



Politecnico di Torino

Dipartimento di Architettura e Design
Corso di Laurea Magistrale
in Architettura per la Sostenibilità

**Riqualificazione energetica in ambito residenziale:
confronto tra soluzioni passive ed attive applicate
all'involucro edilizio.
Un caso studio in Abruzzo.**

Relatore

prof. Ilaria Ballarini

Co-relatore

prof. Valentina Serra

Candidati

Edoardo Cordoni s328492

Giammarco Dazi s328494

Anno Accademico 2025-2026

INDICE

ABSTRACT

INTRODUZIONE 01.

1.1 QUADRO NORMATIVO EUROPEO E NAZIONALE	
1.1.1 DIRETTIVA (UE) 2024/1275	09
1.1.2 DIRETTIVA (UE) 2023/1791	10
1.1.3 LEGISLAZIONE NAZIONALE	10
1.2 NEW EUROPEAN BAUHAUS	12
1.3 SUPERBONUS	13
1.3.1 EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA	14
1.3.2 VANTAGGI E CRITICITA' DEL SUPERBONUS 110% NEL QUADRO DELLA TRANSIZIONE ENERGETICA	15

METODI E STRUMENTI PER IL CALCOLO 02.

2.1 CRITERIO DI CONFRONTO TRA SCENARI ENERGETICI	21
2.2 MODELLAZIONE MEDIANTE EDILCLIMA EC700	22
2.3 INDICATORI CONSIDERATI NELL'ANALISI	23
2.4 CRITERI DI LETTURA DEI RISULTATI	24

CASO STUDIO 03.

3.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE	27
3.2 CARATTERIZZAZIONE DELL'EDIFICIO	28
3.3 CONFRONTO TRA STATO PRE RETROFIT E STATO ATTUALE	33

INVOLUCRO ATTIVO PER IL RETROFIT ENERGETICO 04.

4.1 INTRODUZIONE SUL SISTEMA DI FACCIATA ATTIVA	41
4.2 STRATEGIE DI FUNZIONAMENTO DELLE FACCIATE ATTIVE	
4.2.1 SOLAR AIR HEATING FACADE (SAHF)	42
4.2.2 OPAQUE VENTILATED FACADE (OVF)	46

4.3 OTTIMIZZAZIONE PRESTAZIONALE DELLA FACCIATA ATTIVA	51
4.3.1 MATERIALI E PRESTAZIONE DEL COMPONENTE	52
4.3.2 CONTROLLO DELLA PORTATA D'ARIA NEI SISTEMI FAN-ASSISTED	53
4.4 EVOLUZIONE DEI SISTEMI TROMBE WALL: DA DISPOSITIVO PASSIVO A INVOLUCRO SOLARE ATTIVO	54
4.4.1 DAL MURO DI TROMBE CONVENZIONALE AI SISTEMI EVOLUTI	55
4.4.2 MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE E SISTEMI COMPOSTI	56
4.4.3 MURI DI TROMBE FOTOVOLTAICI E CONTROLLO STAGIONALE	58
4.4.4 SINTESI COMPARATIVA E RICADUTE PER IL RETROFIT	60
4.4.5 LIMITI DELLA RICERCA E DIREZIONI FUTURE	61
4.5 CASI STUDIO APPLICATIVI DEI SISTEMI TROMBE WALL	63
4.5.1 MURO DI TROMBE IN CLIMA ALPINO: ABITAZIONE RESIDENZIALE NELLA SICHUAN - TIBET ALPINE VALLEY	63
4.5.2 MURO DI TROMBE NEL SOCIAL HOUSING: ABITAZIONE A PACHUA DE SOTO, MESSICO	66
4.5.3 MURO DI TROMBE MODULARE PER IL RETROFIT IN CLIMA MEDITERRANEO	70
4.5.4 APPLICAZIONE DEL MURO TROMBE DI UN EDIFICIO ESISTENTE A TORINO	74
4.5.5 SINTESI CONCLUSIVA DEI CASI STUDIO	76

APPLICAZIONI DI FACCIATA ATTIVA AL CASO STUDIO

05.

5.1 IL CASO STUDIO DI TORINO COME RIFERIMENTO PER IL SISTEMA DI FACCIATA ATTIVA	79
5.2 CONFIGURAZIONI APPLICATIVE DEL SISTEMA	54
5.2.1 CONFIGURAZIONE SU PROSPETTO CIECO LATERALE	80
5.2.2 CONFIGURAZIONE PUNTUALE E MODULARE	82
5.2.3 CONFIGURAZIONE A RIVESTIMENTO COMPLETO	84
5.3 CRITERI DI SCELTA TRA LE CONFIGURAZIONI	86
5.3 ANALISI DELLE OMBRE E INDIVIDUAZIONE DELLE SUPERFICI DI APPLICAZIONE	87
5.4 STRATIGRAFIA E COMPONENTI DEL PANNELLO RESPONSIVE PARASITE	88

VALUTAZIONE ENERGETICA DEL SISTEMA APPLICATO

06.

6.1 ANALISI COMPARATIVA DEGLI SCENARI ENERGETICI	91
6.1.1 SCENARIO CON VENTILAZIONE MECCANICA	92
6.1.2 SCENARIO CON VENTILAZIONE MECCANICA + RECUPERTATORE DI CALORE	94
6.2 ANALISI DEI RISULTATI	96
6.2.1 STATO PER RETROFIT	96
6.2.2 STATO ATTUALE (SUPERBONUS 110%)	97
6.3 APPROFONDIMENTO SULLE UNITA' ABITATIVE CAMPIONE	98
6.4 ELABORATI PROGETTUALI FINALI	100

CONCLUSIONI

07.

BIBLIOGRAFIA

00.

ABSTRACT

ABSTRACT

In merito alle recenti evoluzioni normative in materia di efficienza energetica e sostenibilità ambientale, questo lavoro di tesi si colloca all'interno del quadro tracciato dalla **Direttiva (UE) 2024/1275** sulla prestazione energetica degli edifici, che ridefinisce obiettivi ambiziosi di riduzione del consumo energetico e introduce strumenti innovativi quali il parametro del **Global Warming Potential (GWP)** e i passaporti per la ristrutturazione.

L'oggetto del presente studio è dunque un edificio residenziale esistente, situato in **Abruzzo**, scelto come caso applicativo per verificare come la riqualificazione energetica non rappresenti solo un adeguamento ai limiti normativi, ma costituisca l'occasione per ripensare il ruolo dell'involucro e la qualità architettonica dei prospetti. In questa prospettiva, le facciate ventilate a recupero di calore si configurano come sistemi di involucro attivo capaci di integrare il miglioramento energetico e la trasformazione dei prospetti dell'edificio. Il lavoro si inserisce inoltre all'interno dei principi promossi dal **New European Bauhaus**, che invita a coniugare sostenibilità, inclusione e bellezza, reinterpretando la transizione energetica non solo come sfida tecnica, ma come occasione culturale e sociale. In questo senso, la riqualificazione energetica e la progettazione architettonica vengono lette come due momenti complementari di un medesimo processo.

Il patrimonio edilizio esistente, e in particolare quello residenziale condominiale europeo, diventa così un campo prioritario di intervento: da un lato per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione fissati dall'Unione Europea, dall'altro come laboratorio per sperimentare soluzioni architettoniche innovative, capaci di contribuire alla trasformazione del progetto urbano e territoriale.

L'obiettivo della tesi è verificare se tale sistema attivo possa integrare o, in alcuni casi, sostituire parzialmente le soluzioni di riqualificazione energetica tradizionali. In questa prospettiva, l'involucro non viene più considerato soltanto come elemento passivo di isolamento, ma come dispositivo capace di controllare la ventilazione, sfruttare la radiazione solare e contribuire al miglioramento energetico e architettonico dell'edificio.

Tale ipotesi viene verificata attraverso il caso studio analizzato e mediante una valutazione della prestazione energetica condotta con **Edilclima EC700** secondo la metodologia **UNI/TS 11300**.

01.

INTRODUZIONE

1.1 QUADRO NORMATIVO EUROPEO E NAZIONALE

1.1.1 DIRETTIVA (UE) 2024/1275

Il quadro normativo europeo e nazionale in materia di prestazione energetica e diagnosi degli edifici definisce gli strumenti e gli obiettivi fondamentali per la riqualificazione del patrimonio edilizio residenziale.

¹ Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 24 aprile 2024, sulla prestazione energetica nell'edilizia, rifusione della precedente disciplina EPBD e aggiorna il quadro europeo in materia di edifici a emissioni zero, ristrutturazioni e decarbonizzazione del parco edilizio.

La Direttiva (UE) 2024/1275, nota come “Direttiva Case Green”, ridefinisce la prestazione energetica degli edifici stabilendo obiettivi vincolanti di riduzione dei consumi di energia primaria.¹ In linea con la **EPBD** (Energy Performance of Building Directive), la Direttiva mira a ridurre progressivamente le emissioni di gas serra e i consumi energetici nel settore edilizio entro il **2030**, con l'obiettivo di raggiungere la neutralità climatica entro il **2050** (art. 9).

² La Direttiva (UE) 2024/1275 prevede, per il parco immobiliare residenziale, traiettorie progressive di riduzione del consumo medio di energia primaria, lasciando agli Stati membri il compito di definire misure nazionali coerenti con tali obiettivi.

Per quanto riguarda le ristrutturazioni (art. 3), l'obiettivo è trasformare il parco immobiliare in edifici decarbonizzati e ad alta efficienza energetica entro il 2050. In particolare, per gli edifici residenziali è prevista una riduzione dell'uso di energia primaria rispetto al 2020 di almeno il 16% entro il 2030 e di almeno il 20-22% entro il 2035.² Relativamente alle caldaie a gas (art. 17), gli Stati membri devono predisporre piani dettagliati per l'eliminazione graduale dei combustibili fossili nel settore del riscaldamento e del raffreddamento, con l'obiettivo finale di eliminare completamente le caldaie alimentate da tali combustibili entro il **2040**.

³ Il passaporto di ristrutturazione è uno strumento volontario o progressivamente implementabile dagli Stati membri.

Infine, il concetto di **passaporto di ristrutturazione**³ (art. 12) dovrà essere implementato entro il 29/05/2026. Tale passaporto rappresenta una **tabella di marcia per la ristrutturazione** degli edifici e deve includere informazioni sulla prestazione energetica attuale, sulle fasi di miglioramento, sull'eliminazione dei combustibili fossili, sul potenziale collegamento a sistemi di teleriscaldamento o teleraffrescamento, sulla produzione e autoconsumo di energia rinnovabile stimati, sulle opzioni per aumentare la circolarità dei materiali e sui benefici in termini di salute, comfort e adattabilità climatica.

1.1.2 DIRETTIVA (UE) 2023/1791

La **Direttiva (UE) 2023/1791**⁴ sull'efficienza energetica rafforza l'importanza della riduzione dei consumi energetici negli edifici e promuove il principio secondo cui l'efficienza energetica deve essere considerata una priorità negli interventi di trasformazione e riqualificazione. Pur non introducendo un obbligo di utilizzo della diagnosi energetica per gli edifici residenziali privati, la direttiva conferma la necessità di utilizzare strumenti di valutazione capaci di orientare le scelte progettuali e individuare soluzioni efficaci per il miglioramento delle prestazioni energetiche.

⁴ Il principio “energy efficiency first”, presente all'interno della direttiva, orienta le scelte energetiche verso la riduzione della domanda prima dell'incremento della produzione.

All'interno di questo quadro si inseriscono anche gli standard tecnici europei per il calcolo della prestazione energetica degli edifici. La norma **EN ISO 52016-1:2017**, recepita in Italia come **UNI EN ISO 52016-1:2018**, definisce metodi di calcolo utili per stimare i fabbisogni energetici per il riscaldamento e il raffrescamento, le temperature interne e i carichi termici dell'edificio. Tali valutazioni possono essere svolte con metodi mensili o orari, permettendo un'analisi più accurata del comportamento energetico dell'edificio nel tempo.

Il riferimento a queste metodologie risulta importante per il presente lavoro, poiché consente di analizzare l'edificio non soltanto attraverso le caratteristiche statiche dell'involucro, ma anche in relazione ai fabbisogni energetici, alla ventilazione e al comportamento degli ambienti interni. Nel caso studio, la valutazione della prestazione energetica viene condotta mediante il software Edilclima **EC700**⁵, secondo la metodologia **UNI/TS 11300**, con l'obiettivo di confrontare lo stato attuale e ante dell'edificio con lo scenario di progetto proposto.

⁵ Software tecnico per il calcolo della prestazione energetica degli edifici e per la redazione degli Attestati di Prestazione Energetica.

1.1.3 LEGISLAZIONE NAZIONALE

In Italia, il **D.Lgs. 192/2005** e successive modifiche costituisce il principale riferimento normativo per la prestazione energetica degli edifici e introduce l'Attestato di Prestazione Energetica (APE)⁶ come documento ufficiale di certificazione.

⁶ Documento che sintetizza la prestazione energetica dell'edificio mediante indici energetici e classe di efficienza.

⁷ Il decreto recepisce la Direttiva 2006/32/CE e definisce il quadro relativo a servizi energetici, ESCO, diagnosi energetica e misurazione dei risparmi.

Il **D.Lgs 115/2008**⁷ contribuisce inoltre a rafforzare il quadro nazionale dell'efficienza energetica, introducendo strumenti e definizioni legati ai servizi energetici.

Un riferimento centrale del quadro nazionale è rappresentato dal **D.M. 26 giugno 2015**, noto come **Decreto Requisiti Minimi**, che definisce le metodologie di calcolo della prestazione energetica e i requisiti minimi da rispettare negli edifici di nuova costruzione e negli interventi sugli edifici esistenti. Tale decreto è stato successivamente aggiornato dal **D.M. 28 ottobre 2025**, che conferma la necessità di adeguare le verifiche energetiche agli obiettivi europei più recenti.

⁸ La RED III corrisponde alla Direttiva (UE) 2023/2413 e aggiorna il quadro europeo relativo alla promozione dell'energia da fonti rinnovabili.

A completamento del quadro normativo, il **D.Lgs. 9 gennaio 2026**, n. 5 recepisce la **Direttiva RED III**⁸ e aggiorna l'**Allegato III** del **D.Lgs. 199/2021**, relativo agli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili negli edifici. Il decreto riguarda gli edifici di nuova costruzione, gli edifici esistenti sottoposti a ristrutturazioni importanti e gli interventi di ristrutturazione dell'impianto termico, introducendo specifiche quote di copertura dei consumi mediante impianti alimentati da fonti rinnovabili.

Questo aggiornamento è rilevante per la presente ricerca perché conferma una direzione chiara: la riqualificazione energetica non può più limitarsi alla sola riduzione delle dispersioni dell'involucro, ma deve essere applicata attraverso un processo integrato tra prestazione energetica, impianti, ventilazione e utilizzo delle risorse disponibili in sito. In questa prospettiva, il **sistema di facciata attiva** analizzato nella tesi si inserisce come possibile strategia complementare agli interventi tradizionali, valorizzando la radiazione solare e il controllo dei flussi d'aria come parte del comportamento energetico dell'edificio.

⁹ Per l'edilizia, il riferimento principale è il **D.M. 23 giugno 2022**, relativo ai criteri ambientali minimi per progettazione e lavori.

L'adozione dei **Criteri Ambientali Minimi (CAM)**⁹, soprattutto negli appalti pubblici e in alcune misure incentivanti, completa il quadro nazionale orientando il settore edilizio verso una maggiore attenzione alla sostenibilità dei materiali, alla riduzione degli impatti ambientali e all'ottimizzazione delle risorse lungo il ciclo di vita dell'edificio.

1.2 NEW EUROPEAN BAUHAUS

Il **New European Bauhaus** (NEB) è un'iniziativa dell'Unione Europea volta a coniugare sostenibilità ambientale, estetica e inclusione sociale negli spazi costruiti. Ispirata al movimento Bauhaus del XX secolo, il NEB promuove progetti che integrino innovazione tecnologica, design accessibile e materiali sostenibili, creando ambienti urbani e architetture resilienti e a misura d'uomo.

L'obiettivo principale è supportare la transizione verso un'economia climatica neutra, incentivando la collaborazione tra architetti, ingegneri, designer, cittadini e istituzioni. Il **NEB** si articola in tre principi chiave: **sostenibilità** (riduzione dell'impatto ambientale), **bellezza** (qualità estetica e culturale) e **inclusione** (accessibilità e partecipazione della comunità).

In linea con il presente lavoro di tesi all'interno della bussola NEB è stato individuato il principio della sostenibilità scandito da tre livelli di ambizione¹⁰, poiché attraverso quest'ultimo si misura la capacità di preservazione e il prolungamento dell'usabilità. Le tre ambizioni diventano parte integrante del processo di ideazione dell'intervento.

¹⁰ I livelli di ambizione della NEB Compass servono a distinguere approcci di base, circolari e rigenerativi nella valutazione del progetto.

Ambizione I: mira al riutilizzo a fine vita dei prodotti edilizi così da ridurre gli impatti ambientali favorendo adattabilità e riciclabilità, considerando l'intera scala come un prodotto in grado di ridurre al minimo utilizzo di energia, materiali e risorse.

Ambizione II: l'obiettivo è chiudere il ciclo produttivo lineare favorendo quello circolare azzerando quote di inquinamento, tutti gli attori del processo vengono così integrati nel ciclo di progettazione, produzione, utilizzo e smaltimento.

Ambizione III: Un progetto sostenibile mira a restituire più di quando prende, incentivando l'espansione della natura. Si parla di sostenibilità rigenerativa la quale influenza la visione del mondo, comportamenti e percezione degli spazi, è il posizionamento di un progetto all'interno di un ecosistema considerandone tempo, spazio, biodiversità e risorse naturali.

¹¹ Nel NEB, “beautiful” non riguarda solo l’aspetto formale, ma anche qualità dell’esperienza, relazione con il luogo e valore culturale.

Il NEB inoltre ha la volontà di trovare un nuovo gusto estetico, il quale si traduce come un’opportunità di ridisegnare o ripensare una nuova tipologia di intervento architettonico.

All’interno della **bussola NEB** è stato selezionato come altro principio fondativo della progettazione la **bellezza** ¹¹. In questo il New European Bauhaus mette al centro il principio della bellezza anch’esso costituito da tre livelli di ambizione. Non come gusto estetico fine a sé stesso ma come un insieme di diversi autori che investono sensibilità collettiva, intelligenza e competenze nella creazione di un’esperienza positiva.

Un progetto attento al proprio contesto e ai suoi utenti incoraggia la cura reciproca e può diventare un potente motore di cambiamento.

