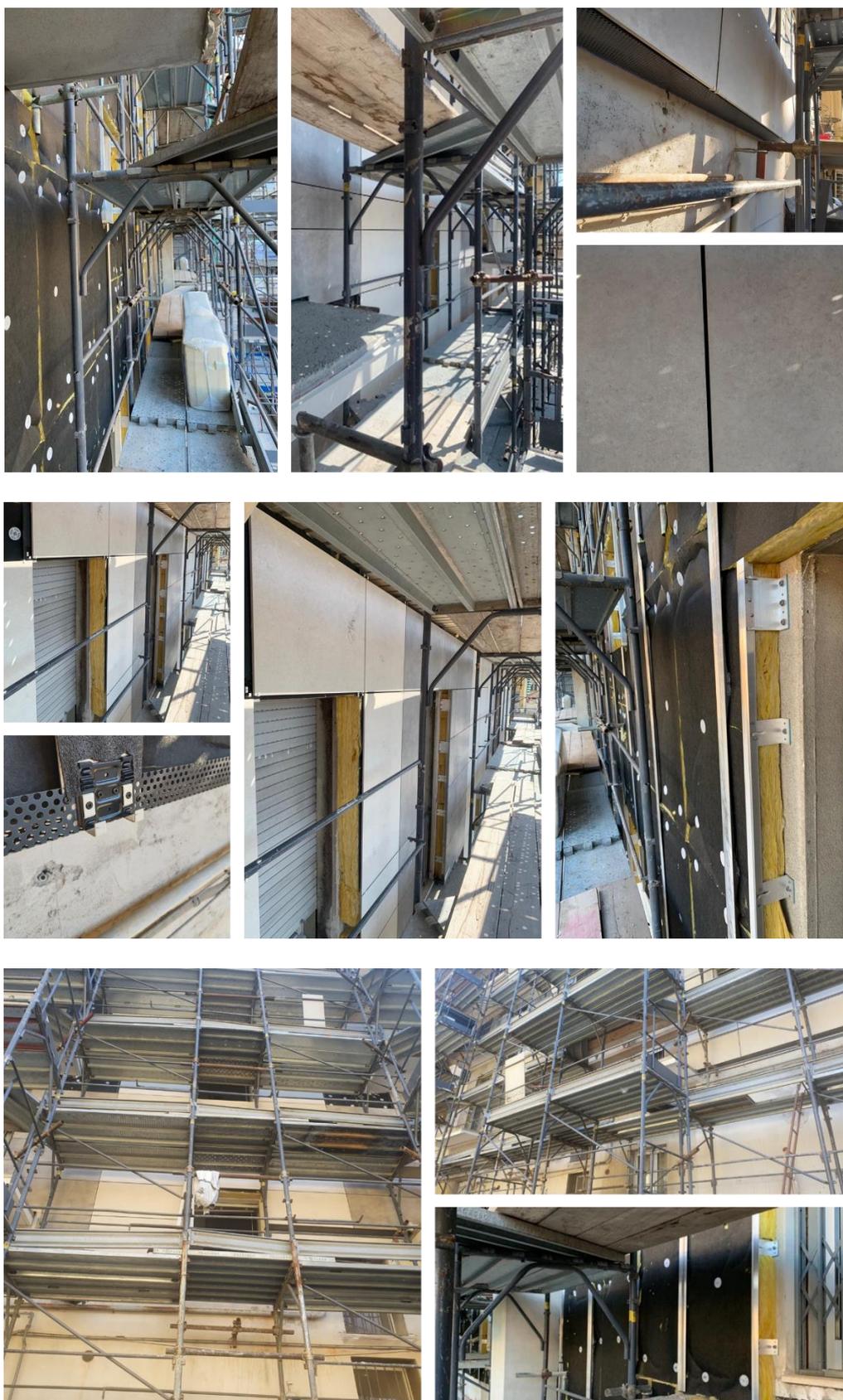


Figura 45: immagini relative al dimostratore, ai particolari di montaggio e di aggancio della struttura

Per quanto riguarda il fissaggio, sono stati testati n°4 ancoraggi nelle zone evidenziate con i pallini rossi nell'immagine sotto riportata.

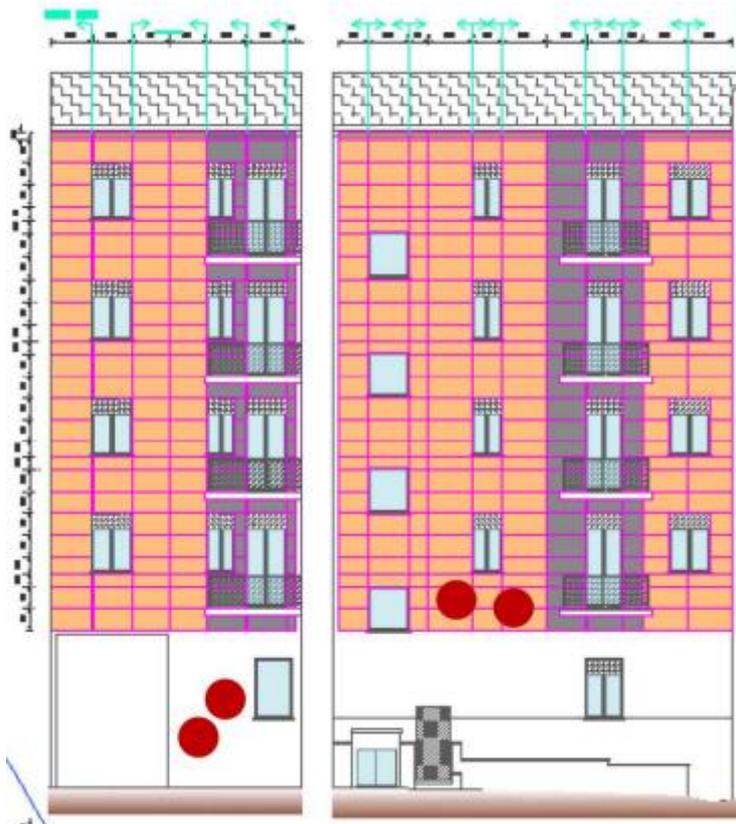


Figura 46: indicazione dei punti sui quali sono state effettuate le verifiche di fissaggio