Ambizione I: l’attivazione del contesto gioca un aspetto fondamentale per promuovere consapevolezza del luogo e del patrimonio in tutta la sua diversità al contempo abbracciando una propria estetica.

Ambizione II: L’aumento delle interazioni sociali significative rafforza un senso di appartenenza, il progetto favorisce così apertura e cura reciproca.

Ambizione III: Un progetto bello permette la creazione e la reinvenzione dei luoghi degli stili di vita e delle comunità con cui ci identifichiamo, qui l’integrazione del mondo non umano può generare un’esperienza significativa di un noi più ampio. Si aspira ad anticipare trasformazioni future e può generare un movimento duraturo.

1.3 SUPERBONUS

L’esperienza italiana del **Superbonus 110%**, introdotto con il **D.L. 34/2020**, ha segnato una fase cruciale nel processo di efficientamento energetico del patrimonio edilizio nazionale.

Attraverso la detrazione fiscale maggiorata, il legislatore ha incentivato la realizzazione di interventi di isolamento termico, sostituzione di impianti di climatizzazione e miglioramento complessivo della prestazione energetica degli edifici. La misura ha avuto il merito di attivare una filiera tecnico-industriale specializzata e di stimolare un'ampia domanda di riqualificazione.

Tuttavia, le sue logiche e i suoi parametri tecnici si rivelano oggi parzialmente incompatibili con la nuova architettura normativa europea introdotta dalla **Direttiva (UE) 2024/1275 – EPBD “Case Green”**.

1.3.1 EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA

Il **Superbonus**, in origine, prevedeva una detrazione del **110%** delle spese sostenute, rappresentando uno dei più importanti strumenti di rilancio per il settore edilizio e per la riqualificazione del patrimonio immobiliare italiano.

Per poter accedere al Superbonus, era necessario rispettare una serie di requisiti tecnici e soggettivi.

Tra i principali:

- L'intervento doveva garantire il miglioramento di almeno due classi energetiche dell'edificio (oppure il conseguimento della classe energetica più alta possibile), da dimostrare tramite **APE** ante e post-intervento;
- Gli immobili dovevano essere esistenti e regolarmente accatastati;
- I lavori dovevano rientrare tra gli interventi **trainanti**¹² e, solo in presenza di questi, era possibile aggiungere gli interventi trainati (come infissi, fotovoltaico o colonnine di ricarica);
- Le spese dovevano essere asseverate da tecnici abilitati, che certificavano la congruità dei costi e la conformità alle norme vigenti;
- I beneficiari potevano essere persone fisiche, condomini, cooperative, IACP e altri soggetti pubblici o privati con diritto reale sull'immobile.

¹² Gli interventi trainanti comprendono isolamento termico dell'involucro, sostituzione degli impianti di climatizzazione e interventi antisismici.

Negli anni successivi, la norma è stata più volte modificata, le **Leggi di Bilancio 2021 e 2022** hanno prorogato il beneficio, introdotto la **CILA-Superbonus** per semplificare le pratiche edilizie e ampliato gli

interventi ammessi, includendo anche quelli per il superamento delle barriere architettoniche.

Dal 2022, con l'introduzione dell'articolo 119-ter, è stata riconosciuta una detrazione del **75%** per le spese relative all'eliminazione delle barriere architettoniche, con massimali di spesa variabili a seconda del tipo di edificio.

Con il **Decreto Salva Superbonus** (D.L. 212/2023) sono state poi introdotte misure urgenti per gestire la transizione del 110%, regolando in modo più rigoroso la cessione del credito e lo sconto in fattura, soprattutto nelle zone sismiche.

La **Legge di Bilancio 2025** (Legge 207/2024) ha ridotto l'incentivo, portandolo al **65%** per il 2025, applicabile solo ai lavori avviati entro il 15 ottobre 2024, mentre il **D.L. 95/2025** ha previsto una proroga straordinaria fino al 2026 per i comuni colpiti dai terremoti del Centro Italia, mantenendo il 110% ma solo in presenza di cessione del credito o sconto in fattura.

1.3.2 VANTAGGI E CRITICITA' DEL SUPERBONUS 110% NEL QUADRO DELLA TRANSIZIONE ENERGETICA

Il **Superbonus 110%** ha avuto il merito di rendere economicamente accessibili interventi di riqualificazione energetica che, in assenza di un incentivo così rilevante, sarebbero risultati difficilmente sostenibili per molti proprietari. La misura ha favorito una maggiore consapevolezza sul tema dell'efficienza energetica, stimolando il ricorso a soluzioni tecniche consolidate come l'isolamento a cappotto, la sostituzione degli infissi e l'ammodernamento degli impianti termici. In questo senso, il Superbonus ha rappresentato una tappa importante nel processo di miglioramento prestazionale del patrimonio edilizio esistente.

Uno dei principali punti di forza della misura è stato il suo carattere operativo e immediatamente applicabile. Il requisito del miglioramento minimo di due classi energetiche ha fornito un obiettivo chiaro e misurabile, mentre il riferimento ai **Criteri Ambientali Minimi** ha introdotto una prima attenzione alla qualità ambientale dei materiali impiegati.

Nel contesto 2020-2022, tali condizioni hanno permesso di avviare un numero significativo di interventi, contribuendo alla riduzione dei consumi energetici e al miglioramento del comfort abitativo, soprattutto durante la stagione invernale.

Tuttavia, accanto a questi aspetti positivi, emergono alcune criticità strutturali. Il Superbonus si è fondato prevalentemente su un approccio incrementale, orientato al miglioramento delle prestazioni energetiche attraverso interventi puntuali, più che su una riconversione complessiva del sistema edificio-impianto.

Il raggiungimento del salto di due classi energetiche ha spesso costituito l'obiettivo principale dell'intervento, senza necessariamente produrre un reale cambio di paradigma energetico.

In molti casi, infatti, gli edifici riqualificati sono rimasti dipendenti dal gas metano e da tecnologie basate sulla combustione, risultando solo parzialmente coerenti con gli obiettivi europei di decarbonizzazione e neutralità climatica.

L'intervento simbolo del Superbonus è stato il **cappotto termico**, divenuto una delle soluzioni più diffuse per la riduzione delle dispersioni attraverso l'involucro opaco. Il cappotto agisce secondo una logica di isolamento passivo: riduce la trasmittanza termica delle pareti, limita le perdite di calore durante la stagione invernale e contribuisce al miglioramento del comfort interno. Per questi motivi ha rappresentato una misura efficace e facilmente riconoscibile, capace di incidere in modo significativo sul fabbisogno energetico degli edifici esistenti.

Nonostante ciò, l'evoluzione del quadro climatico e normativo evidenzia i limiti di un approccio fondato quasi esclusivamente sull'aumento dello spessore isolante.

Il cappotto termico tradizionale nasce infatti per rispondere soprattutto alla domanda di **riscaldamento invernale**, in un contesto climatico relativamente stabile. Oggi, invece, l'aumento delle temperature medie, l'intensificazione dell'irraggiamento solare e la maggiore frequenza delle ondate di calore impongono di considerare anche il comportamento estivo dell'edificio. Un involucro **fortemente isolato**, ma privo di adeguate strategie di ventilazione, schermatura e smal-

timento del calore, può contribuire a fenomeni di surriscaldamento interno, soprattutto negli edifici privi di ventilazione meccanica controllata o di sistemi di ombreggiamento dinamico.

Dal punto di vista della **Direttiva (UE) 2024/1275**, l'efficienza energetica non può più essere interpretata soltanto come riduzione delle dispersioni termiche. La nuova prospettiva europea richiede una visione integrata, fondata sulla progressiva eliminazione dei combustibili fossili, sull'elettrificazione dei consumi, sull'impiego di pompe di calore, sull'integrazione di impianti fotovoltaici e sistemi di accumulo, oltre che sulla gestione intelligente dell'energia.

In questo scenario, l'involucro edilizio non è più concepito come semplice barriera passiva, ma come interfaccia dinamica capace di dialogare con le condizioni climatiche esterne e con il sistema impiantistico dell'edificio.

Un'ulteriore criticità riguarda la sostenibilità ambientale dei materiali impiegati. Sebbene molti prodotti utilizzati negli interventi incentivati risultino conformi ai Criteri Ambientali Minimi, non sempre essi garantiscono prestazioni soddisfacenti in termini di durabilità, riciclabilità e riduzione del carbonio incorporato. L'uso diffuso di isolanti sintetici derivati dal petrolio, come EPS, XPS e poliuretani, pone questioni legate al fine vita dei materiali, alla loro riciclabilità e all'impatto ambientale complessivo. Le strategie europee sull'economia circolare orientano invece il settore verso materiali naturali, riciclabili e a basso contenuto di **carbonio incorporato**¹³, come fibre vegetali, canapa, calce-canapulo, lana di roccia o sistemi a base legno.

¹³ Il carbonio incorporato comprende le emissioni associate a produzione, trasporto, posa, manutenzione e fine vita dei materiali edilizi.

Alla luce di queste considerazioni, il Superbonus può essere interpretato come una misura fondamentale ma incompleta. Da un lato, ha consentito di avviare una stagione di riqualificazione energetica su larga scala; dall'altro, non sempre ha favorito una trasformazione profonda e sistemica del patrimonio edilizio. Il rischio è che molti edifici riqualificati risultino migliori rispetto alla condizione di partenza, ma non pienamente allineati alle traiettorie di decarbonizzazione, resilienza climatica ed elettrificazione delineate dalle politiche europee.

In conclusione, il Superbonus ha rappresentato una tappa importante nel percorso di efficientamento energetico del patrimonio edilizio italiano, ma anche un'occasione solo parzialmente colta.

La sfida dei prossimi anni sarà superare il modello dell'intervento isolato e passare a una logica di **riqualificazione integrata**¹⁴, capace di combinare isolamento, ventilazione, schermature, produzione da fonti rinnovabili, accumulo e gestione intelligente dell'energia. In questa prospettiva, il cappotto termico non deve essere abbandonato, ma integrato all'interno di sistemi di involucro più evoluti, adattivi e bioclimatici, in grado di rispondere non solo alla riduzione delle dispersioni invernali, ma anche alle nuove esigenze di comfort estivo, sostenibilità ambientale e neutralità climatica.

¹⁴ La riqualificazione integrata introduce il passaggio verso l'involucro attivo, sviluppato nei capitoli successivi attraverso i sistemi solari ad aria e la proposta Responsive Parasite.

02.

**METODI E
STRUMENTI
PER IL
CALCOLO**

Il presente capitolo definisce il metodo utilizzato per costruire la valutazione energetica dell'edificio e per leggere il confronto tra le diverse condizioni analizzate, inoltre in questa fase viene chiarito il procedimento seguito per impostare il calcolo e interpretarne gli esiti.

La metodologia adottata si basa sul confronto tra due modelli energetici: lo stato ante operam, riferito alla configurazione precedente agli interventi di riqualificazione, e lo stato attuale, corrispondente alla condizione successiva agli interventi realizzati. Il confronto tra questi due scenari permette di valutare in modo diretto l'effetto delle trasformazioni sull'involucro, sugli impianti e sugli indicatori energetici complessivi. L'analisi non viene impostata soltanto sulla variazione della classe energetica, ma anche sulla lettura di valori che concorrono alla formazione del fabbisogno energetico. In particolare, vengono considerate le dispersioni per trasmissione, le dispersioni per ventilazione, gli apporti solari e interni, il fabbisogno utile per il riscaldamento e l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile. Questa impostazione consente di comprendere quali componenti abbiano inciso maggiormente sul miglioramento prestazionale e quali aspetti rimangano ancora significativi nella prospettiva di ulteriori strategie progettuali.

2.1 CRITERIO DI CONFRONTO TRA SCENARI ENERGETICI

La scelta di lavorare su due modelli distinti permette di confrontare in modo ordinato le variazioni prodotte dagli interventi realizzati. In particolare, consente di leggere la riduzione delle dispersioni dell'involucro, il cambiamento dei fabbisogni energetici e il miglioramento degli indici di prestazione globale.

Questo tipo di confronto risulta utile perché considera l'edificio come un sistema energetico composto da più parti: involucro opaco, serramenti, impianti, ventilazione e apporti gratuiti.

La valutazione degli scenari consente quindi di distinguere il contributo dei singoli elementi e di individuare le componenti che incidono maggiormente sul bilancio complessivo.

2.2 MODELLAZIONE MEDIANTE EDILCLIMA EC700

La valutazione energetica è stata condotta mediante Edilclima EC700, software utilizzato per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici e per la redazione degli Attestati di Prestazione Energetica.

Il programma consente di costruire il modello energetico dell'edificio a partire dagli input geometrici, stratigrafici e impiantistici, restituendo gli indicatori necessari alla valutazione della prestazione energetica.

Il calcolo è stato sviluppato secondo la metodologia delle **UNI/TS 11300**, riferimento tecnico nazionale per la determinazione della prestazione energetica degli edifici. Tale impostazione consente di valutare il fabbisogno energetico dell'edificio in condizioni standardizzate e di confrontare scenari differenti attraverso parametri omogenei.

La modellazione dello stato ante operam e dello stato attuale permette infatti di mettere in relazione le modifiche introdotte sull'edificio con la variazione dei principali indicatori energetici.



Figura 2.1 — Modellazione energetica dell'edificio in Edilclima EC700. Schermata del modello tridimensionale utilizzato per la costruzione degli scenari energetici di confronto.
Fonte: elaborazione propria mediante Edilclima EC700.

2.3 INDICATORI CONSIDERATI NELL'ANALISI

Per interpretare correttamente il confronto tra gli scenari, sono stati considerati diversi indicatori energetici. Le dispersioni per trasmissione descrivono il calore disperso attraverso le strutture dell'involucro, come pareti, solai, coperture e serramenti. Questo valore è direttamente influenzato dalla qualità termo-fisica dei componenti edilizi e dagli interventi di isolamento.

Le dispersioni per ventilazione descrivono invece il calore disperso a causa del ricambio d'aria.

Questo parametro assume un ruolo importante perché, dopo il miglioramento dell'involucro opaco e trasparente, la ventilazione può rappresentare una quota ancora significativa del bilancio energetico. La distinzione tra dispersioni per trasmissione e dispersioni per ventilazione consente quindi di leggere con maggiore precisione gli effetti degli interventi e le possibili direzioni di miglioramento.

Accanto alle dispersioni vengono considerati gli apporti gratuiti, suddivisi in apporti solari e apporti interni.

Gli apporti solari derivano dalla radiazione incidente sull'edificio e dipendono dall'orientamento, dalle superfici trasparenti e dalle condizioni di ombreggiamento.

Gli apporti interni sono invece legati alla presenza degli occupanti, alle apparecchiature e alle sorgenti di calore presenti negli ambienti.

Il fabbisogno di energia utile per il riscaldamento, indicato come **QH,nd**, rappresenta il risultato del bilancio tra dispersioni e apporti. Questo indicatore permette di valutare quanta energia sia necessaria per mantenere le condizioni interne di progetto durante la stagione di riscaldamento.

Infine, viene considerato l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile, **EPgl,nren**, utilizzato per la determinazione della classe energetica dell'edificio.

Tale indicatore consente di sintetizzare la prestazione complessiva del sistema edificio-impianto e di confrontare in modo immediato lo stato ante operam con lo stato attuale.

2.4 CRITERI DI LETTURA DEI RISULTATI

La lettura dei risultati viene impostata su due livelli. Il primo riguarda il confronto sintetico tra le classi energetiche e gli indici globali, utile per valutare il miglioramento complessivo dell'edificio. Il secondo riguarda invece l'analisi delle singole componenti del bilancio energetico, necessaria per comprendere quali grandezze abbiano inciso maggiormente sulla variazione della prestazione.

Questa doppia lettura è importante perché un miglioramento della classe energetica non descrive da solo il comportamento dell'edificio. Per comprendere realmente gli effetti dell'intervento è necessario osservare come cambiano le dispersioni per trasmissione, quanto rimangono rilevanti le dispersioni per ventilazione e quale ruolo assumono gli apporti gratuiti.

Nel caso della presente ricerca, questa impostazione metodologica consente di collegare la valutazione energetica dell'edificio alla successiva riflessione progettuale sull'involucro attivo. Il confronto tra stato ante operam e stato attuale non viene quindi considerato come un risultato conclusivo, ma come una base di lettura per individuare ulteriori possibilità di intervento.

03.

CASO STUDIO

3.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

¹ Dato assunto dal software Edilclima EC700: Teramo, zona climatica D, 1.834 gradi-giorno.

² Le ostruzioni esterne incidono sugli apporti solari disponibili e sulla valutazione dell'esposizione dei fronti dell'edificio.

Il fabbricato oggetto del presente caso studio è situato in **Abruzzo**, nella località di **Colleatterato Basso**, in provincia di **Teramo** ¹. La selezione dell'edificio è stata determinata da una serie di fattori ritenuti particolarmente significativi ai fini dell'analisi.

In primo luogo, esso si colloca in un contesto in cui le ostruzioni esterne ², quali edifici limitrofi o vegetazione, non risultano particolarmente influenti. Tale condizione consente di ridurre le interferenze dovute all'ombreggiamento e di valutare in maniera più attendibile le prestazioni energetiche del fabbricato, soprattutto in relazione all'esposizione solare.

Inoltre, l'edificio presenta un orientamento favorevole e una buona accessibilità alla radiazione solare, risultando idoneo all'applicazione della metodologia di studio adottata.

Come mostrato nella **Figura 3.1** il fabbricato si inserisce in un contesto urbano a bassa densità, caratterizzato dalla presenza di spazi aperti e da un'esposizione relativamente libera lungo i principali fronti.



Figura 3.1 — Inquadramento satellitare dell'edificio oggetto di studio. Individuazione del fabbricato nel contesto urbano di Colleatterato Basso, Teramo.

Fonte: elaborazione propria su base satellitare.

Dal punto di vista architettonico, il fabbricato è riconducibile a una tipologia diffusa del patrimonio edilizio residenziale nazionale. La configurazione planimetrica regolare e semplificata ne facilita l'analisi e rafforza la sua valenza come caso studio, poiché consente di valutare con maggiore chiarezza gli effetti degli interventi di riqualificazione energetica.

3.2 CARATTERIZZAZIONE DELL'EDIFICIO

L'edificio oggetto di studio è un fabbricato residenziale plurifamiliare su **pilotis**³, realizzato intorno al 2008, costituito da due corpi scala a servizio delle unità abitative e sviluppato su sei piani fuori terra. Dal punto di vista planimetrico, esso presenta una configurazione regolare e sostanzialmente simmetrica, organizzata attorno ai due nuclei distributivi principali.

³ La presenza di pilotis può aumentare le superfici disperdenti del piano sovrastante, soprattutto se l'intradosso è esposto o confinante con spazi non climatizzati.

La **Figura 3.2** riporta lo schema del piano tipo, evidenziando la presenza dei due corpi scala, denominati Scala A e Scala B, attorno ai quali si distribuiscono le unità residenziali. Tale configurazione consente una lettura chiara dell'impianto distributivo dell'edificio e costituisce la base per le successive analisi energetiche e progettuali.



*Figura 3.2 — Schema della pianta del piano tipo. Individuazione dei corpi scala A e B e organizzazione distributiva delle unità residenziali.
Fonte: elaborazione propria.*

STATO PRE RETROFIT

Nello stato pre retrofit, l'edificio presentava caratteristiche costruttive tipiche dell'epoca di realizzazione. Come mostrato nella **Figura 3.3**, il fabbricato si configura come edificio residenziale plurifamiliare su pilotis, con facciate caratterizzate da tamponamenti intonacati e balconi aggettanti riconoscibili lungo il prospetto.



*Figura 3.3 — Vista esterna dell'edificio nello stato pre retrofit.
Rilievo fotografico del prospetto principale prima degli interventi di riqualificazione energetica.
Fonte: rilievo fotografico dell'autore.*

Per quanto riguarda l'involucro opaco, il fabbricato è caratterizzato da una struttura portante a telaio in cemento armato, costituita da travi e pilastri, con tamponamenti in laterizio. La stratigrafia originaria, riportata nella **Figura 3.4**, è composta da intonaco interno, muratura in laterizio, pannello isolante in polistirolo e finitura esterna.

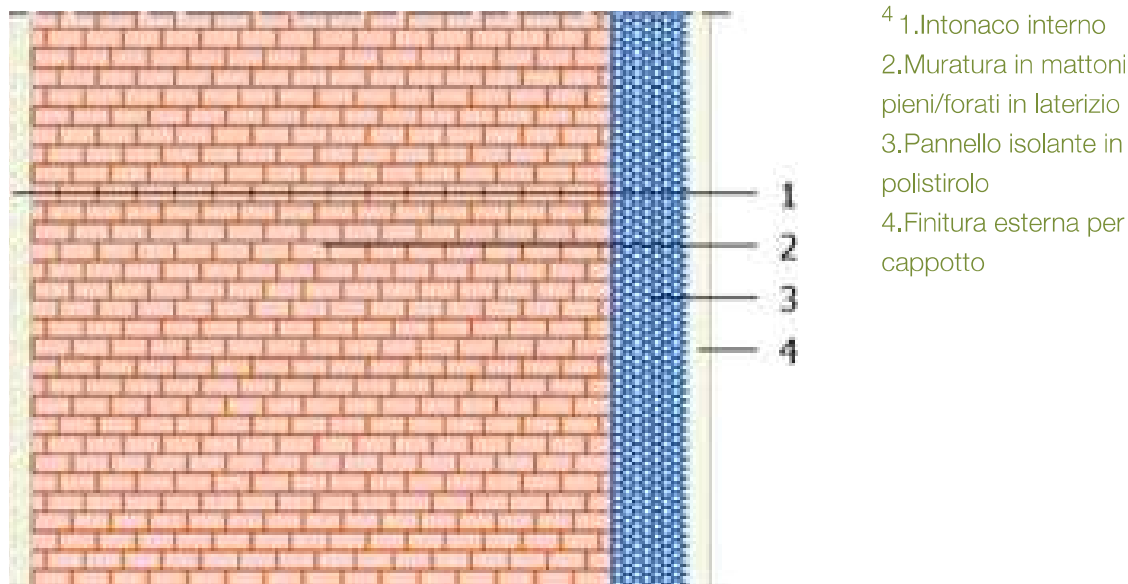


Figura 3.4 — Stratigrafia dell'involucro opaco nello stato pre retrofit.

*Composizione della parete esistente con muratura in laterizio e pannello isolante.*⁴

Fonte: Relazione tecnica ex Legge 10 elaborata mediante TerMus

Per quanto concerne l'involucro trasparente, sono presenti infissi in legno con doppio vetro, dotati di sistemi di oscuramento del tipo a cassonetto.

Per quanto riguarda l'impianto termico, erano installate caldaie tradizionali da 24 kW, con terminali di emissione costituiti da radiatori, posizionati prevalentemente in corrispondenza delle pareti perimetrali.

STATO ATTUALE (POST-INTERVENTO SUPERBONUS 110%)

Nello stato attuale, a seguito degli interventi di riqualificazione energetica realizzati nell'ambito del Superbonus 110%, l'edificio mantiene invariata la configurazione geometrica e volumetrica originaria. Tuttavia, l'adozione di soluzioni tecnologiche sull'involucro opaco, in particolare mediante l'applicazione del sistema di isolamento a cappotto Isolareflex, ha determinato una significativa trasformazione dell'aspetto dei prospetti, rendendoli più uniformi e caratterizzati da una nuova finitura superficiale.

Come si osserva nella **Figura 3.5**, il prospetto principale presenta oggi un'immagine più omogenea rispetto allo stato ante operam, con una maggiore continuità cromatica delle superfici esterne. Tale trasformazione rende evidente l'intervento di riqualificazione energetica sull'involucro edilizio, pur mantenendo inalterati l'impianto volumetrico e la configurazione generale dell'edificio.



Figura 3.5 — Vista esterna dell'edificio nello stato post operam. Rilievo fotografico del prospetto principale post interventi di riqualificazione energetica.

Fonte: rilievo fotografico dell'autore.

Il sistema di isolamento adottato è costituito da una controparete esterna composta da sottostruttura metallica, strato isolante termo-riflettente multistrato, intercapedini d'aria e lastra esterna di rivestimento. La **Figura 3.6** riporta uno schema esemplificativo dei principali componenti del sistema Isolareflex.

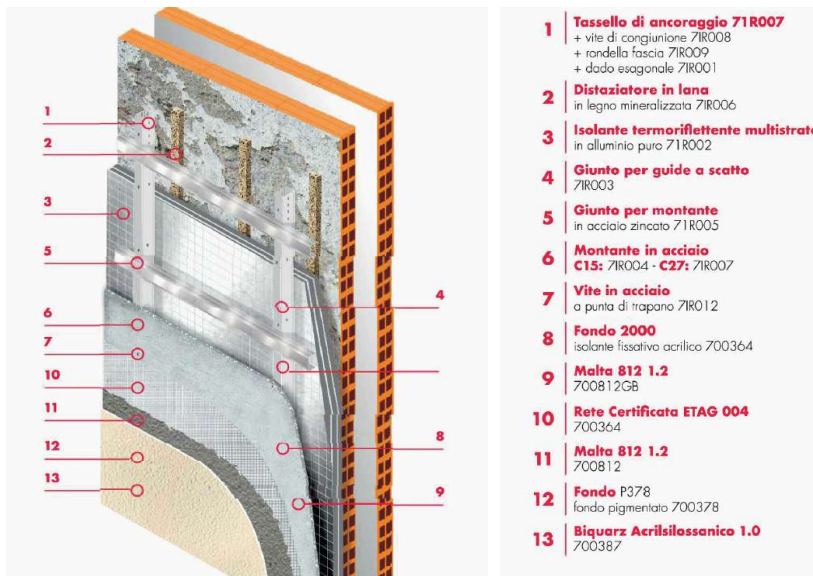


Figura 3.6 — Componenti del sistema di isolamento a cappotto Isolareflex. Schema degli elementi costitutivi del sistema con sottostruttura, isolante multistrato e rivestimento esterno.

Fonte: documentazione tecnica Isolareflex.

INTERVENTI ATTUATI:

La stratigrafia dell'involucro opaco a seguito dell'intervento è riportata nella **Figura 3.7** e può essere letta come una soluzione a secco stratificata, nella quale l'isolamento termo-riflettente e le intercapedini d'aria contribuiscono al miglioramento della prestazione termica complessiva della parete.

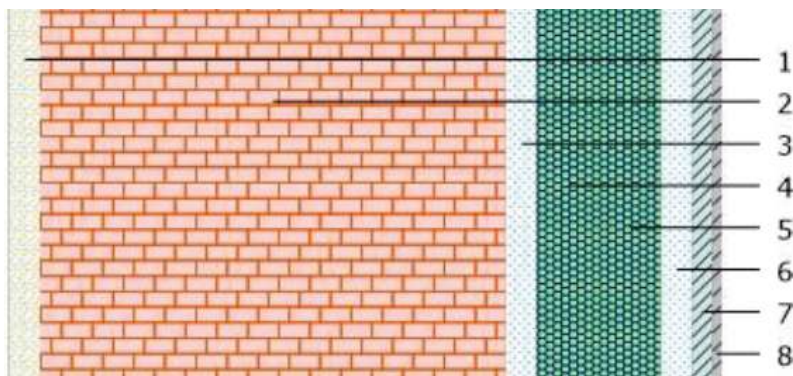


Figura 3.7 — Stratigrafia dell'involucro opaco nello stato post-intervento. Composizione della parete riqualificata con sistema Isolareflex e rivestimento esterno.⁵

Fonte: Relazione tecnica ex Legge 10 elaborata mediante TerMus.

- 5 1. Intonaco interno
2. Muratura in mattoni pieni/forati in laterizio
3. Intercapedine d'aria non ventilata
4. Isolareflex Over-foil multistrato 19 superquilt
5. Isolareflex Over-foil multistrato 19 superquilt
6. Intercapedine d'aria non ventilata
7. Lastra di rivestimento esterna in fibrocemento (sistema Isolareflex)
8. Strato di rasatura e finitura superficiale

⁶ Il trattamento basso emissivo riduce gli scambi radiativi tra le superfici vetrate, migliorando la prestazione termica del serramento.

Per quanto riguarda l'involucro trasparente, gli infissi sono stati sostituiti con serramenti in PVC dotati di vetrocamera tripla a bassa emissività ⁶.

Per quanto concerne l'impianto termico, sono state installate caldaie a condensazione da 24 kW a servizio delle singole unità abitative.

Nel complesso, gli interventi realizzati hanno determinato un significativo miglioramento delle prestazioni termiche dell'edificio, grazie all'integrazione di nuovi strati isolanti, intercapedini d'aria, serramenti più performanti e generatori di calore più efficienti.

Tali interventi hanno inciso principalmente sulla riduzione delle dispersioni attraverso l'involucro e sul miglioramento del comportamento energetico complessivo del sistema edificio-impianto.

3.3 CONFRONTO TRA STATO PRE RETROFIT E STATO ATTUALE

Al fine di evidenziare gli effetti degli interventi di riqualificazione energetica, si riporta di seguito un confronto tra lo stato pre retrofit e lo stato attuale dell'edificio, con particolare riferimento alle caratteristiche dell'involucro edilizio e degli impianti.

ANALISI DATI INVOLUCRO OPACO

Per quanto riguarda l'involucro opaco, la **Tabella 3.1** mette a confronto i principali parametri termo-fisici nello stato ante operam e nello stato successivo agli interventi realizzati mediante Superbonus 110%.

DATI	PRE RETROFIT	SUPERBONUS 110%
Trasmittanza termica globale [W/m ² K]	0.46	0.17
Resistenza termica globale [m ² K/W]	2.14	5.69
Massa superficiale globale [kg/m ²]	465.80	517.17
Capacità termica areica [kJ/m ² K]	53.43	53.25
Trasmittanza termica periodica [W/m ² K]	0.02	0.01
Fattore di attenuazione [-]	0.05	0.04
Sfasamento [h]	15.48	16.61

Tabella 3.1 — Prestazioni termo-fisiche dell'involucro opaco pre retrofit e post Superbonus 110%.

Confronto tra trasmittanza, resistenza termica, massa superficiale e parametri dinamici dell'involucro.

Fonte: elaborazione propria da dati Edilclima EC700.

Nello stato pre retrofit, pur in presenza di uno strato isolante, si riscontrano valori di trasmittanza termica relativamente elevati (0,46 W/m²K), non conformi agli attuali limiti normativi, evidenziando quindi prestazioni energetiche non ottimizzate. Tuttavia, si osserva un comportamento estivo soddisfacente, come indicato dal valore di sfasamento pari a 15,48 h.

Nello stato attuale, a seguito degli interventi di riqualificazione energetica, si registra una significativa riduzione della trasmittanza termica (0,17 W/m²K), accompagnata da un incremento della resistenza termica dell'involucro. Anche i **parametri dinamici**⁷ risultano migliorati, con un aumento dello sfasamento e una riduzione della trasmittanza termica periodica, a conferma di un comportamento più efficiente sia in regime invernale che estivo.

Nel complesso, l'intervento ha determinato un sensibile miglioramento delle prestazioni termo-fisiche dell'involucro, contribuendo alla riduzione dei fabbisogni energetici e al miglioramento del comfort interno.

⁷ Per parametri dinamici si intendono trasmittanza termica periodica, fattore di attenuazione e sfasamento, utilizzati per descrivere il comportamento della parete in regime termico variabile.

FABBISOGNI DI ENERGIA PRIMARIA

Attraverso l'analisi del fabbisogno energetico, è possibile valutare le prestazioni dell'edificio in termini di energia necessaria per il mantenimento delle condizioni di comfort interno.

Nel presente studio, tale analisi è stata condotta considerando sia lo stato pre retrofit sia lo stato post operam, al fine di evidenziare le variazioni dei consumi conseguenti agli interventi di riqualificazione energetica.

⁸ Dato assunto dal software Edilclima EC700: per Teramo, zona climatica D, il periodo ordinario di riscaldamento è compreso tra il 1° novembre e il 15 aprile.

Il bilancio energetico è stato determinato con riferimento alla stagione di riscaldamento, compresa tra il 1° novembre e il 15 aprile ⁸. La **Tabella 3.2** riporta il confronto tra dispersioni e apporti termici nei due scenari analizzati.

DISPERISIONI [kWh]	PRE RETROFIT	SUPERBONUS 110%
Dispersioni per trasmissione [Q _{h,tr}]	104.281	62.124
Dispersioni per ventilazione [Q _{h,ve}]	28.681	28.639
TOTALE [Q _{h,ht}]	140.203	94.656

APPORTI [kWh]	PRE RETROFIT	SUPERBONUS 110%
Apporti solari [Q _{sol}]	13.799	11.062
Apporti interni [Q _{int}]	47.083	47.064
Apporti TOTALI [Q _{gn}]	60.881	58.127

Tabella 3.2 — Dispersioni e apporti termici nella stagione di riscaldamento. Confronto tra stato pre retrofit e stato post Superbonus 110%.
Fonte: elaborazione propria da dati Edilclima EC700.

Dall'analisi delle dispersioni si osserva una significativa riduzione delle perdite per trasmissione, che passano da **104.281 kWh** nello stato pre retrofit a **62.124 kWh** nello stato attuale. Le dispersioni per ventilazione risultano invece pressoché invariate, indicando come gli interventi abbiano inciso principalmente sull'involucro edilizio.

Per quanto riguarda gli apporti, si registra una lieve diminuzione sia degli apporti solari sia di quelli interni, dovuta principalmente alla maggiore capacità dell'involucro di limitare gli scambi energetici con l'esterno.

La riduzione delle dispersioni si riflette direttamente sul fabbisogno di energia utile per il riscaldamento, riportato nella **Tabella 3.3**.

BILANCIO ENERGETICO [kWh]	PRE RETROFIT	SUPERBONUS 110%
Energia utile [Q _{h,nd}]	81.302	39.619

*Tabella 3.3 — Energia utile per il riscaldamento nella stagione invernale. Confronto tra stato pre retrofit e stato post Superbonus 110%.
Fonte: elaborazione propria da dati Edilclima EC700.*

Complessivamente, il fabbisogno di energia utile per il riscaldamento (Q_{h,nd}) si riduce in maniera significativa, passando da 81.302 kWh a 39.619 kWh.

Tale risultato evidenzia come gli interventi di riqualificazione energetica abbiano determinato una riduzione di circa il 50% del fabbisogno, principalmente grazie alla diminuzione delle dispersioni termiche attraverso l'involucro opaco e trasparente.

INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA

A completamento dell'analisi energetica dell'edificio, vengono presi in esame gli indici di prestazione energetica globale, che consentono di fornire una valutazione delle prestazioni complessive del sistema edificio-impianto.

Tali indicatori tengono conto dei fabbisogni energetici per i diversi servizi presenti, permettendo di esprimere in maniera unitaria il livello di efficienza dell'edificio, sia in termini di energia primaria non rinnovabile sia di quota di energia rinnovabile.

PRE RETROFIT Servizio	Ep nren [kWh/m²]	Ep,ren [kWh/m²]	Ep,tot [kWh/m²]
Riscaldamento	57,58	0,45	58,02
Acqua calda sanitaria	45,76	0,41	46,18
GLOBALE	103,34	0,86	104,20

*Tabella 3.4 — Indici di prestazione energetica nello stato pre retrofit. Valori di EP,nren, EP,ren ed EP,tot per riscaldamento, acqua calda sanitaria e prestazione globale.
Fonte: elaborazione propria da dati Edilclima EC700.*

SUPERBONUS 110% Servizio	Ep,nren [kWh/m ²]	Ep,ren [kWh/m ²]	Ep,tot [kWh/m ²]
Riscaldamento	20,64	0,20	20,84
Acqua calda sanitaria	18,64	0,04	18,68
GLOBALE	39,28	0,24	39,52

Tabella 3.5 — Indici di prestazione energetica nello stato post Superbonus 110%.

Valori di EP_{nren} , EP_{ren} ed EP_{tot} per riscaldamento, acqua calda sanitaria e prestazione globale.

Fonte: elaborazione propria da dati Edilclima EC700.

⁹ $EP_{gl,nren}$ indica la prestazione energetica globale non rinnovabile ed è il parametro di riferimento per la classe energetica dell'edificio.

¹⁰ La riduzione dell' $EP_{gl,nren}$ rispetto allo stato ante operam è pari a circa il 62%.

Dall'analisi dei dati si osserva una significativa riduzione dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile (**$EP_{gl,nren}$**)⁹, che passa da 103,34 kWh/m² anno nello stato ante operam a 39,28 kWh/m² anno¹⁰ nello stato attuale.

Tale diminuzione è principalmente riconducibile alla riduzione dei fabbisogni energetici per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria, conseguente agli interventi di riqualificazione dell'involucro edilizio e all'adozione di sistemi impiantistici più efficienti.

Parallelamente, si registra una riduzione anche della componente rinnovabile ($EP_{gl,ren}$), imputabile alla diminuzione complessiva dei consumi energetici dell'edificio.