Sono state effettuate prove di tenuta a prova di pull out con i medesimi ancoraggi utilizzati nelle prove su tavola vibrante della seconda annualità di progetto (prodotti Friulsider). I tasselli utilizzati sono quelli sotto riportati:

Tassello X3, bordo maggiorato Ø18, vite TER con rondella integrata Ø19 zincata bianca chiave 13, impronta Torx T40



Tassello X3, bordo maggiorato Ø18, vite TER con rondella integrata Ø19 zincata bianca chiave 13, impronta Torx T40



Figura 47: ancoraggi testati

PROVA 1

Ancorante X3 M10x80 – foro diam 10

Risultato: 1180 dN – **Prova interrotta senza segni di cedimento**



PROVA 2

Ancorante X3 M10x80 – foro diam 10

Risultato: 1330 dN – **Prova interrotta senza segni di cedimento**



PROVA 3

Ancorante X3 M10x100 – foro diam 10

Risultato: 300 dN – **Prova interrotta ai primi segnali di rottura per sfilamento**



PROVA 4

Ancorante X3 M10x100 – foro diam 10

Risultato: 320 dN – **Prova interrotta ai primi segnali di rottura per sfilamento**



Figura 48: Risultati dei test sugli ancoraggi

3.2 Strumentazione utilizzata per il monitoraggio

Per la verifica dei parametri sopra menzionati sono stati utilizzati i seguenti apparati:

1. **Termocamera:** per l'acquisizione dati di temperatura superficiale tramite immagini è stata utilizzata una termocamera FLIR T620bx, dotata di un sensore da 640x480 ed una termocamera 890x1.V1. La scelta di questo strumento è motivata in parte dalla elevata affidabilità, facilità di utilizzo, e dalla possibilità di ottenere informazioni più ampie rispetto alla temperatura puntuale superficiale che si sarebbe potuta ottenere ad esempio con un termometro a infrarossi. La gestione dei dati acquisiti, effettuata tramite software dedicato, permette di esportare dalle fotografie effettuate i dati sulla temperatura relativa a ciascun pixel dell'immagine. La termografia consente di poter operare anche all'interno degli edifici senza dover sospendere le normali attività, limitando al minimo i disagi per gli abitanti ma anche di evitare traumi alle strutture. Le misure sono state effettuate in condizioni passive analizzando le superfici così come si presentano al momento dell'indagine senza surriscaldamento artificiale se non quello dovuto alla presenza degli impianti di climatizzazione invernale.



Figura 49: immagine relativa alla termocamera FLIR

2. **Termoflussimetri:** La termoflussimetria consiste nel rilevare il flusso termico che attraversa un continuo; è una tecnica diagnostica non invasiva e non distruttiva che consente, mediante misure e calcoli, di valutare la trasmittanza termica (U) operativa di un dato componente edilizio. La parete è stata equipaggiata con termoflussimetri ThermoZig. Tali strumenti sono in grado di misurare la temperatura superficiale sulle due superfici (interna ed esterna) della parete, e il flusso termico che si genera in direzione trasversale. Ognuno dei termoflussimetri utilizzati è dotato di quattro punti di misura, tre sensori per la misura di temperatura superficiale (due esterni ed uno interno), e un sensore utilizzato per la contemporanea acquisizione del dato di temperatura superficiale e flusso termico. Ogni termoflussimetro acquisisce, quindi, cinque dati per ogni istante di tempo, quattro di temperatura, ed uno di flusso termico. Ogni termoflussimetro è stato posizionato sulla parete esterna assicurando che ciascun punto di misura fosse posizionato sufficientemente lontano dalla finestra, in modo da ridurre al minimo gli effetti dei ponti termici tra parete e infisso sulle misure; il più possibile vicino al centro di un elemento di rivestimento (il rivestimento si presenta sotto forma di piastrelle ed è necessario evitare i cosiddetti “effetti di bordo”). Ciascuna coppia di punti di misura è collegata a un trasmettitore. Per ogni termoflussimetro sono quindi presenti due trasmettitori emettitori (uno per ogni coppia di sensori) e uno ricevente, connesso al data logger.



Figura 50: termoflussimetro ThermoZig

Si allegano di seguito alcuni grafici relativi alle misure in opera, eseguite per la situazione ex ante ed ex post.

Le misure riguardano il flusso termico attraverso la parete e le temperature superficiali interne ed esterne. Attraverso una procedura di integrazione nel tempo, e basandosi sulla formula fisica per cui:

$$\phi' = UDT$$

è possibile ricavare i valori di trasmittanza dell'elemento edilizio.

Dalle misure si ottengono dati di flusso termico ϕ' e di temperatura interna ed esterna; per valutare i valori in opera si utilizza il metodo delle medie progressive che “progressivamente” ottiene un valore derivante dalla rapporto delle medie dei valori di flusso e di differenza di temperatura misurati:

$$C = \frac{\sum_{j=1} \phi'}{\sum_j (T_{sij} - T_{sej})} \quad U = \frac{\sum_{j=1} \phi'}{\sum_j (T_{aij} - T_{aej})}$$

dove:

- C è la conduttanza termica della struttura
- T_{sij} è la temperatura superficiale interna j-sima
- T_{sej} è la temperatura superficiale esterna j-sima
- T_{aij} è la temperatura dell'aria interna j-sima
- T_{aej} è la temperatura dell'aria esterna j-sima
- ϕ' è il flusso termico j-esimo

MISURA DELLA TRASMITTANZA IN OPERA

DATI GENERALI

Misura eseguita da: ENEA

DATI SULLA MISURA

Tipo di strumentazione: Optivelox Thermozig SN20

Posizionamento sensori: altezza dal pavimento circa 1 m, fissaggio con graffette e pasta termica

Tipo di temperatura misurata: temperatura superficie elemento

Durata della misura: 3.0 [giorni]

Numero di misurazioni: 869 (su 869)

Intervallo giornaliero considerato: 00:00 <-> 24.00

Intervallo temporale di campionamento: 300 [s]

N. medie per ogni campione: 10

DATI SUL METODO DI ANALISI E RISULTATI

Metodo usato: medie progressive (ISO9869)

Delta T medio sull'elemento: 2.33 [°C]

Flusso medio attraverso l'elemento: 4.14 [W/m²]