ATTESTATO DI PRESTAZIONE ENERGETICA

A completamento dell'analisi energetica dell'edificio, vengono riportati gli Attestati di Prestazione Energetica relativi allo stato ante operam e allo stato attuale. Tali documenti consentono di fornire una valutazione delle prestazioni energetiche complessive del sistema edificio-impianto, attraverso l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile, **$EP_{gl,nren}$** , e la conseguente classificazione energetica dell'edificio.

L'**APE** permette infatti di esprimere, mediante un indicatore unificato, il livello di efficienza energetica dell'edificio, considerando i principali servizi energetici presenti e consentendo il confronto con i requisiti normativi vigenti.

Nel presente studio, il confronto tra stato ante operam e stato post operam consente di evidenziare il miglioramento prestazionale ottenuto a seguito degli interventi di riqualificazione energetica.

Come mostrato nella **Figura 3.8**, nello stato ante operam l'edificio presenta una classe energetica E, con un valore di $EP_{gl,nren}$ pari a $103,34 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$. Tale dato conferma una condizione energetica iniziale caratterizzata da consumi elevati e da prestazioni non ottimizzate del sistema edificio-impianto.

REGIONE ABRUZZO

ATTESTATO DI PRESTAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI

CODICE IDENTIFICATIVO: VALIDO FINO AL: 04/12/2035

DATI GENERALI

Destinazione d'uso
☒ Residenziale
☐ Non residenziale

Classificazione D.P.R. 412/93: E.1 (1)

Oggetto dell'attestato
☒ Intero edificio
☐ Unità immobiliare
☐ Gruppo di unità immobiliari

Numero di unità immobiliari di cui è composto l'edificio: 30

☐ Nuova costruzione
☐ Passaggio di proprietà
☐ Locazione
☐ Ristrutturazione importante
☐ Riqualificazione energetica
☒ Altro:

Dati identificativi

Regione: ABRUZZO
 Comune: Teramo
 Indirizzo: Via San Marco n.12...
 Piano:
 Interno:

Zona climatica: D
 Anno di costruzione: 2008

Superficie utile riscaldata (m²): 2296,81
 Superficie utile raffrescata (m²): 2296,81
 Volume lordo riscaldato (m³): 9392,01
 Volume lordo raffrescato (m³): 9392,01

Coord. GIS: 0,000000 N 0,000000 E

Comune catastale: L103
 Subaltermi: da a da a da a da a da a da a
 Altri subaltermi:

Servizi energetici presenti
☒ Climatizzazione invernale
☐ Climatizzazione estiva
☐ Ventilazione meccanica
☒ Prod. acqua calda sanitaria
☐ Illuminazione
☐ Trasporto di persone o cose

PRESTAZIONE ENERGETICA GLOBALE E DEL FABBRICATO

La sezione riporta l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile in funzione del fabbricato e dei servizi energetici presenti, nonché la prestazione energetica del fabbricato, al netto del rendimento degli impianti presenti.

Prestazione energetica del fabbricato

INVERNO	ESTATE

Prestazione energetica globale

EDIFICIO A ENERGIA QUASI ZERO

CLASSE ENERGETICA E

103,34 kWh/m²anno

Riferimenti

Gli immobili simili avrebbero in media la seguente classificazione:

Se nuovi: A1 (50,87)

Se esistenti:

Pag. 1

Figura 3.8 — Attestato di Prestazione Energetica nello stato pre retrofit. Classe energetica E ed $EP_{gl,nren}$ pari a $103,34 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$.

Fonte: Attestato di Prestazione Energetica elaborato mediante Edilclima

A seguito degli interventi di riqualificazione energetica, lo stato attuale dell'edificio evidenzia un significativo miglioramento della prestazione energetica complessiva.

Come riportato nella **Figura 3.9**, l'edificio raggiunge la classe energetica A2, con un valore di EP_{gl,nren} pari a 39,28 kWh/m² anno.

REGIONE ABRUZZO

ATTESTATO DI PRESTAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI

CODICE IDENTIFICATIVO: VALIDO FINO AL: 04/12/2035

DATI GENERALI

Destinazione d'uso
☒ Residenziale
☐ Non residenziale

Oggetto dell'attestato
☒ Intero edificio
☐ Unità immobiliare
☐ Gruppo di unità immobiliari

Classificazione D.P.R. 412/93: E.1 (1)

Numero di unità immobiliari di cui è composto l'edificio: 30

Dati identificativi

Regione: ABRUZZO
 Comune: Teramo
 Indirizzo: Via San Marco n.12-...
 Piano: ...
 Interno: ...
 Coord. GIS: 0,000000 N 0,000000 E

Zona climatica: D
Anno di costruzione: 2008

Superficie utile riscaldata (m²): 2293,45
Superficie utile raffrescata (m²): 2293,45
Volume lordo riscaldato (m³): 9644,76
Volume lordo raffrescato (m³): 9644,76

Comune catastale: L.103
Sezione: ...
Foglio: ...
Particella: ...

Servizi energetici presenti
☒ Climatizzazione invernale
☐ Climatizzazione estiva
☐ Ventilazione meccanica
☒ Prod. acqua calda sanitaria
☐ Illuminazione
☐ Trasporto di persone o cose

PRESTAZIONE ENERGETICA GLOBALE E DEL FABBRICATO

La sezione riporta l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile in funzione del fabbricato e dei servizi energetici presenti, nonché la prestazione energetica del fabbricato, al netto del rendimento degli impianti presenti.

Prestazione energetica del fabbricato

INVERNO

ESTATE

Prestazione energetica globale

EDIFICIO A ENERGIA QUASI ZERO

CLASSE ENERGETICA A2

39,28 kWh/m² anno

Riferimenti

Gli immobili simili avrebbero in media la seguente classificazione:

Se nuovi: A1 (56,81)

Se esistenti: ...

Figura 3.9— Attestato di Prestazione Energetica nello stato attuale.
 Classe energetica A2 ed EP_{gl,nren} pari a 39,28 kWh/m² anno.
 Fonte: Attestato di Prestazione Energetica elaborato mediante Edilclima

Il confronto tra i due attestati conferma quindi l'efficacia degli interventi realizzati, evidenziando una consistente riduzione dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile e un avanzamento significativo della classe energetica dell'edificio. Tale risultato risulta coerente con quanto emerso dalle precedenti analisi sui fabbisogni energetici e sulle prestazioni dell'involucro, confermando il contributo degli interventi alla riduzione dei consumi e al miglioramento complessivo delle prestazioni energetiche dell'edificio.

04.

**INVOLUCRO
ATTIVO PER IL
RETROFIT
ENERGETICO**

4.1 INTRODUZIONE SUL SISTEMA DI FACCIATA ATTIVA

Decarbonizzazione e Involucro Attivo: Verso un Retrofit Energetico Dinamico

Il percorso verso la decarbonizzazione del settore edilizio europeo richiede strategie di riqualificazione capaci di superare la sola riduzione delle dispersioni termiche. In questo quadro, l'involucro edilizio non può essere considerato esclusivamente come elemento passivo di separazione tra interno ed esterno, ma può assumere un ruolo più attivo nella gestione degli scambi energetici.

Tra le soluzioni sviluppate in questa direzione rientrano le facciate solari ad aria, o **Solar Air Heating Façades** (SAHF), sistemi in grado di sfruttare la radiazione solare incidente per preriscaldare l'aria all'interno di un'intercapedine ventilata. Il calore accumulato nella cavità può contribuire alla riduzione del fabbisogno di riscaldamento e, nei sistemi più evoluti, può essere gestito attraverso strategie di ventilazione naturale o meccanica.

L'interesse della presente ricerca non riguarda la sola dimostrazione dell'efficacia di tali sistemi, già analizzata in letteratura, ma la loro possibile applicazione nel retrofit del patrimonio edilizio esistente. In particolare, il capitolo indaga il passaggio da un involucro passivo a un sistema di facciata attiva, capace di integrare isolamento, captazione solare, ventilazione controllata e qualità architettonica del prospetto.

Accanto al comportamento invernale, legato al preriscaldamento dell'aria, viene considerato anche il ruolo delle facciate ventilate opache, o **Opaque Ventilated Façades**¹ (OVF), come strategia per la mitigazione del surriscaldamento estivo. L'obiettivo è quindi costruire un quadro tecnico di riferimento per interpretare **l'involucro come componente dinamico**, capace di rispondere in modo differenziato alle condizioni climatiche stagionali.

Il comportamento di questi sistemi non può tuttavia essere valutato soltanto nella stagione invernale. Durante il periodo estivo, la presenza di un'intercapedine ventilata può contribuire alla riduzione del surriscaldamento, favorendo l'asportazione del calore accumulato sulla superficie esterna della facciata.

¹ OVF indica una facciata opaca ventilata, nella quale l'intercapedine d'aria contribuisce all'asportazione del calore accumulato sul rivestimento esterno.

In questo ambito, lo studio di Fantucci, S., Serra, V., & Carbonaro, C. (2020), *An experimental sensitivity analysis on the summer thermal performance of an Opaque Ventilated Façade* (Energy and Buildings, 225, 110354), evidenzia come il flusso d'aria nella cavità svolge un ruolo importante nella mitigazione dei carichi termici estivi.

L'integrazione tra strategie SAHF e OVF consente quindi di interpretare l'involucro come un componente dinamico, capace di assumere comportamenti differenti in funzione della stagione.

Nei mesi freddi la facciata può contribuire al preriscaldamento dell'aria e alla riduzione del fabbisogno di riscaldamento. Nei mesi caldi, la ventilazione dell'intercapedine può favorire lo smaltimento del calore e limitare il rischio di surriscaldamento.

Questa doppia possibilità di funzionamento costituisce il riferimento teorico per le successive analisi sui sistemi di facciata attiva applicabili al retrofit energetico.

4.2 STRATEGIE DI FUNZIONAMENTO DELLE FACCIATE ATTIVE

4.2.1 SOLAR AIR HEATING FACADE (SAHF)

Sistema NATURAL WALL

All'interno delle strategie di involucro attivo, il sistema **Solar Air Heating Façade** (SAHF) rappresenta una soluzione orientata al recupero della radiazione solare e al preriscaldamento dell'aria.

Il principio di funzionamento si basa sulla presenza di uno strato esterno trasparente, di un'intercapedine ventilata e di un elemento assorbitore, capace di intercettare la radiazione solare e trasferire calore all'aria contenuta nella cavità.

In questo quadro si inserisce il sistema brevettato **NATURALWALL**, sviluppato dal Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino e descritto nello studio di Callegari, G., Spinelli, A., Bianco, L., Serra, V., & Fantucci, S. (2015), *NATURALWALL® – A solar timber façade system for building refurbishment: optimization process through in-field measurements* (Energy Procedia, 78, 291–296).

² I dati dimensionali del modulo sperimentale derivano dalla configurazione descritta nello studio sul sistema NATURALWALL. Callegari et al. (2015), NATURALWALL® – A solar timber façade system for building refurbishment.

Il sistema nasce come componente prefabbricato in legno per il retrofit energetico degli edifici esistenti, con l'obiettivo di integrare in un unico elemento funzioni di isolamento, captazione solare e ventilazione naturale.

Dal punto di vista costruttivo, il modulo è costituito da una struttura portante in legno, una doppia vetrata da 3+3 mm, una camera di ventilazione naturale di 40 mm, un assorbitore alveolare in cartone da 30 mm e un pannello sandwich isolante di 98,9 mm². La configurazione dei moduli sperimentali e la stratigrafia del componente prefabbricato sono riportate in **Figura 4.1**.

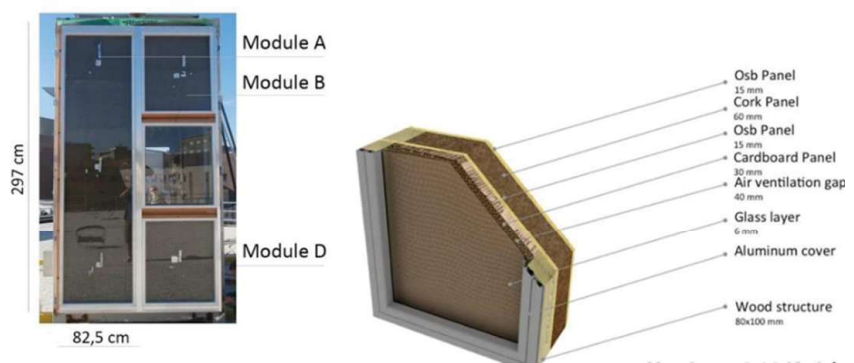


Figura 4.1 — Configurazione dei moduli sperimentali NATURALWALL. Moduli A, B e D e stratigrafia del componente prefabbricato. Fonte: rielaborazione da Callegari et al. (2015).

La scelta di materiali leggeri e a basso impatto ambientale risponde alla volontà di rendere il sistema compatibile con interventi di riqualificazione dell'esistente, incentivando la costruzione off-site, favorendo l'applicazione su edifici già costruiti. L'obiettivo principale del sistema è ridurre il flusso termico attraverso la facciata e, allo stesso tempo, sfruttare la radiazione solare incidente. Durante la stagione invernale, il componente può funzionare come un collettore solare ad aria: la radiazione attraversa lo strato trasparente, viene assorbita dal materiale alveolare e contribuisce al riscaldamento dell'aria presente nella cavità. Nel periodo estivo, invece, la ventilazione naturale dell'intercapedine favorisce lo smaltimento del calore accumulato, contribuendo a limitare il rischio di surriscaldamento.

³ La facility TWINS è stata utilizzata per prove in campo su moduli di facciata in condizioni climatiche reali.

La sperimentazione condotta presso la facility **TWINS** del Politecnico di Torino³ ha permesso di caratterizzare il comportamento del prototipo attraverso tre moduli, denominati A, B e D.

I test hanno evidenziato l'importanza della configurazione costruttiva e della scelta dei materiali, confrontando, ad esempio, il comportamento dell'assorbitore in cartone alveolare con quello del sughero scuro. Quest'ultimo ha mostrato una maggiore capacità isolante, contribuendo all'incremento della resistenza termica complessiva del sistema. L'analisi della trasmittanza termica e della conduttanza, calcolate sia con sfiato chiuso, in modalità buffer, sia con cavità naturalmente ventilata, mostra come la configurazione buffer determini un miglioramento delle prestazioni termiche della facciata. In questa modalità, infatti, i valori di trasmittanza U e di conduttanza termica C risultano inferiori rispetto alla configurazione con cavità ventilata. Il confronto tra le due condizioni operative è sintetizzato in **Tabella 4.1**.

	U^* (cork) [W/m ² K]	C^* (cork) [W/m ² K]	U^* (cardboard) [W/m ² K]	C^* (cardboard) [W/m ² K]
Buffer mode	0.16	0.24	0.24	0.52
Ventilated cavity	0.18	0.35	0.29	0.58

Tabella 4.1 — Conduttanza e trasmittanza del sistema NATURALWALL. Confronto tra modalità buffer e cavità ventilata.
Fonte: rielaborazione da Callegari et al. (2015).

L'efficacia del sistema è stata inoltre valutata attraverso il coefficiente di preriscaldamento (η), determinato insieme ai parametri termici secondo la norma ISO 9869:2014⁴. In alcune condizioni operative, valori di efficienza superiori al 100% indicano che il calore recuperato all'interno della facciata è sufficiente a compensare le perdite termiche associate alla ventilazione di rinnovo. Questo dato non deve essere interpretato come una produzione energetica superiore all'energia incidente, ma come la capacità del sistema di preriscaldare l'aria esterna prima dell'immissione nell'ambiente interno.

La ricerca di Longo, V. (2017), *Ottimizzazione energetica di un componente di facciata caratterizzato da un comportamento dinamico*, approfondisce l'evoluzione del sistema verso una configurazione derivata dal Muro Trombe e dotata di ventilazione meccanica forzata, o fan-assisted. I dati confermano che tale configurazione può immettere aria a temperature superiori ai 20°C per circa il 30% del periodo invernale, con rendimenti stagionali compresi tra il 15% e il 21%⁵, valori confrontabili con quelli dei collettori solari ad aria commerciali.

⁴ La norma ISO 9869 riguarda la misurazione in opera della resistenza termica e della trasmittanza mediante metodo termoflussimetrico.

⁵ Dati riferiti alla configurazione fan-assisted del sistema NATURALWALL analizzata da Longo (2017).
Longo, V. (2017), *Ottimizzazione energetica di un componente di facciata caratterizzato da un comportamento dinamico*.

L'efficienza di preriscaldamento del sistema NATURALWALL, sia con ventilazione attiva sia in modalità buffer, è riportata in **Figura 4.2**. Il confronto mostra una differenza contenuta tra le due condizioni, con un leggero miglioramento nel caso della ventilazione attiva.

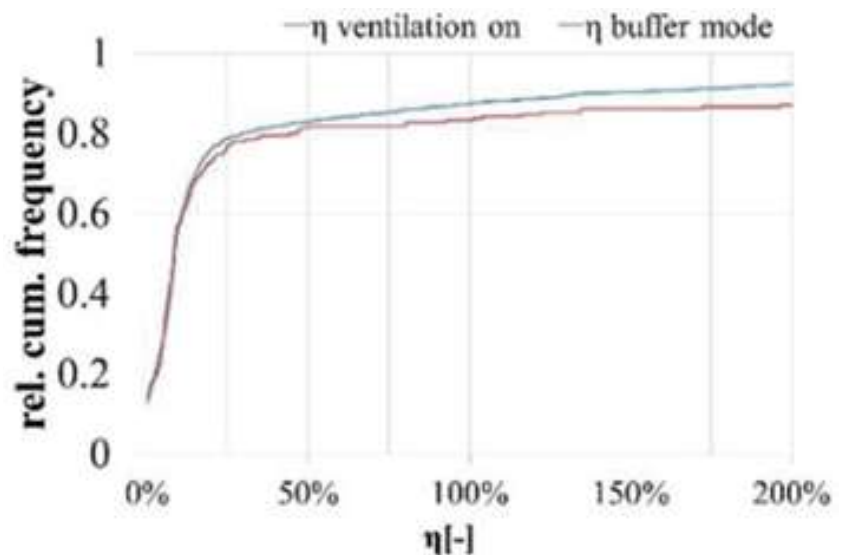


Figura 4.2 — Efficienza di preriscaldamento del sistema NATURALWALL. Confronto tra modalità buffer e ventilazione attiva. Fonte: rielaborazione da Longo (2017).

Questi risultati costituiscono un passaggio importante per comprendere l'evoluzione dei sistemi di facciata solare ad aria verso soluzioni più controllate.

In questa direzione si inserisce anche lo studio di Karanafti, Badino, Serra e Fantucci (2025), *Experimental study on the effect of the ventilation and operation mode on the thermal efficiency of a full-scale Trombe wall under real operating conditions*, dedicato a un sistema fan-assisted a scala reale in condizioni operative reali a Torino.