Stima dell'errore di misura dei sensori: 16.0 [%]

Energia complessiva scambiata attraverso l'elemento: 0.30 [kWh/m²]

Coefficiente di adduzione interno utilizzato (h_i): 10.0 [W/m²K]

Coefficiente di adduzione esterno utilizzato (h_e): 25.0 [W/m²K]

Trasmittanza calcolata (ultime 24h): 1.423 <-> 1.577 [W/m²K]

Trasmittanza calcolata (finale): 1.425 [W/m²K]

Figura 51: esempio di dati estratti dal test report delle termoflussimetria. In questo caso trattasi di una misura ex ante da cui si evince un valore di trasmittanza finale pari a 1.425 W/m²*K

GRAFICI DEI DATI

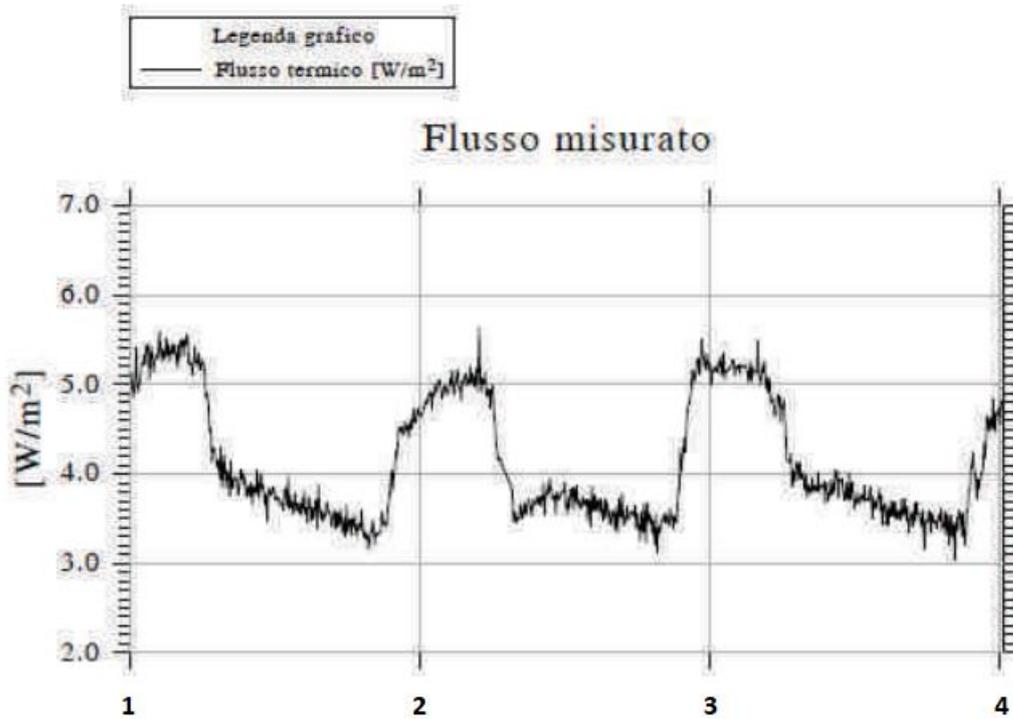


Figura 52: grafico termoflussimetria ante intervento (flusso termico)

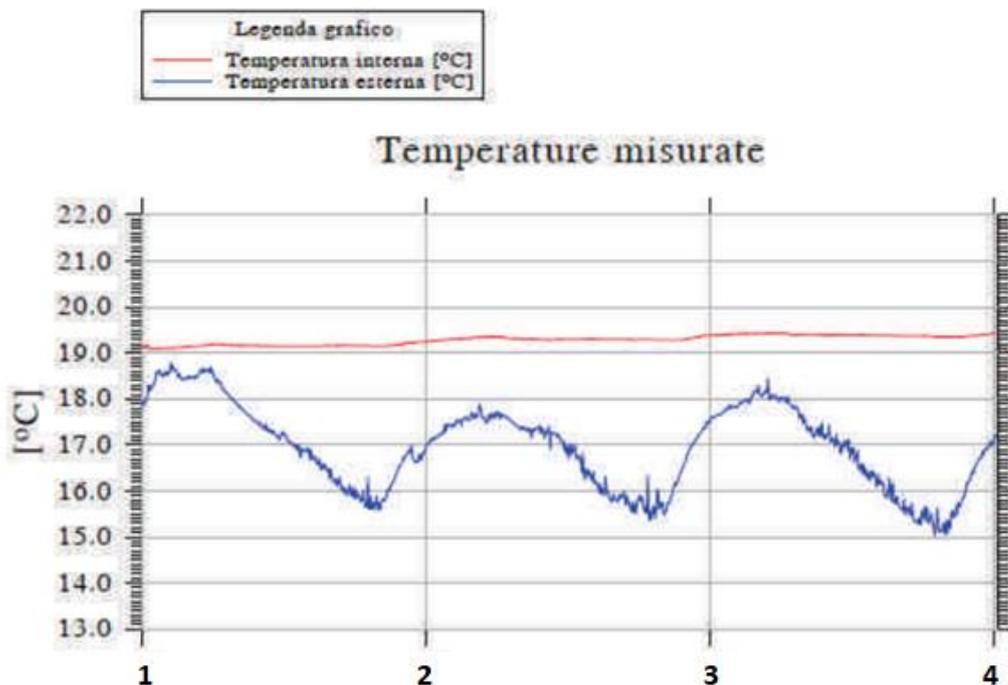


Figura 53: grafico termoflussimetria ante intervento (temperatura interna ed esterna)

Dai grafici sopra riportati si evince una trasmittanza (calcolata col metodo delle medie progressive) pari a 1.425 W/m²*K.

Per quanto riguarda le misure ex post, si mostra di seguito un grafico riportante l'andamento delle misure con metodo delle misure progressive, dal quale si evince che il valore maggiormente rappresentativo è quello valutato attorno alla misura 1071 del grafico (circa $0.215 \text{ W/m}^2\text{K}$):

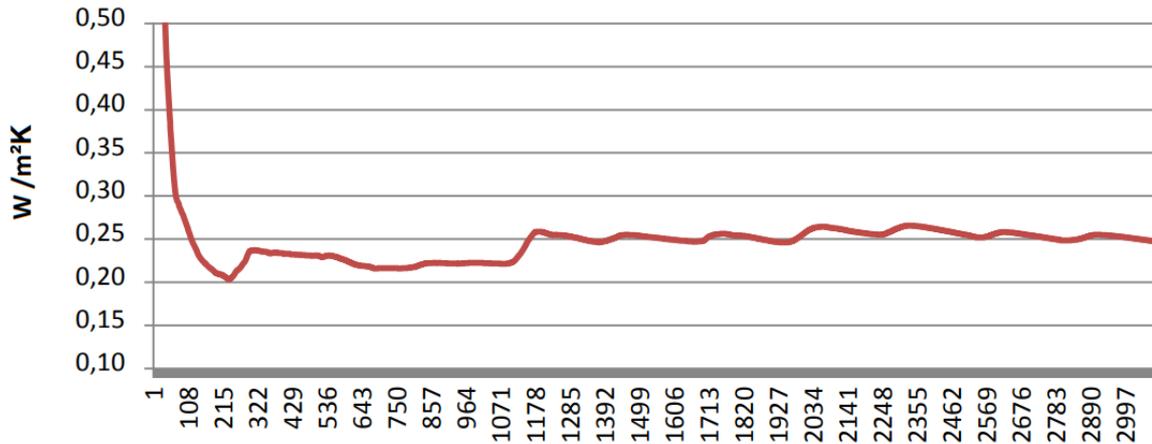


Figura 54: misura termoflussimetrica nella situazione ex post

- Centralina climatica: consente di misurare una serie di dati ambientali e meteorologici necessari a definire la qualità dell'aria in cantiere. La centralina si autoalimenta grazie alla presenza di un pannello fotovoltaico così da poter essere posizionata in qualunque punto del cantiere ed evitare lunghi cavi che potrebbero infastidire le normali operazioni da cantiere.



Figura 55: Immagine della centralina climatica

- Misuratori di temperatura interna: misura ulteriormente effettuata è stata quella relativa alla temperatura interna, monitorata tramite dei termometri digitali dotati di data logger integrato Elitech RC-4HC. I data logger sono stati posizionati lontani dagli impianti di condizionamento dell'aria, dalle finestre e da eventuali altre sorgenti di temperatura al fine di minimizzare perturbazioni della grandezza misurata.



Figura 56: Misuratore di temperatura Elitech RC-4HC

3.3 Raggiungimento in opera del livello di isolamento

Obiettivo del progetto è quello di riqualificare lo stock edilizio residenziale esistente nel rispetto dei requisiti minimi imposti dalla vigente normativa arrivando, però, a rispettare i livelli di Uvalue necessari per poter accedere a meccanismi incentivanti e detrazioni fiscali. Ciò significa arrivare a livelli di isolamento più prestanti rispetto a quelli previsti per le nuove costruzioni.

Il decreto MISE 06 Agosto 2020 prevede i seguenti requisiti minimi per strutture opache verticali (isolamento pareti perimetrali):

Zona climatica A	$\leq 0,38 \text{ W/m}^2\text{*K}$
Zona climatica B	$\leq 0,38 \text{ W/m}^2\text{*K}$
Zona climatica C	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\text{*K}$
Zona climatica D	$\leq 0,26 \text{ W/m}^2\text{*K}$
Zona climatica E	$\leq 0,23 \text{ W/m}^2\text{*K}$
Zona climatica F	$\leq 0,22 \text{ W/m}^2\text{*K}$

Nel caso in esame è stato analizzato un dimostratore ricadente in zona climatica E e, pertanto, il valore massimo di trasmittanza da raggiungere è pari a $0,22 \text{ W/m}^2\text{*K}$.

La soluzione adottata prevede l'uso di isolanti con valore di conducibilità pari a $0.030 \text{ W/m}\text{*K}$, considerando la parete esistente ed uno spessore di 12 cm di isolante si raggiunge il valore necessario. Ciò è stato calcolato e simulato così come previsto dalla norma tecnica UNI EN ISO 6946. Le misure effettuate tramite la campagna termoflussimetrica hanno restituito valori medi corrispondenti a quanto preventivamente calcolato e simulato.

3.4 Verifica dei tempi di posa in opera

Attività propedeutica alla presenza è stata quella svolta dall'Università di Messina che si è occupata di sviluppare un sistema di monitoraggio video denominato EneaMonitor che fornisce tutte le funzionalità necessarie per la registrazione di più flussi video provenienti sia da videocamere IP sia da termocamere a infrarossi. Il sistema permette altresì la rilevazione di eventi (event detection) associati a possibili condizioni di allarme. Il sistema consente anche di gestire streaming e archiviare file video e immagini, anche in formato compresso. È stato, inoltre, realizzato un modulo che consente l'interfacciamento di ZM con termocamere,

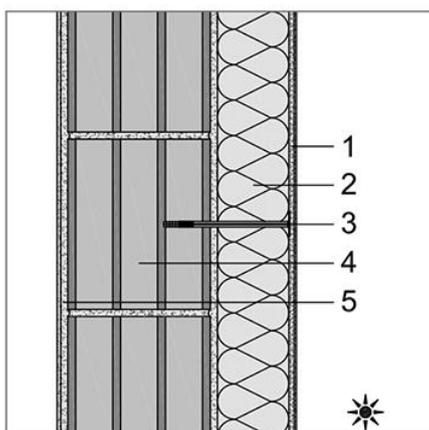
permettendo la registrazione di flussi video di immagini termografiche alla stregua di flussi video convenzionali.

Grazie a questa attività ed al sistema sviluppato da UNIME è stato possibile monitorare i tempi di cantiere e posa in opera verificando quali siano le tempistiche di posa in opera rispetto all'installazione di tipo tradizionale di un cappotto termico.