La ricerca conferma il ruolo della ventilazione forzata controllata nel miglioramento dell'efficienza termica del componente e introduce un riferimento utile per le successive valutazioni sui sistemi di facciata attiva applicabili al retrofit energetico.

VALIDAZIONE DELLE PRESTAZIONI E EFFICIENZA NETTA

La validazione sperimentale del sistema è stata ulteriormente approfondita nello studio di Longo, V., Isaia, F., Fantucci, S., Bianco, L., & Serra, V. (2018), *Experimental analysis on a solar air heating façade system*, *Proceedings of the 7th International Building Physics Conference*, IBPC 2018, Syracuse, NY, USA. L'articolo analizza il comportamento di un modulo Solar Air Heating Façade (SAHF), confrontandolo con due configurazioni di riferimento: una parete tradizionale, indicata come **Conventional Wall** (CW), e un muro solare passivo, riconducibile al principio del **Trombe Wall** (TW).

Il confronto sperimentale permette di evidenziare il ruolo della facciata solare ad aria come sistema dinamico, capace di incidere sia sulle perdite per trasmissione sia sul recupero della radiazione solare.

In particolare, i risultati mostrano una riduzione delle dispersioni termiche attraverso l'involucro opaco, confermando il comportamento della facciata come isolante dinamico. A questo effetto si somma il contributo del flusso d'aria all'interno della cavità, che consente di recuperare parte dell'energia solare incidente e di trasferirla all'aria immessa nell'ambiente interno.

Lo studio fornisce inoltre una prima quantificazione delle efficienze mensili del sistema nel periodo compreso tra ottobre e aprile, permettendo di valutare la prestazione della facciata non soltanto come elemento di chiusura, ma come componente attivo capace di contribuire al bilancio energetico dell'edificio.

Questo passaggio risulta particolarmente rilevante per la presente ricerca, poiché introduce il tema dell'**efficienza netta** del sistema, intesa come rapporto tra il calore utile recuperato e le perdite termiche associate alla ventilazione.

4.2.2 OPAQUE VENTILATED FACADE (OVF)

La validazione di un sistema di facciata attiva richiede una valutazione del suo comportamento in condizioni climatiche differenti.

Dopo aver analizzato il funzionamento invernale delle facciate solari

ad aria, risulta necessario considerare anche il comportamento estivo, nel quale la ventilazione dell'intercapedine può contribuire alla riduzione del surriscaldamento e all'asportazione del calore accumulato sulla superficie esterna.

Nel caso del sistema NATURALWALL, il comportamento stagionale è legato alla combinazione tra stratigrafia del componente, geometria alveolare dell'assorbitore e ventilazione naturale della cavità. In inverno, il sistema può funzionare come collettore solare ad aria, contribuendo al preriscaldamento dell'aria. In estate, invece, la cavità ventilata e lo strato alveolare possono svolgere una funzione di schermatura e smaltimento del calore. La stratigrafia del modulo, la posizione dei sensori e le strategie di funzionamento stagionale sono sintetizzate in **Figura 4.3**.

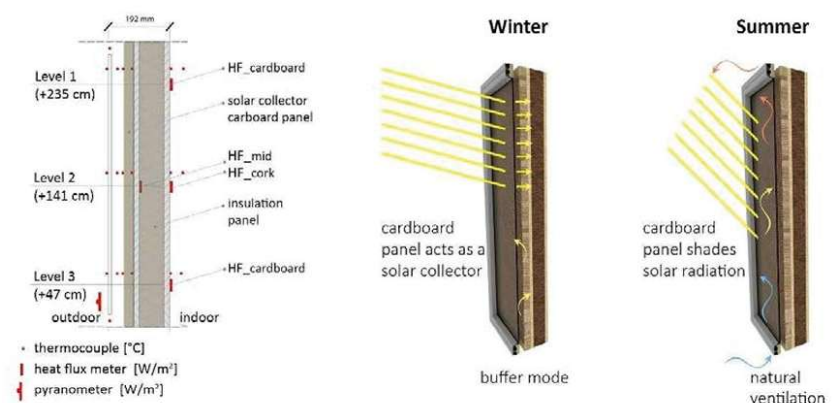


Figura 4.3 — Schema del sistema NATURALWALL e strategie di funzionamento stagionale.

Stratigrafia del modulo, posizione dei sensori e comportamento invernale ed estivo del sistema.

Fonte: rielaborazione da Longo et al. (2018).

Durante la stagione calda, il monitoraggio del sistema è stato finalizzato a verificare la capacità del cartone alveolare di schermare la radiazione solare e l'efficacia della ventilazione naturale nel rimuovere il calore accumulato all'interno della cavità.

L'analisi della temperatura dell'aria nel modulo A, misurata a tre diverse altezze (+0,00 m, +1,40 m e +2,40 m), ha evidenziato una distribuzione termica differenziata lungo lo sviluppo verticale della facciata.

Nelle condizioni di picco, intorno alle ore 13:00, è stata rilevata una differenza di circa 21,8°C tra la base e la sommità della cavità, indicando un comportamento non uniforme del sistema e una maggiore efficacia della schermatura nella porzione inferiore.

Il confronto tra i moduli A, B e D ha inoltre evidenziato il ruolo dell'altezza della facciata nell'attivazione dell'effetto camino.

Nei moduli di dimensioni ridotte, B e D, la ventilazione naturale risulta limitata, mentre nel modulo A la maggiore altezza consente una migliore attivazione del moto convettivo dell'aria. In questa configurazione, la temperatura all'interno dell'intercapedine risulta inferiore di circa 13°C⁶ rispetto a quella rilevata nei moduli più piccoli.

⁶ Il confronto tra moduli di altezza diversa evidenzia l'influenza dell'effetto camino sull'evacuazione del calore.

Lo studio suggerisce inoltre che, per migliorare la rimozione del calore solare, la sezione delle prese d'aria dovrebbe essere superiore a 40 cm². Nonostante la superficie interna abbia raggiunto valori prossimi ai 30°C nei momenti più critici, tale condizione non determina necessariamente un disagio termico immediato. Tuttavia, un incremento della ventilazione naturale potrebbe contribuire a un ulteriore miglioramento delle prestazioni estive e del comfort interno. L'andamento delle temperature nella cavità e dei flussi termici superficiali è riportato in **Figura 4.4**.

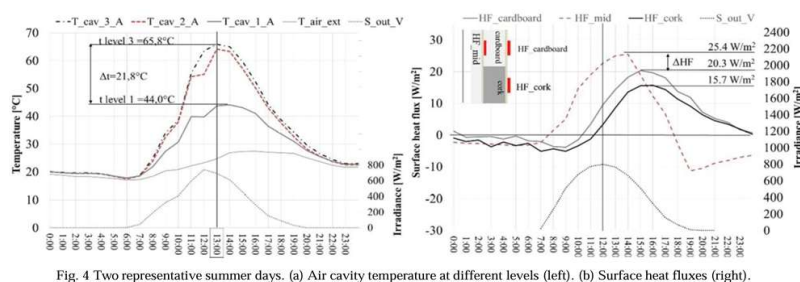


Figura 4.4 — Comportamento estivo del sistema NATURALWALL. Temperatura dell'aria nella cavità a differenti altezze e andamento dei flussi termici superficiali.

Fonte: rielaborazione da Longo et al. (2018).

LA TRANSIZIONE AUTUNALE E I FLUSSI TERMICI INVERNALI

Il comportamento del sistema cambia in relazione alla stagione e all'angolo di incidenza della radiazione solare.

Durante il periodo estivo, il pannello in cartone alveolare svolge una funzione di schermatura più evidente nella parte inferiore del modulo, mentre ai livelli superiori il comportamento della cavità è maggiormente influenzato dalla temperatura dell'aria e dalla ventilazione interna.

Nel periodo autunnale, invece, l'inclinazione più bassa dei raggi

solari consente al sistema di intercettare meglio la radiazione incidente. In queste condizioni, la temperatura superficiale dietro il pannello può superare quella dell'aria esterna, confermando la possibilità di ottenere un contributo energetico positivo nei mesi freddi. Per quanto riguarda le prestazioni invernali, il confronto tra i materiali isolanti evidenzia che il pannello in sughero garantisce valori di dispersione più bassi rispetto al cartone.

Tuttavia, lo strato alveolare in cartone mantiene un ruolo importante come componente dinamico, poiché contribuisce sia alla riduzione dei flussi di calore entranti, pari a circa 5 W/m^2 , e sia allo sfasamento dell'onda termica trasmessa attraverso l'involucro.

Le ricerche più recenti sull'involucro edilizio si muovono lungo due direzioni principali: da un lato lo sviluppo di componenti ad alte prestazioni, dall'altro la progettazione di sistemi responsivi, capaci di adattare il proprio comportamento alle condizioni climatiche esterne. In questo scenario si inserisce la facciata ventilata opaca, o Opaque Ventilated Façade (OVF), che può essere classificata in base alla strategia di ventilazione, al percorso dei flussi d'aria e alla configurazione geometrica del sistema. Tra le diverse configurazioni, la tipologia a cortina d'aria esterna con ventilazione naturale rappresenta una strategia di raffrescamento passivo particolarmente interessante nei contesti mediterranei, dove la mitigazione dei carichi termici estivi assume un ruolo centrale.

Lo studio sperimentale di Fantucci, S., Serra, V., & Carbonaro, C. (2020), *An experimental sensitivity analysis on the summer thermal performance of an Opaque Ventilated Façade*, Energy and Buildings, (225, 110354), ha analizzato le caratteristiche progettuali di una OVF attraverso una campagna di monitoraggio a lungo termine condotta a Torino.

La ricerca ha valutato l'effetto delle condizioni al contorno esterne, della distribuzione della temperatura, della velocità dell'aria nel condotto e della tipologia dei giunti, evidenziando come l'efficacia del sistema dipenda dall'equilibrio tra variabili geometriche e ambientali.

Dall'analisi emerge che il colore della finitura esterna rappresenta uno dei fattori più influenti.

Una superficie chiara consente di ridurre l'assorbimento della radiazione solare alla fonte, determinando un abbattimento del carico termico fino all'80%, rispetto al 31% registrato per una finitura scura. Questo dato evidenzia come il comportamento estivo della facciata ventilata non dipenda soltanto dalla presenza dell'intercapedine, ma anche dalle caratteristiche radiative dello strato esterno.

Un ulteriore parametro rilevante riguarda la progettazione delle griglie di ingresso e uscita dell'aria. Lo studio indica che, per evitare una riduzione dell'efficacia del sistema, l'apertura delle griglie dovrebbe essere almeno pari al 60% della sezione del canale ⁷.

La relazione tra rapporto di apertura delle griglie, velocità dell'aria nella cavità e variazione termica del sistema è riportata in **Figura 4.5**.

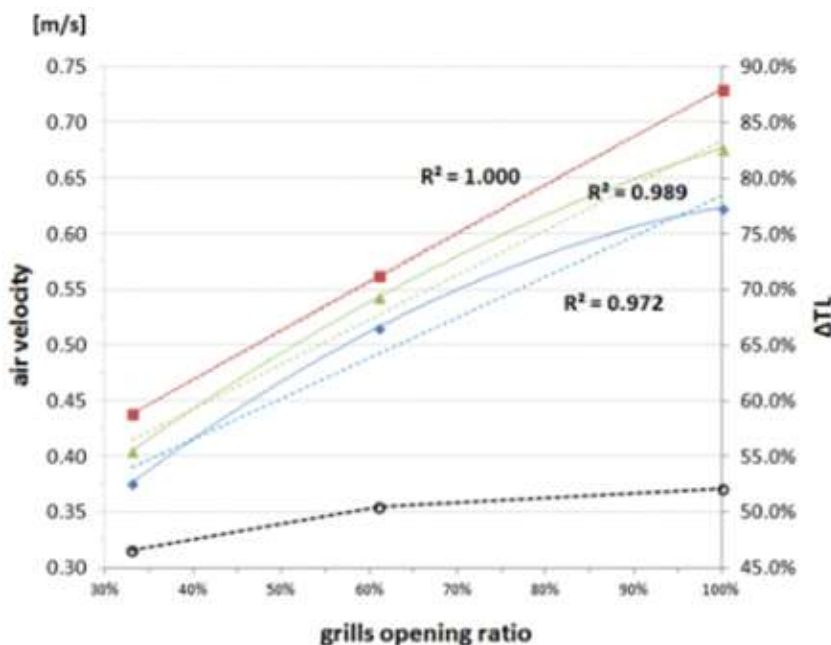


Figura 4.5 — Velocità dell'aria nella cavità in funzione del rapporto di apertura delle griglie.

Relazione tra apertura delle griglie, velocità dell'aria e variazione termica del sistema OVF.

Fonte: rielaborazione da Fantucci, Serra e Carbonaro (2020).

Anche l'altezza del canale di ventilazione incide sull'attivazione del tiraggio naturale. Facciate più alte favoriscono un incremento della velocità dell'aria, che può arrivare fino al 70% rispetto a configurazioni di altezza inferiore.

Tuttavia, l'effetto dell'altezza sulla riduzione energetica complessiva risulta più contenuto rispetto all'influenza del colore della finitura esterna. L'influenza dell'altezza del condotto sul comportamento termico della facciata OVF è sintetizzata in **Figura 4.6**.

⁷ Il rapporto di apertura delle griglie incide sulla velocità dell'aria nella cavità e quindi sull'efficacia della ventilazione naturale.

Fantucci, Serra e Carbonaro (2020).

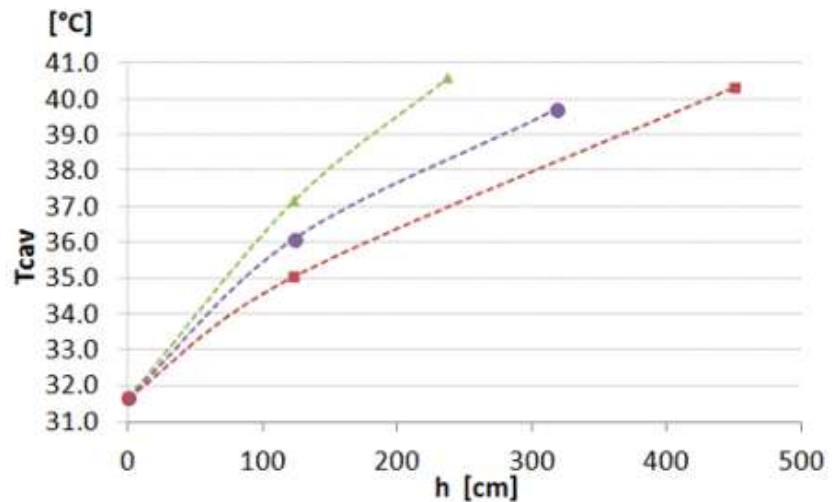


Figura 4.6— Temperatura massima dell'aria nella cavità in funzione dell'altezza del canale.
Influenza dell'altezza del condotto di ventilazione sul comportamento termico della facciata OVF.
Fonte: rielaborazione da Fantucci, Serra e Carbonaro (2020).

Nel complesso, il comportamento della OVF può essere letto come parzialmente **auto-regolante**: quando la radiazione solare aumenta, cresce anche la temperatura della superficie esterna, favorendo l'attivazione del moto convettivo nella cavità e l'asportazione del calore.

Per la modellazione energetica, questi dati confermano l'importanza della facciata ventilata come strategia di raffrescamento passivo, a condizione che vengano controllati alcuni parametri progettuali fondamentali, come il colore della finitura esterna, la sezione delle aperture e la continuità del canale di ventilazione.

4.3 OTTIMIZZAZIONE PRESTAZIONALE DELLA FACCIATA ATTIVA

L'efficacia dei sistemi Solar Air Heating Façade non dipende soltanto dalla geometria dell'intercapedine, ma anche dalla scelta dei materiali, dalla configurazione dello strato trasparente e dalla gestione della portata d'aria. La prestazione complessiva del sistema deriva infatti dall'equilibrio tra captazione solare, isolamento termico, inerzia della componente opaca e controllo del flusso d'aria nella cavità. In questa prospettiva, le ricerche condotte sul sistema NATURALWALL e sulle sue successive evoluzioni permettono di individuare alcuni parametri progettuali fondamentali.

Tra questi assumono particolare rilievo la **configurazione costruttiva del componente**, la **scelta dei materiali** e il **controllo della portata d'aria**.

4.3.1 MATERIALI E PRESTAZIONE DEL COMPONENTE

La ricerca condotta da Longo, V. (2017), *Ottimizzazione energetica di un componente di facciata caratterizzato da un comportamento dinamico*, si è concentrata sull'ottimizzazione energetica di un componente di facciata dinamico, con l'obiettivo di incrementarne il rendimento attraverso la ridefinizione dello strato trasparente e della componente opaca.

Lo **strato trasparente** svolge un ruolo centrale perché regola sia la quantità di radiazione solare che entra nella cavità, sia le dispersioni termiche verso l'ambiente esterno. Il confronto tra diverse configurazioni ha evidenziato come il doppio vetro rappresenti una soluzione più efficace rispetto al vetro singolo.

Questa configurazione consente infatti di raggiungere temperature dell'aria in uscita superiori di circa 10°C e di mantenere temperature di immissione superiori ai 20°C per periodi più prolungati.

La **componente opaca** svolge un ruolo altrettanto rilevante perché regola lo scambio termico tra ambiente interno e intercapedine, incidendo sui valori di sfasamento e smorzamento in funzione della massa e del calore specifico dei materiali utilizzati. I moduli caratterizzati da maggiore inerzia termica risultano più efficaci nel contenere i picchi di temperatura durante le ore di irraggiamento e nel mantenere temperature di uscita più elevate nelle fasi di assenza di radiazione solare.

Le simulazioni condotte hanno permesso di registrare valori massimi di efficienza media stagionale pari a circa il **35%**. Tuttavia, lo studio evidenzia anche che la variazione della sola componente opaca, pur influenzando la dinamica termica del sistema, non determina scostamenti decisivi nel rendimento energetico complessivo.

Questo aspetto conferma che l'ottimizzazione della facciata non può essere ricondotta a un singolo materiale, ma deve considerare il funzionamento integrato tra strato trasparente, massa opaca e ventilazione della cavità.

4.3.2 CONTROLLO DELLA PORTATA D'ARIA NEI SISTEMI FAN-ASSISTED

Un ulteriore livello di ottimizzazione riguarda il controllo della portata d'aria.

Nei **sistemi fan-assisted**, la ventilazione meccanica non rappresenta un semplice elemento accessorio, ma diventa parte attiva del bilancio energetico del componente. La sua funzione è regolare il flusso d'aria in relazione alle condizioni di irraggiamento, alla temperatura raggiunta nella cavità e alla possibilità di immettere aria preriscaldata all'interno dell'ambiente.