La posa in opera di un cappotto di tipo tradizionale prevede un certo numero di lavorazioni che richiedono tempo, volendole riassumere possiamo elencarle come di seguito:

1. Preparazione del supporto (parete in calcestruzzo, laterizi, legno...) con eventuale scrostatura dei muri e lavaggio
2. Installazione dei profili di partenza alla base della struttura
3. Posa dei pannelli isolanti con struttura sfalsata tramite incollaggio (5 punti almeno). E' preferibile che i pannelli alla base abbiano una densità maggiore per evitare risalita di umidità
4. Tassellatura dei pannelli
5. Riempimento delle fessure tra i pannelli per abbattere i ponti termici
6. Eseguire i rinforzi dei punti deboli in corrispondenza di spigoli di apertura per finestre e porte e agli angoli degli edifici. Nel primo caso si utilizzano rinforzi angolari, nel secondo una rete per cappotto a 45°
7. Rasatura dei pannelli
8. Applicazione di una rete in fibra di vetro
9. Applicazione di un primer ed un intonaco di finitura
10. Pitturazione della facciata

Tali operazioni, da realizzarsi con precisione al fine di evitare creazione di ponti termici, rigonfiamenti e non planarità della parete, richiedono tempi lunghi. Nel caso di pannelli isolanti in polistirene, ad esempio, tra la fase 3 e la fase quattro potrebbero essere richiesti 2-3 giorni per l'asciugatura del collante. Nel caso di EPS grafitato si può, invece, procedere fin da subito.



- 1 Parete in laterizio con cappotto esterno
1. Intonaco esterno
2. Isolante termico
3. Elemento di fissaggio
4. Parete in laterizio
5. Intonaco interno

Figura 57: schema cappotto con sistema tradizionale

In questo caso l'applicazione di cappotto per una parete condominiale simile a quella del nostro edificio ricorrente richiede dai 7 ai 12 giorni.

Le fasi di installazione di una facciata prodotta con le modalità dell'OSC, per la quale, la produzione si sposta in fabbrica ed in cantiere abbiamo soltanto le attività di montaggio della struttura, possono essere così riassunte:

1. Montaggio di staffe metalliche di ancoraggio, le stesse hanno il compito di sostenere gli strati di finitura esterni e di trasferire i carichi alla parete retrostante.
2. Posa e fissaggio dei pannelli isolanti
3. Montaggio della struttura portante - profili montanti verticali e/o trasversi
4. Montaggio del paramento esterno (gres, metallo, pietra, marmo...)

Per la medesima parete relativa all'edificio ricorrente, i tempi richiesti vanno dai 4 ai 5 giorni.

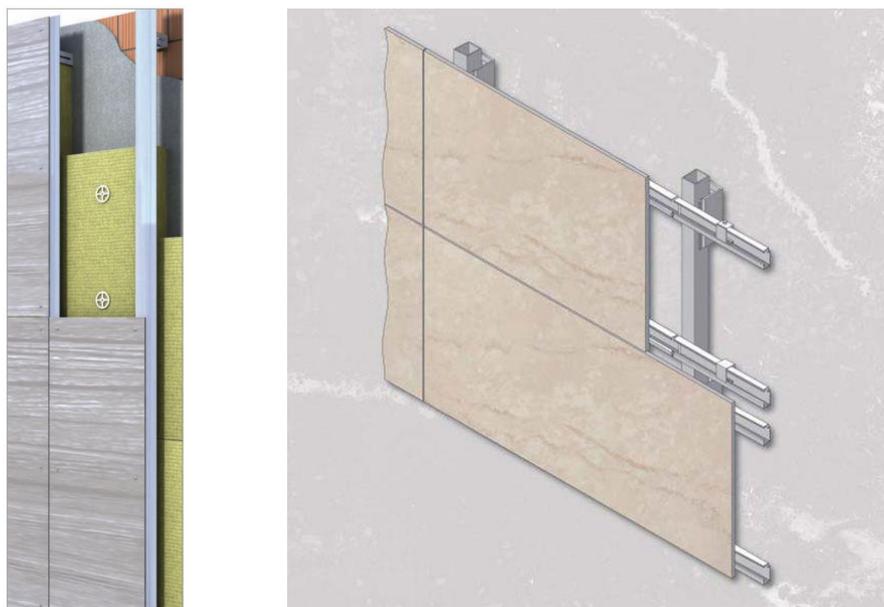


Figura 58: schema isolamento con OSC

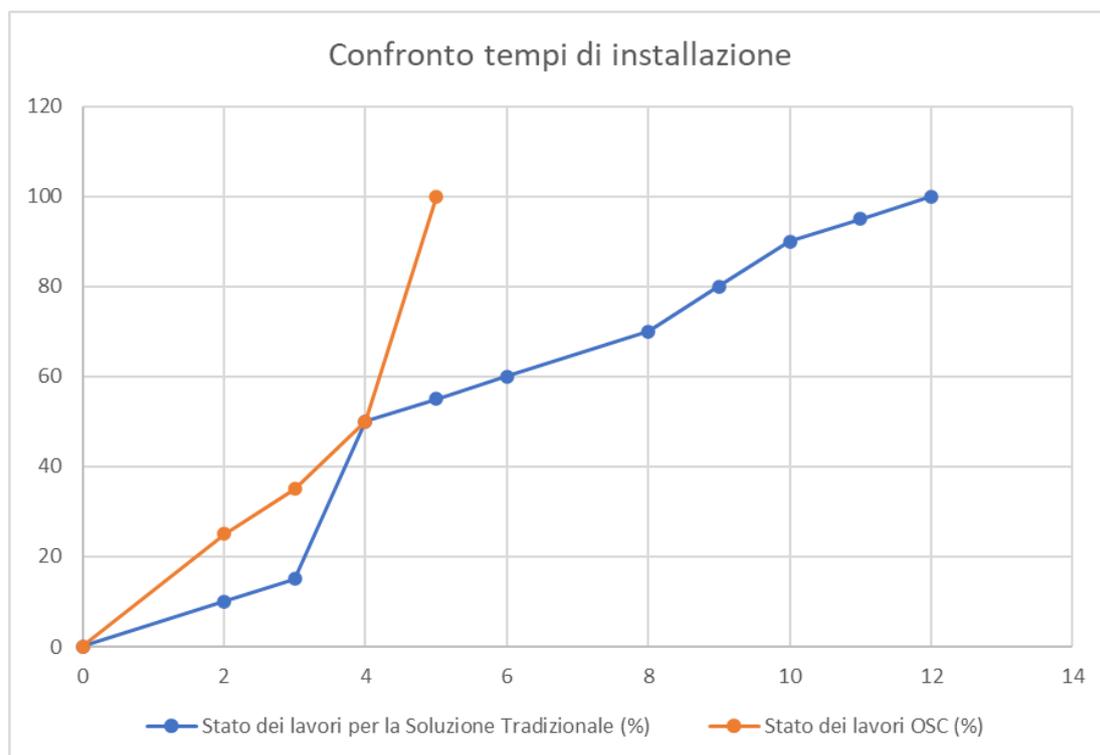


Figura 59: comparazione dei tempi di lavorazione tra ST e OSC

Questo tipo di analisi ha consentito di effettuare importanti verifiche in merito alla posa in opera e alle positive conseguenze che ne derivano. Anzitutto è possibile affermare che si ha una significativa riduzione dei tempi di posa in opera, tale riduzione si è stata valutata attorno al 40% in meno rispetto ai tempi di posa di un cappotto del tipo tradizionale (incollato più tassellato su 5 punti, quindi, installazione a regola d'arte). Questo dato porta con sé numerosi vantaggi che elenchiamo qui di seguito:

1. Abbattimento del tempo di uso dei ponteggi con conseguenti riduzioni dei costi per il loro nolo
2. Abbattimento dei tempi di cantiere con aumento esponenziale del rispetto dei tempi di consegna finale
3. Abbattimento dei rischi di cantiere
4. Abbattimento dei costi relativi all'occupazione del suolo pubblico (per condomini di grosse dimensioni, in grandi città come Milano, Roma o Bologna questi costi possono avere incidenze importanti dell'ordine anche di 40-50k€)
5. Nei casi di utilizzo nell'ambito del Social Housing un ulteriore vantaggio proviene dall'abbattimento dei costi dovuti allo spostamento degli abitanti. Tale costo può addirittura azzerarsi se non sono previsti lavori di rifacimento interno delle abitazioni.

Tutti questi parametri ci spingono ad affermare che la riduzione dei tempi di posa sono l'unico vantaggio nell'utilizzo dell'OSC ma portano con sé innumerevoli vantaggi di natura economica. Elencando i parametri che definiscono l'efficacia delle soluzioni e assegnando dei voti da 1 a 3, si può definire una tabella così come segue:

	ST	OSC
Costo materiali	2	1
Tempi	1	3
Rischi in cantiere	1	2
Costi occupazione suolo pubblico	1	3
Costi per spostamento occupanti	1	3
Inquinamento dell'area di cantiere	1	2

Figura 60: tabella comparativa dell'efficacia delle soluzioni ST e OSC

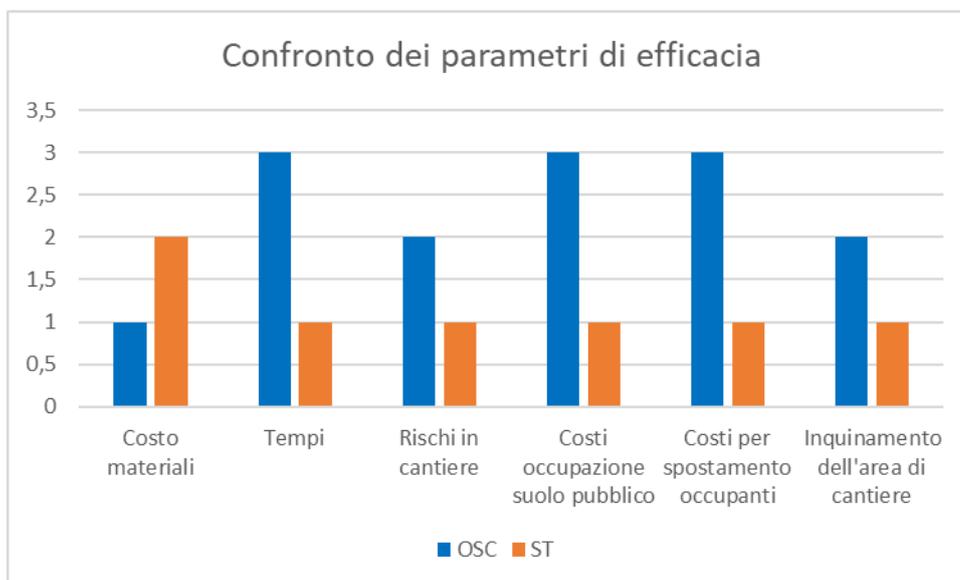


Figura 61: Confronto dei differenti parametri per le due soluzioni ST e OSC

3.5 Verifica delle condizioni di salubrità del cantiere

Le attività di cantiere, quali ad esempio transito di mezzi terrestri, demolizioni, pulitura dei muri etc... possono essere sorgenti di inquinamento atmosferico e di conseguenti danni alla salute degli abitanti che potrebbero essere soggetti ad allergie, problemi respiratori e infiammazioni delle vie aeree.

Per quanto riguarda le misure eseguite per il dimostratore si precisa che non esistendo protocolli standard applicabili ai cantieri, si è proceduto con misurazioni in continuo durante le operazioni di cantiere verificando che non si verificassero condizioni particolarmente avverse in cantiere.

A seguito delle considerazioni già fatte nei paragrafi precedenti potrebbe già essere affermato che sicuramente il cantiere che utilizza l'OSC è un "cantiere pulito". Ciò viene confermato dalle verifiche in situ poiché sono abbattute in maniera drastica diverse condizioni:

1. Polveri nell'aria
2. Inquinamento dovuto alla presenza di mezzi in cantiere
3. Abbattimento dell'uso (e, in alcuni casi, spreco) di acqua in cantiere
4. Abbattimento degli sfridi da conferire in discarica (con conseguente risparmio economico)

Anche in questo caso è possibile affermare che l'OSC lega a sé numerosi vantaggi anche in merito alla salubrità del cantiere e delle zone ad esso limitrofe.

4 Conclusioni

Per quanto riguarda le simulazioni effettuate in regime semi-stazionario, è stato verificato come la tipologia di calcolo adottata può effettivamente supportare i professionisti nel valutare i risparmi conseguiti e la possibilità di accesso a meccanismi incentivanti o detrazioni fiscali legate alla riqualificazione energetica degli edifici. Tali modalità consentono anche un calcolo approfondito dei tempi di ritorno dell'investimento e, quindi, la valutazione di tutti gli indicatori economici che esprimono un chiaro quadro della fattibilità dell'intervento quali, ad esempio, VAN, TIR, TRs, Tra, VAN/I.