Questo tema è stato approfondito da Isaia, F., Fantucci, S., Serra, V., & Longo, V. (2019), nello studio *The effect of airflow rate control on the performance of a fan-assisted solar air heating façade*, presentato alla decima International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings, IAQVEC 2019, Bari, Italy.

Lo studio evidenzia come l'impiego di portate d'aria fisse possa risultare inefficiente, soprattutto nelle fasi di basso irraggiamento.

In queste condizioni, un flusso eccessivo può raffreddare rapidamente l'assorbitore e portare la temperatura dell'aria immessa a valori inferiori rispetto alla temperatura interna, cioè $T_{\text{supply}} < T_{\text{int}}$ ⁸.

In questo caso il sistema non contribuisce più al preriscaldamento, ma rischia di comportarsi come un elemento sfavorevole dal punto di vista energetico.

Per questo motivo, la regolazione della portata d'aria deve essere considerata una condizione essenziale per il corretto funzionamento del sistema. Le strategie di controllo si basano generalmente su temperature di set-point, come 20°C, 30°C o 40°C, che definiscono le condizioni di accensione e spegnimento dei ventilatori.

⁸ La condizione indica che la temperatura dell'aria immessa è inferiore alla temperatura interna; in questo caso il sistema non produce un contributo utile al riscaldamento.

La scelta del set-point comporta un compromesso: un valore più elevato garantisce temperature di immissione più confortevoli, ma riduce le ore di funzionamento e quindi la quantità complessiva di energia recuperata; un valore più basso aumenta il tempo di attivazione del sistema, ma può comportare temperature di mandata meno favorevoli.

Lo studio introduce inoltre il concetto di **efficienza netta**⁹, che considera non solo l'energia termica recuperata dalla facciata, ma anche il consumo elettrico necessario per l'azionamento dei ventilatori.

I risultati mostrano che, se il sistema è regolato correttamente, il bilancio energetico rimane positivo: l'energia termica fornita all'edificio risulta superiore all'energia elettrica richiesta dai componenti ausiliari.

Questo aspetto è particolarmente rilevante per la presente ricerca, poiché conferma che l'evoluzione delle facciate solari ad aria non riguarda soltanto la scelta dei materiali o della stratigrafia, ma anche la capacità di controllare il funzionamento del sistema nel tempo.

Il passaggio a configurazioni fan-assisted permette infatti di trasformare la facciata in un componente realmente attivo, capace di adattare la portata d'aria alle condizioni climatiche e al fabbisogno degli ambienti interni.

⁹ Isaia, Fantucci, Serra e Longo (2019), *The effect of airflow rate control on the performance of a fan-assisted solar air heating façade*.

4.4 EVOLUZIONE DEI SISTEMI TROMBE WALL: DA DISPOSITIVO PASSIVO A INVOLUCRO SOLARE ADATTIVO

L'evoluzione recente dei **Muri Trombe** evidenzia il passaggio da un sistema solare passivo, prevalentemente orientato al riscaldamento invernale, a una famiglia di componenti di involucro più complessi, capaci di integrare accumulo termico, ventilazione, controllo del surriscaldamento e, in alcuni casi, produzione elettrica. La review di Tareemi, *Advances in Trombe wall performance challenges, photovoltaic shading schemes, phase change material, and composite enhancements*, interpreta il Muro Trombe non come una soluzione unica e immutabile, ma come un insieme di configurazioni adattive, la cui efficacia dipende dal clima, dalla geometria della cavità, dall'orientamento, dal-

la gestione delle aperture e dalle strategie di controllo del flusso d'aria.

Questo filone di ricerca si collega direttamente ai sistemi di facciata attiva analizzati nei paragrafi precedenti. In entrambi i casi, l'involucro non è più considerato soltanto come elemento di separazione tra interno ed esterno, ma come dispositivo capace di partecipare al bilancio energetico dell'edificio. L'analisi dei Trombe Wall evoluti consente quindi di ampliare il quadro teorico della ricerca, mettendo in relazione captazione solare, accumulo termico, ventilazione controllata e potenziale applicabilità al retrofit edilizio.

4.4.1 DAL MURO DI TROMBE CONVENZIONALI AI SISTEMI EVOLUTI

Il Muro Trombe convenzionale è costituito da uno strato trasparente esterno, una cavità d'aria e una parete massiva assorbente, generalmente dotata di aperture superiori e inferiori. Il principio di funzionamento si basa sull'assorbimento della radiazione solare da parte della massa opaca e sulla circolazione dell'aria indotta dalla differenza di temperatura tra cavità e ambiente interno.

Questa configurazione si è dimostrata efficace come strategia passiva di riscaldamento invernale, ma presenta alcune criticità, soprattutto nella stagione estiva, quando il calore accumulato può generare fenomeni di surriscaldamento. Per questo motivo, la letteratura più recente tende a distinguere le diverse configurazioni in base alla funzione prevalente: riscaldamento, mitigazione del surriscaldamento o funzionamento annuale ibrido.

Una prima linea di evoluzione riguarda il miglioramento del trasferimento di calore all'interno della cavità. Gli studi analizzati mostrano che l'inserimento di partizioni, alette o assorbitori ottimizzati può incrementare la convezione naturale e migliorare l'efficienza termica del sistema. In particolare, alcune configurazioni con assorbitore modificato hanno evidenziato incrementi significativi dell'efficienza termica e della capacità di riscaldamento. La distanza tra assorbitore e parete massiva, spesso compresa tra 70 e 80 mm nei casi più efficienti, costi-

tuisce un riferimento utile per comprendere il ruolo della geometria dell'intercapedine nel comportamento fluidodinamico del sistema.

Un secondo aspetto riguarda la conservazione del calore nelle ore notturne. La sola cavità d'aria non è sempre sufficiente a limitare le dispersioni, soprattutto nei climi freddi.

L'impiego di doppie cavità, superfici a bassa emissività, pannelli interni o strati isolanti consente invece di migliorare la protezione termica e di ridurre le perdite dopo il tramonto. Questo tema si collega alle modalità di funzionamento a cavità chiusa, nelle quali l'intercapedine lavora come strato di protezione termica e non come canale di ventilazione.

Anche la portata d'aria rappresenta un parametro centrale. L'aumento della velocità dell'aria nella cavità può favorire il trasferimento termico e la ventilazione, ma deve essere controllato in funzione della stagione e della radiazione disponibile. Portate troppo elevate possono infatti ridurre il tempo di scambio termico e aumentare le perdite di carico, mentre portate troppo basse limitano il contributo convettivo del sistema. Questo conferma che l'efficacia dei sistemi Trombe Wall evoluti non dipende dal semplice incremento del flusso d'aria, ma dalla sua regolazione.

4.4.2 MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE E SISTEMI COMPOSITI

Un'evoluzione significativa del Muro Trombe riguarda l'integrazione dei materiali a cambiamento di fase, o **Phase Change Materials** (PCM) ¹⁰, introdotti per aumentare la capacità di accumulo senza incrementare eccessivamente peso e spessore della parete. I PCM assorbono calore durante la fusione e lo rilasciano durante la solidificazione, contribuendo alla riduzione delle oscillazioni termiche interne, al prolungamento del riscaldamento serale e alla mitigazione dei picchi estivi.

¹⁰ Per l'approfondimento sui PCM applicati ai sistemi Trombe Wall si fa riferimento alla review *Advances in Trombe wall performance challenges, photovoltaic shading schemes, phase change material, and composite enhancements*.

La selezione del PCM risulta però determinante. Gli studi analizzati indicano che i materiali più adatti devono avere una temperatura di transizione coerente con le condizioni di comfort interno, generalmente compresa tra 18°C e 28°C.

Anche lo spessore dello strato e la posizione del materiale all'interno della stratigrafia devono essere calibrati in funzione del clima locale, dell'irraggiamento e del profilo termico stagionale.

L'integrazione del PCM non può quindi essere considerata una semplice aggiunta di massa, ma deve essere progettata come parte del funzionamento complessivo del sistema.

Le configurazioni con singolo e doppio strato PCM consentono di confrontare il Muro Trombe convenzionale con varianti capaci di regolare in modo più dinamico l'accumulo termico.

Come riportato in **Figura 4.7**, l'introduzione del PCM permette di ritardare il trasferimento del calore e di rendere più stabile il comportamento della parete nelle diverse condizioni stagionali.

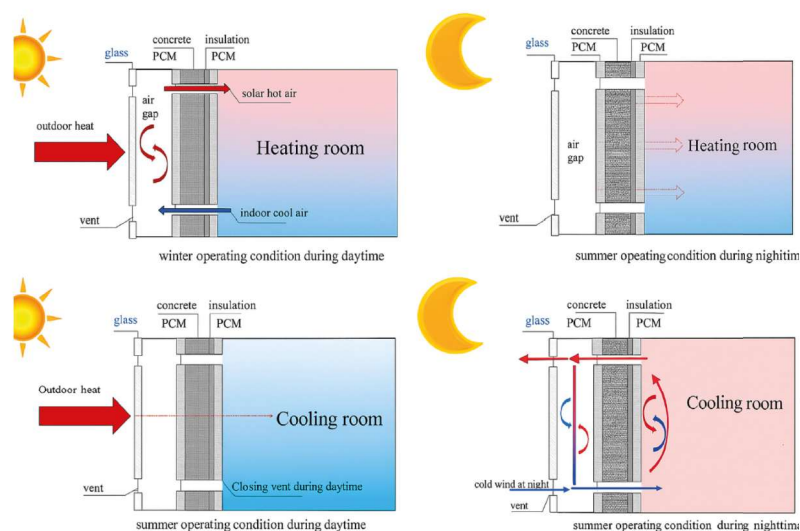


Figura 4.7 — Configurazioni del Muro Trombe convenzionale e con PCM. Schema comparativo tra Muro Trombe tradizionale, Muro Trombe con singolo strato PCM e Muro Trombe con doppio strato PCM, finalizzato alla regolazione dinamica dell'accumulo termico. Fonte: rielaborazione da Tareemi (2026).

Nel complesso, i PCM permettono di trasformare il Muro Trombe in un sistema meno dipendente dall'andamento istantaneo della radiazione solare. Tuttavia, quando lo spessore è eccessivo, le aperture sono sottodimensionate o il materiale non completa i cicli giornalieri di fusione e solidificazione, una parte della capacità di accumulo rimane inutilizzata, riducendo l'efficacia del sistema.

Un'altra direzione evolutiva è rappresentata dai **Muri Trombe compositi**, nei quali la parete tradizionale viene integrata con ulteriori strati funzionali. Questi sistemi rispondono a due limiti del

Muro Trombe convenzionale: la difficoltà di trattenere calore nei periodi freddi o nuvolosi e la necessità di controllare con maggiore precisione la quantità di calore trasferita all'ambiente interno.

Tra le soluzioni più rilevanti rientrano i sistemi ad acqua e le configurazioni ventilate. Nel **Muro Trombe ad acqua** (*Water Trombe Wall*), l'acqua funziona come mezzo di accumulo termico ad alta capacità, contribuendo a ridurre le perdite e a stabilizzare il comportamento del sistema.

Nei **Muri Trombe compositi ventilati** (*Ventilated Composite Trombe Walls*), invece, l'introduzione di cavità controllate e, in alcuni casi, di ventilatori ausiliari consente una gestione più precisa del flusso d'aria.

Questa evoluzione si avvicina alla logica dei sistemi fan-assisted, nei quali la prestazione dipende non solo dalla stratigrafia, ma anche dalla regolazione della ventilazione.

Le configurazioni composite mostrano quindi come l'evoluzione del Muro Trombe non sia orientata soltanto all'aumento della massa termica, ma alla costruzione di sistemi stratificati e multifunzionali. La prestazione non dipende da un singolo materiale o da un unico parametro geometrico, ma dall'equilibrio tra accumulo, isolamento, ventilazione e controllo stagionale.

4.4.3 MURI DI TROMBE FOTOVOLTAICI E CONTROLLO STAGIONALE

L'integrazione del fotovoltaico introduce una trasformazione ulteriore del Muro Trombe. Il **Muro Trombe fotovoltaico** (*Photovoltaic Trombe Wall*), o PV-TW, combina la funzione termica della parete solare con la produzione elettrica, affrontando allo stesso tempo il problema del surriscaldamento del modulo fotovoltaico.

La presenza del fotovoltaico riduce la quantità di radiazione che raggiunge direttamente la parete di accumulo, contribuendo al controllo estivo, mentre la ventilazione della cavità permette di raffreddare il pannello e migliorare l'efficienza elettrica.

Il PV-TW prevede generalmente due modalità operative. In estate, le aperture dedicate al raffrescamento vengono aperte per espellere l'aria calda dalla cavità e limitare il surriscaldamento del modulo. In inverno, al contrario, le aperture vengono regolate in modo da trasferire verso l'ambiente interno parte del calore accumulato nell'intercapedine.

Il funzionamento stagionale del sistema è schematizzato in **Figura 4.8**, che mette in evidenza il diverso comportamento della cavità nelle condizioni estive e invernali.

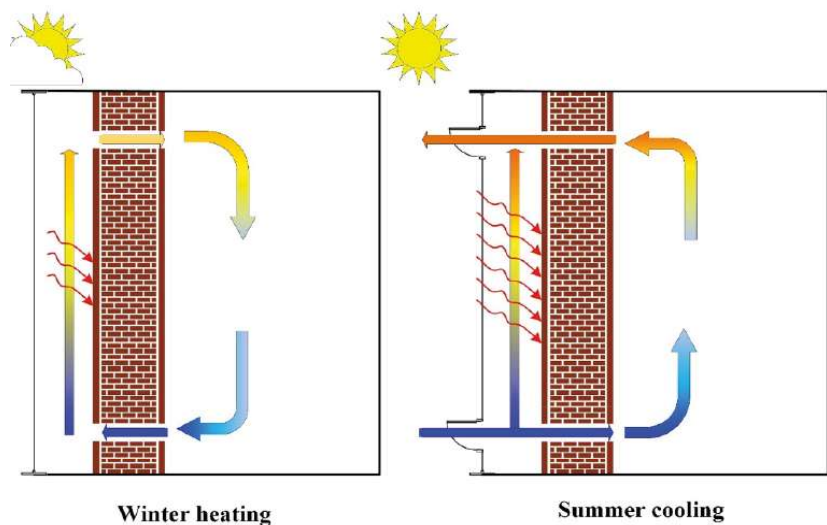


Figura 4.8 — Funzionamento stagionale del Muro Trombe fotovoltaico. Schema delle modalità operative estiva e invernale del PV-TW, con distinzione tra aperture dedicate al raffrescamento, ventilazione della cavità e recupero del calore verso l'ambiente interno. Fonte: rielaborazione da Tareemi (2026).

Le prestazioni del PV-TW dipendono da una combinazione di parametri geometrici e operativi. La dimensione delle aperture, la profondità dell'intercapedine, la velocità dell'aria, l'inclinazione degli elementi schermanti e la posizione del fotovoltaico influenzano sia il raffrescamento del modulo sia il comportamento termico dell'ambiente interno.

Un aspetto importante riguarda la portata d'aria. L'incremento della velocità nella cavità migliora il raffrescamento del fotovoltaico e può ridurre la temperatura interna, ma solo fino a una determinata soglia. Oltre certi valori, il miglioramento tende a stabilizzarsi, mentre aumentano le perdite di carico e il consumo energetico dei ventilatori. Anche nei sistemi PV-TW, quindi, la ventilazione deve essere progettata come variabile controllata e non come semplice aumento del flusso d'aria.

La posizione del fotovoltaico modifica inoltre il comportamento energetico della facciata. Quando il PV è collocato davanti allo strato trasparente, il sistema privilegia la produzione elettrica e il controllo del surriscaldamento estivo, intercettando una quota maggiore della radiazione solare. Quando invece è integrato nella parete massiva, il sistema tende a favorire il riscaldamento passivo invernale.

Le configurazioni intermedie, con PV collocato nel canale d'aria, rappresentano una soluzione di equilibrio tra le due funzioni, poiché contribuiscono sia alla produzione elettrica sia alla regolazione termica dell'intercapedine. La scelta della posizione del fotovoltaico non è quindi soltanto una decisione impiantistica, ma una scelta termoarchitettonica, perché determina il rapporto tra captazione solare, schermatura, accumulo e controllo del comfort interno.

Questo aspetto è particolarmente rilevante per il retrofit, dove l'inserimento di un nuovo sistema di facciata deve confrontarsi con vincoli costruttivi, orientamento, immagine dell'edificio e possibilità di manutenzione.

4.4.4 SINTESI COMPARATIVA E RICADUTE PER IL RETROFIT

La valutazione dei sistemi Trombe Wall richiede una lettura comparativa capace di superare il confronto diretto tra singole configurazioni tecnologiche. La prestazione di un Muro Trombe non dipende infatti soltanto dalla tipologia adottata — convenzionale, con PCM o fotovoltaica — ma dal rapporto tra sistema, clima, orientamento, profilo di utilizzo dell'edificio e modalità di controllo stagionale.

Il Muro Trombe convenzionale risulta più coerente con climi freddi e soleggiati, nei quali l'obiettivo principale è massimizzare il guadagno solare invernale. I sistemi con PCM risultano più efficaci quando è necessario accumulare e ritardare il rilascio del calore, riducendo le oscillazioni termiche interne. I sistemi fotovoltaici, invece, diventano particolarmente rilevanti nei contesti in cui il controllo del surriscaldamento estivo e la produzione elettrica assumono un ruolo prioritario.

Nei climi misti o temperati, tipici di molte condizioni mediterranee, il comportamento del sistema risulta più complesso. Durante le mezze stagioni o nelle estati miti, un Muro Trombe può trasformarsi in una sorgente di calore indesiderata se non dispone di elementi regolabili. In questi casi, l'efficacia dipende soprattutto dalla presenza di aperture stagionali, schermature, materiali ad accumulo controllato o sistemi di ventilazione regolata. Per quanto riguarda il retrofit, l'applicazione di Muri Trombe massivi tradizionali su edifici esistenti può risultare limitata dal peso strutturale, dall'impatto sull'immagine di facciata e dalla perdita di spazio interno. Più promettenti risultano invece le soluzioni leggere, modulari e montate esternamente, capaci di introdurre funzioni di captazione, accumulo, preriscaldamento o raffrescamento senza interventi strutturali invasivi.

Questo passaggio è particolarmente rilevante per la presente ricerca. Le soluzioni più coerenti con il retrofit non sono necessariamente quelle più massive o più performanti in condizioni sperimentali, ma quelle capaci di adattarsi all'edificio esistente con basso impatto costruttivo, buona controllabilità e comportamento annuale equilibrato. In questa prospettiva, i sistemi ibridi, modulari e leggeri rappresentano le configurazioni più vicine alla logica dell'involucro attivo contemporaneo.