Per quanto riguarda invece le analisi dinamiche realizzate, esse hanno consentito di valutare l'impatto delle differenti soluzioni individuate per l'isolamento dell'involucro edilizio. È stato verificato come i consumi di gas naturale vengono ridotti, in tutti i casi, dal 30% fino quasi al 50%, ove parte della variabilità è da attribuire alle condizioni climatiche specifiche all'interno di ciascuna zona climatica, e parte all'effetto della sostituzione delle finestre (i risultati mostrano sia le simulazioni con infissi "vecchi", che in presenza di intervento di sostituzione degli infissi). Si è voluta inoltre valutare l'influenza della scelta della tipologia di soluzione standardizzata a cappotto sul numero di classi energetiche guadagnate dall'edificio, vista anche la rilevanza di questa misura per l'accesso a meccanismi incentivanti: a seconda del caso specifico, si stima che sia possibile guadagnare fino a due classi energetiche con il solo isolamento dell'involucro (ed eventualmente sostituzione degli infissi). Anche in questo caso i risultati risultano scarsamente influenzati dalla scelta del sistema a cappotto, mentre si può osservare una marginale influenza della zona termica: in particolare, la zona termica D appare quella in cui sia più probabile il verificarsi dell'incremento di due classi senza dover ricorrere ad altre soluzioni di efficientamento energetico. Le stesse analisi sono state effettuate per il caso di sostituzione della caldaia con una nuova con tecnologia a condensazione: in questo caso, la combinazione dei due interventi porta a un calo ancor più drastico dei consumi di gas naturale, che a seconda delle condizioni climatiche e del tipo di infissi possono essere ridotti fino a oltre il 60% rispetto al caso di riferimento. Questo effetto si può riscontrare chiaramente anche andando ad osservare l'effetto sulla classe energetica dell'edificio, che incrementa da un minimo di 2 fino a un massimo 4 classi energetiche.

L'impatto delle differenti tipologie di impianto, suddiviso sulle diverse zone climatiche, sui consumi di gas naturale ed elettrici, considerando il caso base, ossia la riqualificazione dell'involucro edilizio senza alcuna azione sull'impianto, si trova in un *range* indicativamente tra il 20% e il 40% di miglioramento di prestazioni rispetto all'edificio di riferimento. Come evidenziato in precedenza, l'aggiunta della semplice sostituzione del generatore di calore con una caldaia a condensazione permette un ulteriore netto miglioramento dei risultati, con un calo dei consumi di gas naturale che può superare, a seconda dei casi, il 70%. Le analisi hanno inoltre mostrato come andare ad agire anche sull'impianto possa portare a dei miglioramenti molto significativi della classe energetica dell'edificio, che può essere migliorata fino a 5 o più classi rispetto all'edificio di partenza.

Per quanto riguarda le prestazioni in termini di costo, esse risultano molto dipendenti dal costo del gas naturale, e sono quindi qui riportate in maniera meno approfondita viste le notevoli fluttuazioni di tale parametro negli ultimi mesi. Le prestazioni ambientali sono invece notevolmente migliorate nei casi in cui si verifica l'adozione di tecnologie avanzate quali le pompe di calore.

Per quanto riguarda la realizzazione del dimostratore, invece, lo scopo principale del monitoraggio è stato quello di verificare:

1. raggiungimento in opera dei livelli di isolamento desiderati;
2. verifica dei tempi di posa in opera;
3. verifica delle condizioni di salubrità del cantiere.

Nel caso in esame è stato analizzato un dimostratore ricadente in zona climatica E e, pertanto, il valore massimo di trasmittanza da raggiungere è pari a $0,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. La soluzione adottata prevede l'utilizzo di isolanti con valore di conducibilità pari a $0.030 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, considerando la parete esistente ed uno spessore di 12 cm di isolante si raggiunge il valore necessario. Ciò calcolato e simulato così come previsto dalla norma tecnica UNI EN ISO 6946.4. Le misure effettuate tramite la campagna termoflussimetrica hanno restituito valori medi corrispondenti a quanto preventivamente calcolato e simulato.

Per quanto riguarda la verifica dei tempi di posa in opera, è possibile affermare che si registra una significativa riduzione, valutata attorno al 40% in meno rispetto ai tempi di posa di un cappotto del tipo tradizionale (incollato più tassellato su 5 punti, quindi, installazione a regola d'arte).

Anche per quanto riguarda la verifica della salubrità del cantiere le condizioni risultano notevolmente migliorate rispetto ad un cantiere tradizionale.

A seguito delle verifiche svolte e dei monitoraggi effettuate è quindi possibile affermare quanto di seguito riportato.

E' vero che, in termini di costi relativi al materiale posato in opera, l'OSC prevede un aumento degli stessi, rispetto alle soluzioni di tipo tradizionale di installazione del cappotto termico, di circa un 6-10%, ma d'altra parte l'utilizzo di soluzioni modulari prefabbricate conduce ad un abbattimento dei costi in totale sull'intero appalto di circa il 20-25% e ciò è dovuto, principalmente al fatto che tutta una serie di costi diretti ed indiretti si riducono considerevolmente. Volendo ricordare quelli con maggiore incidenza, possiamo così elencarli:

1. Minori costi dovuto al minor tempo d'uso dei ponteggi
2. Minori costi relativi all'occupazione del suolo pubblico
3. Minori (o nulli) costi dovuti allo spostamento degli abitanti
4. Minori costi dovuti agli sfridi
5. Minori costi dovuto al non utilizzo di acqua in cantiere

Senza considerare, poi, tutta un'importante serie di vantaggi correlati quali:

1. Prodotto migliore e realizzato con materiali più duraturi
2. Maggior rispetto dei tempi di consegna finale
3. Aumento del rispetto dei tempi di consegna dei materiali in cantiere
4. Abbattimento dei rischi di incidenti in cantiere con aumento della sicurezza sul lavoro
5. Ambiente di cantiere più salutare con meno polveri e inquinamento presenti.

Tutto quanto sopra detto ci porta, pertanto ad affermare in maniera convinta e decisa che l'OffSite Construction rappresenta sicuramente un nuovo paradigma per il futuro del mondo dell'edilizia consentendo di ottenere risultati di qualità elevata con un maggior controllo su efficacia ed efficienza di processo e che, per i prossimi anni, rimodulare il pensiero dell'Ambiente Costruito in quest'ottima potrà migliorare la qualità, l'efficienza e l'efficacia dei nostri cantieri e delle nostre costruzioni.