4.4.5 LIMITI DELLA RICERCA E DIREZIONI FUTURE

Nonostante l'evoluzione dei Muri Trombe abbia permesso il passaggio da un dispositivo passivo a sistemi compositi, ventilati, fotovoltaici e adattivi, permangono alcune criticità che ne limitano l'applicazione su larga scala.

Tali limiti riguardano soprattutto la modellazione, il controllo operativo, la standardizzazione dei risultati e l'integrazione con edifici reali.

Una prima criticità riguarda gli strumenti di simulazione. Molti studi utilizzano modelli energetici dell'edificio, simulazioni CFD o celle sperimentali semplificate, ma solo una parte limitata della ricerca riesce a integrare in un unico processo la dinamica dell'am-

biente interno, il controllo delle aperture o dei ventilatori, il flusso d'aria nella cavità e i guadagni solari. Questo rende difficile valutare il comportamento del sistema alla scala dell'intero edificio.

Un secondo limite riguarda l'assenza di indicatori prestazionali unificati.

Gli studi disponibili riportano parametri differenti, come incremento della temperatura interna, efficienza termica, guadagno di riscaldamento per metro quadrato, riduzione del carico di raffrescamento o incremento dell'efficienza fotovoltaica. Tuttavia, questi dati vengono raramente normalizzati rispetto a clima, orientamento, profilo di occupazione o modalità di controllo, rendendo complesso il confronto tra configurazioni diverse. Molti sistemi sono ancora descritti attraverso aperture stagionali o set-point fissi, senza una reale integrazione con la gestione energetica dell'intero edificio.

La ricerca futura dovrà quindi orientarsi verso strategie di controllo più semplici, trasferibili e adattabili ai diversi climi, capaci di regolare aperture, ventilatori, schermature e componenti attivi in funzione della temperatura interna, della radiazione solare e del fabbisogno degli ambienti.

Dal punto di vista applicativo, il retrofit rappresenta una delle direzioni più promettenti ma anche più complesse. Gli edifici esistenti presentano vincoli strutturali, superfici disponibili limitate, ombreggiamenti e vincoli architettonici che rendono difficile l'applicazione di sistemi massivi tradizionali. Per questo motivo, le soluzioni più interessanti sono quelle leggere, prefabbricate e montate esternamente, capaci di integrare captazione, accumulo e ventilazione controllata con un impatto contenuto sull'edificio esistente.

Nel complesso, il futuro dei Muri Trombe sembra orientato verso sistemi controllabili e multi-funzionali, nei quali geometria, materiale di accumulo, ventilazione e logiche di controllo vengono progettati insieme. Per la presente ricerca, queste conclusioni rafforzano il passaggio teorico verso l'involucro attivo: il Muro Trombe evoluto non

è più una semplice parete massiva esposta al sole, ma un'interfaccia climatica regolabile, capace di integrare captazione solare, accumulo, ventilazione e controllo del comfort.

In questa prospettiva, la configurazione più coerente con il retrofit è quella capace di adattarsi all'edificio esistente e di contribuire al bilancio energetico annuale senza generare nuove criticità estive.

4.4 CASI STUDIO APPLICATIVI DEI SISTEMI TROMBE WALL

La selezione dei casi studio consente di inquadrare il Muro Trombe non come una soluzione univoca, ma come una famiglia di sistemi adattabili a differenti condizioni climatiche, tipologiche e progettuali. I casi analizzati sono stati scelti perché rappresentano applicazioni edilizie riconoscibili: abitazioni rurali, social housing, edifici residenziali esistenti e sperimentazioni su scala reale.

L'obiettivo non è confrontare le soluzioni in termini assoluti, ma evidenziare come il sistema venga declinato in rapporto al clima, alla tipologia edilizia, alla disponibilità solare, alla massa muraria esistente e alle strategie di controllo. In questo senso, i casi studio costruiscono un percorso progressivo: dal Muro Trombe passivo in clima freddo, fino al sistema fan-assisted sperimentato su edificio esistente, assunto come riferimento più vicino alla presente ricerca.

4.1.1 MURO DI TROMBE IN CLIMA ALPINO: ABITAZIONE RESIDENZIALE NELLA SICHUAN-TIBET ALPINE VALLEY

Il caso studio analizzato da Zhang et al., *Trombe wall for a residential building in Sichuan-Tibet alpine valley — A case study*, riguarda l'applicazione di un Muro Trombe convenzionale a un'abitazione tradizionale tibetana situata nella valle alpina di Sichuan-Tibet. Lo studio affronta il tema del retrofit energetico di edifici residenziali rurali in un contesto caratterizzato da lunghi periodi freddi e buona disponibilità di radiazione solare.

L'obiettivo principale è verificare se una tecnologia solare passiva, semplice e a basso costo, possa migliorare le condizioni interne e ridurre il fabbisogno energetico dell'edificio.

L'edificio oggetto di studio è una residenza tradizionale del villaggio di Shang Siwa, abitato da comunità tibetane. La costruzione presenta caratteristiche tipiche dell'architettura locale, tra cui pareti massive in terra cruda/adobe, struttura lignea e finiture legate alla cultura tibetana. La massa muraria esistente assume un ruolo centrale, poiché può essere sfruttata come elemento di accumulo e rilascio graduale del calore solare.



Figura 4.9 — Localizzazione e caratteristiche dell'edificio residenziale tibetano.

Inquadramento geografico e documentazione fotografica dell'abitazione tradizionale oggetto dello studio nella Sichuan-Tibet Alpine Valley.

Fonte: rielaborazione da Zhang et al. (2020).

La scelta del Muro Trombe deriva dalla corrispondenza tra le condizioni climatiche locali e il principio di funzionamento del sistema. La radiazione solare incidente sulla parete sud riscalda l'aria contenuta nell'intercapedine; l'aria calda, spinta dal moto convettivo naturale, viene trasferita verso l'ambiente interno attraverso aperture poste nella parte superiore della cavità. Il sistema funziona quindi come dispositivo passivo di preriscaldamento, riducendo la necessità di ricorrere a sistemi meccanici di riscaldamento.

Dal punto di vista metodologico, lo studio combina misure in campo, simulazione fluidodinamica e simulazione energetica annuale. Le misurazioni sperimentali vengono utilizzate per verificare le condizioni reali dell'edificio, mentre i modelli numerici consentono di valutare diverse configurazioni del sistema. I fattori progettuali più influenti risultano il rapporto tra superficie del Muro Trombe e parete sud e l'inclinazione dello strato vetrato: maggiore è la superficie captante correttamente orientata, migliore risulta il comportamento termico dell'ambiente interno.

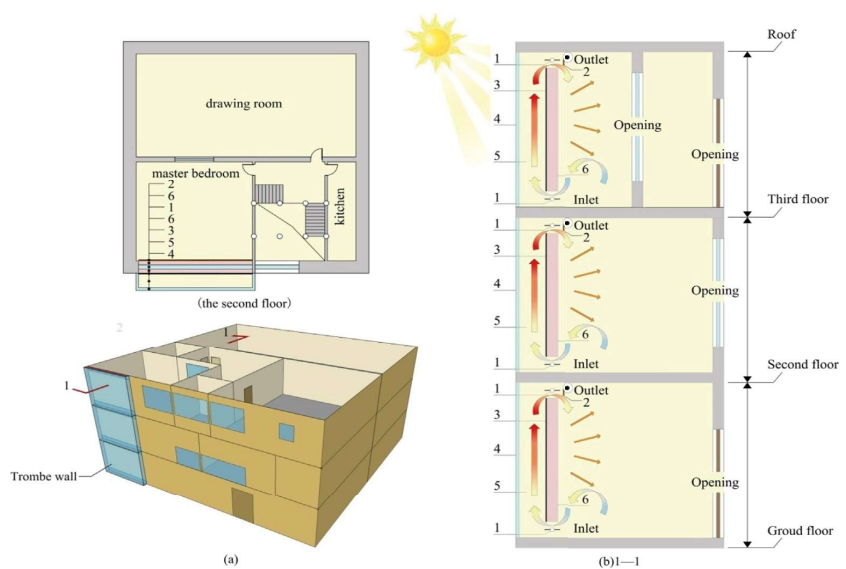


Figura 4.10— Modello energetico del Muro Trombe. Schema del sistema simulato, con indicazione della cavità d'aria, della parete di accumulo, dello strato vetrato e delle aperture di ingresso e uscita. Fonte: rielaborazione da Zhang et al. (2020).

La configurazione ottimizzata consente alla temperatura media interna della camera principale di raggiungere circa $18,87^{\circ}\text{C}$ nel mese più freddo. Dal punto di vista energetico, l'articolo riporta una riduzione complessiva dei consumi annuali dell'ordine del 70–72% rispetto alle abitazioni tibetane esistenti.

Il beneficio è quindi significativo sia in termini di comfort sia di riduzione del fabbisogno energetico.

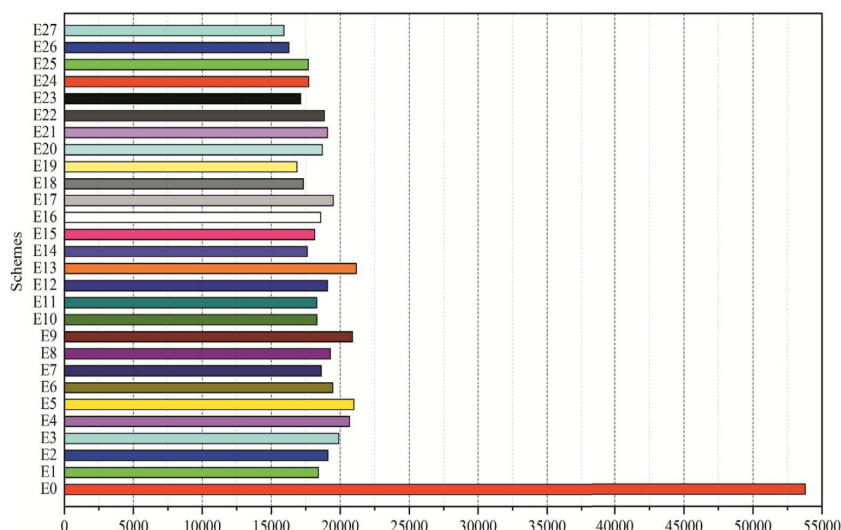


Figura 4.11 — Confronto dei consumi energetici tra edificio originario e configurazioni ottimizzate.
 Riduzione del fabbisogno annuo ottenuta mediante l'integrazione del Muro Trombe nella configurazione più efficace.
 Fonte: rielaborazione da Zhang et al. (2020)

Per la presente ricerca, il caso cinese è significativo perché dimostra il valore del dimensionamento climatico-specifico. La prestazione non dipende dalla sola presenza del Muro Trombe, ma dalla coerenza tra sistema, orientamento, massa muraria esistente e disponibilità solare. Il caso rappresenta quindi una base di riferimento: mostra come un involucro tradizionalmente passivo possa essere trasformato in un dispositivo energetico attraverso una corretta progettazione della facciata.

4.4.2 MURO DI TROMBE NEL SOCIAL HOUSING: ABITAZIONE A PACHUCA DE SOTO, MESSICO

Il caso studio analizzato da Rodríguez-Gómez et al., *Thermal Performance Assessment of a Trombe Wall in Social Housing through Numerical Simulation: A Case Study in Mexico*, riguarda l'applicazione simulata di un Muro Trombe a un'abitazione sociale rappresentativa situata a Pachuca de Soto, nello stato di Hidalgo, in Messico. L'interesse dello studio risiede nel fatto che il sistema viene valutato in un contesto caratterizzato da forte variabilità termica giornaliera, dove

il problema principale non è soltanto il riscaldamento invernale, ma anche la stabilizzazione delle condizioni interne e il miglioramento dell'abitabilità senza ricorrere a sistemi meccanici.

L'articolo assume come riferimento una tipologia di edilizia sociale urbana, selezionata perché rappresentativa di un patrimonio abitativo diffuso e replicabile.

Questa scelta rende il caso particolarmente utile, poiché sposta l'attenzione dal singolo componente tecnologico alla sua possibile applicazione su edifici reali e socialmente rilevanti. Il Muro Trombe viene quindi studiato come strategia passiva integrabile in una tipologia abitativa vulnerabile dal punto di vista energetico.

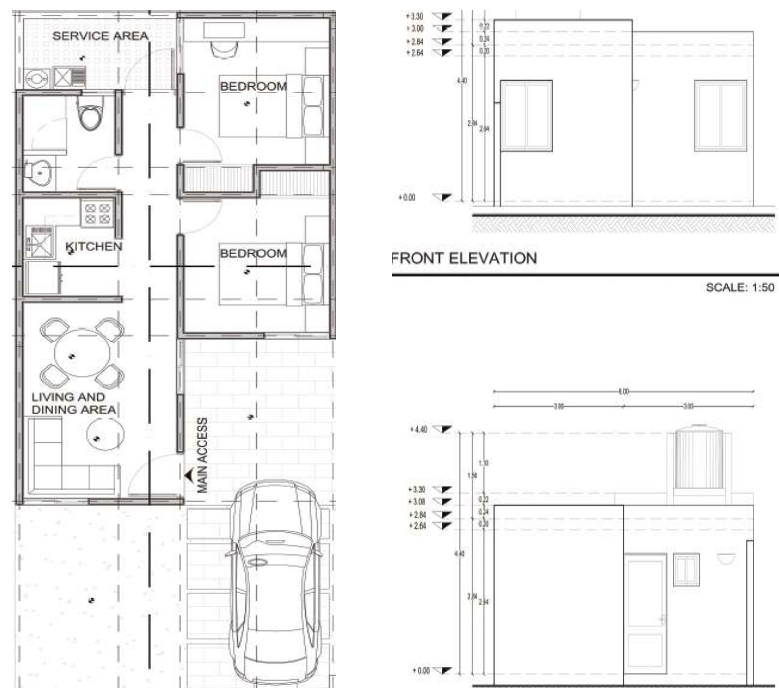


Figura 4.12 — Elaborati architettonici dell'abitazione sociale analizzata. Schema dell'unità abitativa utilizzata come modello base per la simulazione del comportamento termico. Fonte: rielaborazione da Rodríguez-Gómez et al. (2025).

Il sistema proposto consiste in un Muro Trombe applicato alla facciata sud, costituito da una parete massiva trattata con finitura scura, una camera d'aria e una vetrata trasparente esterna. Durante il giorno, la radiazione attraversa il vetro, riscalda la massa e l'aria contenuta nell'intercapedine; durante la notte, la parete rilascia gradualmente il calore accumulato, riducendo le oscillazioni termiche interne.

Dal punto di vista metodologico, lo studio confronta due scenari: un modello base privo di strategie passive e un modello con Muro Trombe. La simulazione viene condotta con OpenStudio ed EnergyPlus¹¹, su un ciclo annuale completo, valutando il comfort interno secondo criteri riconducibili agli standard ASHRAE. Questo approccio consente di osservare non solo il comportamento puntuale del sistema, ma anche la variazione delle condizioni interne nel corso dell'anno.

¹¹ OpenStudio è utilizzato come interfaccia di modellazione; EnergyPlus come motore di simulazione energetica dinamica.

La scelta del Muro Trombe risponde a tre esigenze principali: sfruttare la disponibilità solare, migliorare il comfort invernale e ridurre le oscillazioni interne di temperatura, particolarmente critiche negli alloggi privi di climatizzazione meccanica. La soluzione si configura quindi come un sistema passivo economico e replicabile, compatibile con un'edilizia sociale a basso costo.

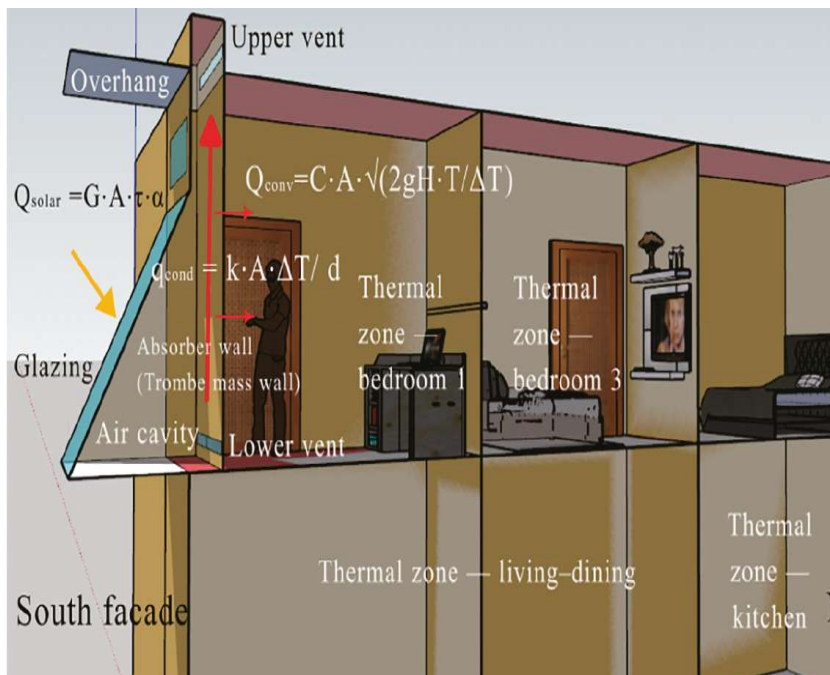


Figura 4.13— Funzionamento termico del Muro Trombe. Schema del comportamento diurno e notturno del sistema: captazione della radiazione solare, riscaldamento della cavità, trasferimento del calore verso l'interno e rilascio graduale da parte della massa termica. Fonte: rielaborazione da Rodríguez-Gómez et al. (2025).

I risultati confermano un miglioramento significativo delle condizioni interne. L'inserimento del Muro Trombe permette di aumentare la temperatura media invernale da 14,4°C a 18,3°C, senza ricorrere a riscaldamento meccanico.

Nelle zone più favorevoli, l'incremento di temperatura raggiunge circa 5,1°C. Inoltre, il numero annuo di ore comprese nel range di comfort 18–24°C aumenta del 167% rispetto al modello base.