Le analisi illustrate nel presente report, ovvero le valutazioni relative alle soluzioni individuate e le analisi sulla fase cantieristica, costituiscono la base per la validazione delle soluzioni standardizzate individuate e quindi, come già precedentemente discusso, per una ottimizzazione dell'intero processo produttivo (maggiori informazioni su tale ottimizzazione sono riportate nei report delle LA 2.9 e 2.14 a cura del CINTEST). Dall'indagine svolta presso gli stakeholder del settore è emerso che da parte del mondo delle costruzioni c'è una grande fiducia nell'utilizzo di sistemi che adottino la tecnica dell'OSC perché si riscontra in queste una maggior facilità nell'installazione, una migliore resa nel tempo e, nel complesso, minori costi di realizzazione.

Anche i progettisti dimostrano fiducia nella tecnologia presentata anche se esprimono alcuni dubbi sulla facilità di modellazione con strumenti di tipo commerciale.

L'utente finale, invece, risulta essere un po' più restio. Ciò probabilmente perché fortemente legato ai metodi tradizionali e poco informato sulle tecnologie e sui loro vantaggi. A questo proposito, sicuramente, una buona campagna di formazione ed informazione in merito potrebbe aprire le porte ad una conoscenza più approfondita dell'OSC. Proprio per questo motivo, ci si è proposti di proseguire con la diffusione dei risultati anche a progetto concluso. Dimostrazione dell'impegno in tal senso, una sezione del prossimo SAIE 2022 (ad Ottobre) ospiterà un workshop ENEA sull'OSC ed i suoi vantaggi. Durante l'incontro saranno presentati i risultati del progetto e sarà avviata una tavola rotonda sulla tematica con il coinvolgimento di ENEA; Università, Tecnici, Associazioni di categoria e decisori politici.

6. Riferimenti bibliografici

1. AA.VV., RE+BUILD ITALIA, Piattaforma per l'innovazione delle costruzioni italiane, Outlook 2017, n°2 Giugno
2. Arashpour, M., Wakefield, R., Abbasi, B., Lee, E.W.M., Minas, J., 2016. Off-site construction optimization: sequencing multiple job classes with time constraints. *Autom. Construct.* 71 (Part 2), 262-270.
3. Chen, J.H., Yan, S., Tai, H.W., Chang, C.Y., 2017. Optimizing profit and logistics for precast concrete production. *Can. J. Civ. Eng.* 44 (6), 393-406.
4. Choi, J.O., O'Connor, J.T., Kim, T.W., 2016. Recipes for cost and schedule successes in industrial modular projects: qualitative comparative analysis. *J. Construct. Eng. Manag.* 142 (10).
5. Gledson, B.J., 2016. Hybrid project delivery processes observed in constructor BIM innovation adoption. *Construct. Innovat.* 16 (2), 229-246.
6. Hong, J., Shen, G.Q., Li, Z., Zhang, B., Zhang, W., 2018. Barriers to promoting prefabricated construction in China: a costebenefit analysis. *J. Clean. Prod.* 172, 649-660.
7. Hong, J., Shen, G.Q., Mao, C., Li, Z., Li, K., 2016. Life-cycle energy analysis of prefabricated building components: an input-output-based hybrid model. *J. Clean. Prod.* 112, 2198-2207.
8. Isaac, S., Bock, T., Stoliar, Y., 2016. A methodology for the optimal modularization of building design. *Autom. ConStruct.* 65, 116-124.
9. Jiang, R., Mao, C., Hou, L., Wu, C., Tan, J., 2018. A SWOT analysis for promoting offsite construction under the backdrop of China's new urbanisation. *J. Clean. Prod.* 173, 225-234.
10. Jin, R., Gao, S., Cheshmehzangi, A., Aboagye-Nimo, E., 2018. A holistic review of off-site construction literature published between 2008 and 2018. *J. Clean. Prod.* 202, 1202-1219.
11. Kamali, M., Hewage, K., 2016. Life cycle performance of modular buildings: a critical review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 62, 1171-1183.
12. Kamali, M., Hewage, K., 2017. Development of performance criteria for sustainability evaluation of modular versus conventional construction methods. *J. Clean. Prod.* 142, 3592-3606.
13. Lei, Z., Taghaddos, H., Han, S.H., Bouferguene, A., Al-Hussein, M., Hermann, U., 2015. From autoCAD to 3ds max: an automated approach for animating heavy lifting studies. *Can. J. Civ. Eng.* 42 (3), 190-198.
14. Mitterhofer, M., Schneider, G.F., Stratbücker, S., Sedlbauer, K., 2017. An FMI-enabled methodology for modular building performance simulation based on Semantic Web Technologies. *Build. Environ.* 125, 49-59.
15. Ramaji, I.J., Memari, A.M., Messner, J.I., 2017. Product-oriented information delivery framework for multistory modular building projects. *J. Comput. Civ. Eng.* 31 (4).
16. RICS, September 2018, Modern Methods of Construction. A forward-thinking solution to the housing crisis?

17. Shahtaheri, Y., Rausch, C., West, J., Haas, C., Nahangi, M., 2017. Managing risk in modular construction using dimensional and geometric tolerance strategies. *Autom. Construct.* 83, 303-315.
18. Sonogo, M., Echeveste, M.E.S., Galvan Debarba, H., 2018. The role of modularity in sustainable design: a systematic review. *J. Clean. Prod.* 176, 196-209.
19. Wikberg, F., Olofsson, T., Ekholm, A., 2014. Design configuration with architectural objects: linking customer requirements with system capabilities in industrialized house-building platforms. *Construct. Manag. Econ.* 32 (1e2), 196- 207.
20. Wang, T., Li, Y., Zhang, L., Li, G., 2016. Case study of integrated prefab accommodations system for migrant on-site construction workers in China. *J. Prof. Iss. Eng. Ed. Pr.* 142 (4).
21. F. Baldi, E. Genova, A. Gugliandolo, C. Romeo, M.-A. Segreto, 2019, Simulazione in regime dinamico di edifici rappresentativi del parco edilizio italiano, Report ENEA RdS