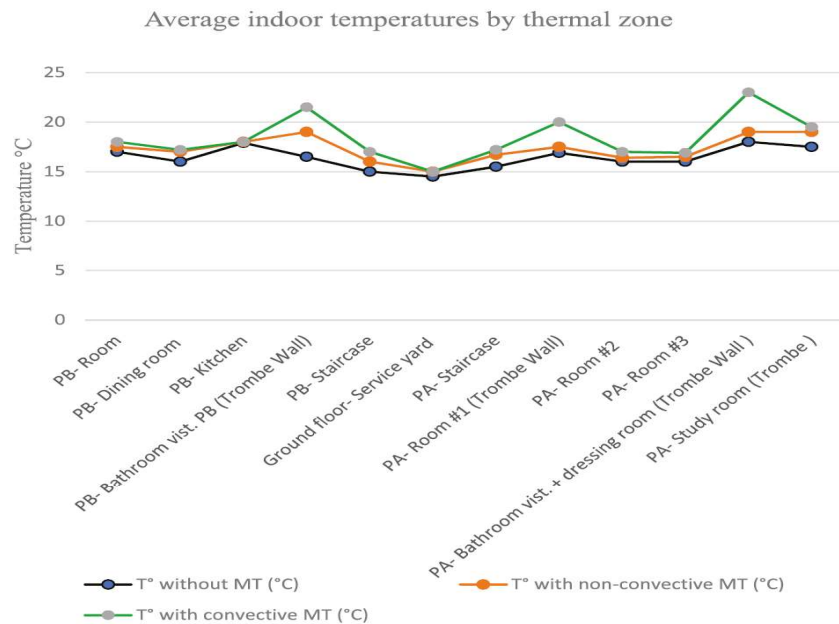


Figura 4.14 — Confronto delle temperature interne per zona termica. Risultati della simulazione nelle diverse zone dell'abitazione, con confronto tra modello senza Muro Trombe, modello con Muro Trombe non convettivo e modello con Muro Trombe convettivo
 Fonte: rielaborazione da Rodríguez-Gómez et al. (2025).

Il beneficio principale della soluzione non riguarda soltanto l'aumento della temperatura, ma la stabilizzazione del comportamento termico interno. In un contesto di edilizia sociale, questo aspetto assume un valore rilevante perché le variazioni marcate di temperatura possono incidere direttamente sulla qualità abitativa e sul benessere degli utenti.

Per la presente ricerca, il caso messicano è significativo perché dimostra il ruolo del Muro Trombe nel miglioramento del comfort abitativo e della resilienza sociale. Rispetto al caso cinese, più legato alla riduzione del fabbisogno invernale in clima alpino, questo studio evidenzia il potenziale del sistema come strategia passiva per contesti abitativi vulnerabili, dove la qualità interna degli spazi assume un valore energetico, ambientale e sociale.

4.4.3 MURO DI TROMBE MODULARE PER IL RETROFIT IN CLIMA MEDITERRANEO

Il caso studio analizzato da Bevilacqua et al., *Summer and winter performance of an innovative concept of Trombe wall for residential buildings*, riguarda l'applicazione simulata di un Muro Trombe modulare su un edificio residenziale esistente localizzato in un clima mediterraneo caldo, a Crotone, nel Sud Italia. L'interesse dello studio risiede nel fatto che il Muro Trombe non viene interpretato solo come sistema passivo per il riscaldamento invernale, ma come componente di facciata capace di contribuire anche alla riduzione dei fabbisogni estivi, purché correttamente gestito mediante ventilazione, schermatura e controllo stagionale delle aperture¹².

Il punto di partenza della ricerca è una criticità tipica dei climi mediterranei: l'elevata disponibilità di radiazione solare, utile durante l'inverno, può diventare problematica nella stagione calda, aumentando il rischio di surriscaldamento interno. Per questo motivo, lo studio propone una configurazione modulare pensata per essere integrata in edifici esistenti senza occupare integralmente la facciata e senza compromettere la presenza di finestre o aperture vetrate.

¹² Nel caso mediterraneo, l'efficacia del sistema dipende dalla diversa gestione delle aperture nelle condizioni estive e invernali.



Figura 4.15 - Edificio caso studio e configurazione del Muro Trombe modulare. Stralcio di pianta, dettaglio costruttivo del modulo e vista post-intervento dell'edificio residenziale con integrazione del sistema sulla facciata sud. Fonte: rielaborazione da Bevilacqua et al. (2022).

La soluzione proposta prevede l'applicazione del sistema sulle pareti esposte a sud. Il modulo è costituito da un telaio leggero esterno, una vetrata doppia, una cavità d'aria, aperture di ventilazione e una parete retrostante trattata con finitura scura per favorire l'assorbimento della radiazione solare. Nelle porzioni interessate dal sistema, lo strato isolante esterno viene sostituito con un blocco in calcestruzzo, in modo da aumentare la capacità di accumulo termico della parete. Questa scelta consente di associare alla riqualificazione dell'involucro una funzione attiva di captazione e regolazione del calore.

Il sistema lavora secondo modalità diverse in inverno e in estate. Durante la stagione fredda, le aperture esterne rimangono chiuse e il calore accumulato nella cavità può essere trasferito verso l'ambiente interno quando la temperatura dell'intercapedine risulta superiore a quella della zona servita. Durante la stagione estiva, invece, le aperture esterne vengono mantenute aperte per favorire la ventilazione della cavità, mentre le schermature mobili limitano l'irraggiamento diretto sulla parete assorbente. In questo modo, il Muro Trombe viene trasformato da semplice collettore solare invernale a sistema dinamico di gestione stagionale dei flussi termici.

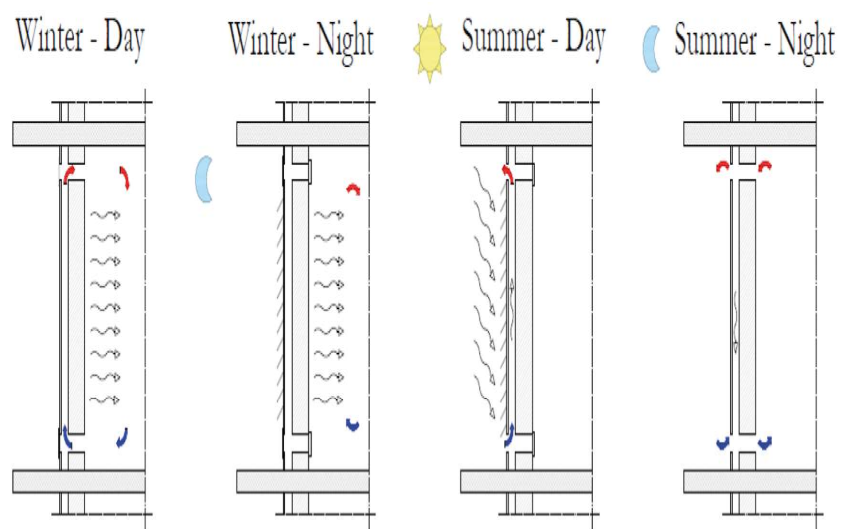


Figura 4.16— Funzionamento stagionale del Muro Trombe modulare. Schema delle modalità operative invernali ed estive, diurne e notturne, con gestione delle aperture, della cavità d'aria e delle schermature mobili. Fonte: rielaborazione da Bevilacqua et al. (2022).

Dal punto di vista metodologico, lo studio utilizza DesignBuilder con motore EnergyPlus, simulando il comportamento dell'edificio su base annuale. L'edificio con Muro Trombe viene confrontato con una configurazione di riferimento priva del sistema, così da valutare il contributo della soluzione in termini di temperatura interna e consumi energetici. Un elemento rilevante è l'impiego di una logica di controllo delle aperture e delle schermature in funzione delle condizioni climatiche e delle temperature rilevate nella cavità e negli ambienti interni.

I risultati evidenziano che, in condizioni invernali, il sistema consente di innalzare la temperatura interna durante le ore centrali della giornata grazie alla radiazione solare incidente. Nel soggiorno, dove la superficie installata è maggiore, il beneficio risulta più evidente anche nelle ore notturne, grazie al rilascio del calore accumulato dalla massa muraria.

In estate, il comportamento del sistema dipende in modo decisivo dal controllo delle aperture e delle schermature. Lo studio mostra che la corretta gestione delle bocchette può limitare il trasferimento di calore verso l'interno, mentre le veneziane mobili riducono il surriscaldamento della parete assorbente. In alcune condizioni, l'impiego delle schermature durante le ore di irraggiamento estivo permette di ridurre la temperatura interna fino a circa 3°C durante la giornata, con differenze che possono raggiungere circa 5°C nelle ore più critiche.

L'analisi con impianto di climatizzazione consente di valutare il contributo del sistema alla riduzione dei consumi. Il confronto tra edificio con e senza Muro di Trombe mostra una riduzione della domanda elettrica per la climatizzazione pari a circa 10,5% e una riduzione dei fabbisogni di raffrescamento pari a circa 9,5%, a condizione che il sistema venga gestito correttamente durante l'anno.

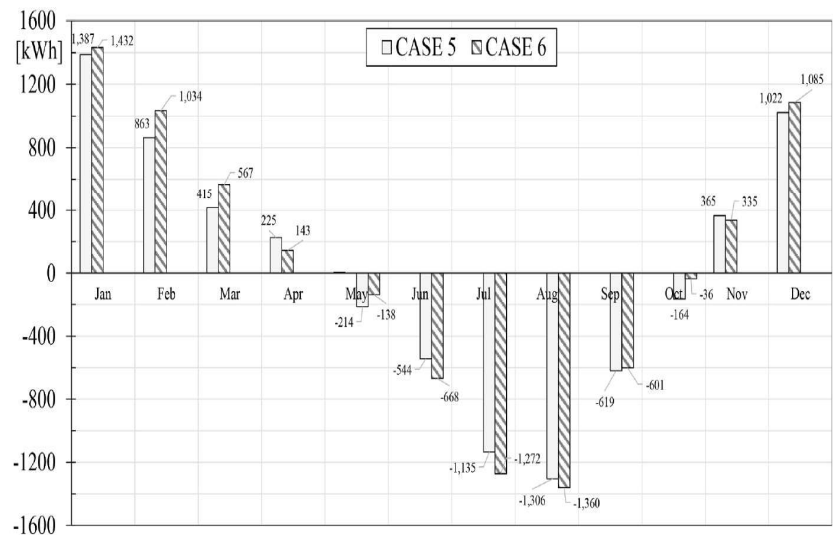


Figura 4.17 — Confronto dei consumi elettrici mensili. Consumi dell'impianto a pompa di calore aria-aria per riscaldamento e raffrescamento, confrontando l'edificio con Muro Trombe e la configurazione tradizionale senza sistema passivo. Fonte: rielaborazione da Bevilacqua et al. (2022).

Per la presente ricerca, il caso Bevilacqua è significativo perché dimostra la necessità di una gestione stagionale del sistema nei climi mediterranei.

Il Muro di Trombe non può essere concepito come elemento statico: in inverno deve favorire captazione e accumulo, mentre in estate deve limitare l'irraggiamento diretto e smaltire il calore attraverso ventilazione e schermatura.

Questo caso rappresenta quindi un passaggio fondamentale verso l'idea di involucro attivo, modulare e adattivo.

4.4.4 APPLICAZIONE DEL MURO TROMBE DI UN EDIFICIO ESISTENTE A TORINO

Il caso studio condotto da Karanafti ¹³ et al. su un edificio residenziale esistente a Torino rappresenta il riferimento più prossimo alla presente ricerca. A differenza dei casi precedenti, basati prevalentemente su simulazioni dinamiche o su applicazioni in contesti climatici differenti, questo studio riguarda una campagna sperimentale in scala reale, condotta su tre moduli di Muro Trombe installati su una facciata sud di un edificio storico in muratura massiva. La sua rilevanza non risiede soltanto nella verifica prestazionale del sistema, ma soprattutto nella possibilità di osservare il comportamento di un involucro attivo in condizioni operative reali.

¹³ Fonte: Karanafti et al., *Experimental study on the effect of the ventilation and operation mode on the thermal efficiency of a full-scale Trombe wall under real operating conditions*.

Il valore del caso torinese è duplice. Da un lato, esso dimostra che la massa muraria esistente può essere trasformata in una risorsa energetica, contribuendo all'accumulo e al rilascio del calore solare. Dall'altro, mostra come il controllo meccanico della ventilazione consenta di superare alcuni limiti del Muro Trombe tradizionale, regolando l'attivazione del sistema solo quando le condizioni termiche risultano favorevoli.

La portata d'aria di circa 43 m³/h e l'attivazione dei ventilatori al raggiungimento di una soglia di 22°C nella parte alta della cavità permettono infatti di evitare funzionamenti indesiderati nelle ore fredde o nei giorni scarsamente soleggiati.

Un aspetto particolarmente significativo riguarda l'integrazione architettonica. I moduli sono inglobati nel sistema di isolamento esterno, mantenendo una superficie di facciata continua; l'altezza è allineata a quella delle finestre e il polycarbonato alveolare consente di schermare visivamente la superficie assorbente scura, riducendo l'impatto percettivo del dispositivo.

Questa scelta conferma che la prestazione energetica non può essere separata dalla compatibilità compositiva e dall'accettabilità dell'intervento sull'edificio esistente.



Figura 4.18 — Vista dei tre moduli.
Documentazione fotografica dell'integrazione reale dei moduli in facciata e dell'effetto del pannello in policarbonato.
Fonte: elaborazione da Karanafti et al. (2025).

I risultati sperimentali confermano la capacità del sistema di fornire un contributo utile al riscaldamento. Durante il funzionamento invernale, la temperatura dell'aria nella cavità raggiunge valori compresi tra 50°C e 60°C nelle modalità ventilate e superiori a 60°C nella modalità tampone; l'aria immessa negli ambienti supera frequentemente i 30°C. Considerando anche il contributo della massa muraria, le efficienze totali raggiungono valori fino a 18,4% nella modalità **Indoor Air Curtain** e 23,7% nella modalità **Supply Air Façade** in condizioni non ombreggiate.

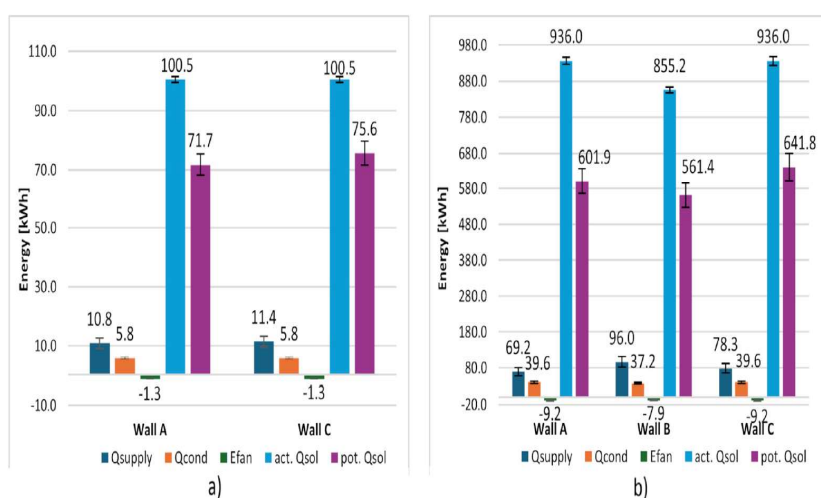


Figura 4.19 — Produzione termica netta e consumo elettrico dei ventilatori.
Confronto tra il calore utile recuperato dal sistema fan-assisted e l'energia elettrica assorbita dai ventilatori, evidenziando il bilancio energetico positivo della configurazione sperimentale.
Fonte: rielaborazione da Karanafti et al. (2025).

Nel quadro della presente ricerca, il caso torinese non viene quindi assunto come semplice esempio applicativo, ma come modello metodologico. Esso dimostra che l'intervento sull'involucro esistente può superare la logica dell'isolamento passivo, trasformando la facciata in un dispositivo capace di captare, accumulare e trasferire energia solare in modo controllato. Per questo motivo, il caso di Torino costituisce il passaggio conclusivo del panorama dei casi studio e introduce direttamente la successiva applicazione progettuale.

4.4.5 SINTESI CONCLUSIVA DEI CASI STUDIO

I casi studio analizzati mostrano come il Muro Trombe possa assumere ruoli differenti a seconda del contesto. Nel caso cinese, il sistema viene impiegato come strategia passiva per il miglioramento del comfort in clima freddo; nel caso messicano, diventa uno strumento per aumentare l'abitabilità e la stabilità termica nell'edilizia sociale; nel caso mediterraneo, viene reinterpretato come componente modulare e stagionalmente controllato; nel caso torinese, infine, evolve in un sistema sperimentale fan-assisted, applicato su edificio esistente e integrato nella facciata.

Nel complesso, il panorama applicativo conferma che l'efficacia del Muro Trombe non dipende solo dal principio di captazione solare, ma dalla capacità di adattare il sistema a clima, orientamento, massa disponibile, modalità di ventilazione e strategia di controllo. La traiettoria che emerge è quindi coerente con il tema della presente ricerca: il passaggio da un involucro passivo a un involucro attivo, capace di rispondere in modo differenziato alle condizioni stagionali e alle esigenze del retrofit edilizio.

05.

**APPLICAZIONI DI
FACCIATA ATTIVA
AL CASO STUDIO**

Il percorso sviluppato nei capitoli precedenti ha evidenziato come i sistemi solari ad aria e i Muri Trombe evoluti possano trasformare l'involucro edilizio da elemento prevalentemente passivo a componente attivo, capace di interagire con la radiazione solare, la ventilazione e il comportamento termico degli ambienti interni.

A partire da queste premesse, il sistema Responsive Parasite viene interpretato come un dispositivo modulare di facciata attiva, pensato per essere applicato sull'edificio esistente senza sostituirne integralmente la struttura originaria. Il termine “parasite” non viene inteso come elemento estraneo o puramente aggiuntivo, ma come componente applicato capace di innestarsi sull'involucro esistente, sfruttandone le superfici disponibili e integrando nuove funzioni energetiche.

Tali configurazioni derivano dalla lettura dei casi studio analizzati e dalla necessità di adattare il dispositivo a edifici esistenti caratterizzati da orientamenti, vincoli geometrici, superfici opache e rapporti con gli ambienti interni differenti.

5.1 IL CASO STUDIO DI TORINO COME RIFERIMENTO PER IL SISTEMA DI FACCIATA ATTIVA

¹ Fonte: Karanafti, Badino, Serra e Fantucci (2025), *Experimental study on the effect of the ventilation and operation mode on the thermal efficiency of a full-scale Trombe wall under real operating conditions*.

Il sistema Responsive Parasite assume come riferimento tecnico di partenza il modello sperimentale di **Muro Trombe fan-assisted** analizzato da *Karanafti, Badino, Serra e Fantucci (2025)*¹, sviluppato a scala reale su un edificio residenziale esistente a Torino. L'interesse di tale studio non riguarda soltanto le prestazioni misurate, ma soprattutto la possibilità di trasformare un sistema solare passivo in un dispositivo controllabile, nel quale la ventilazione meccanica consente di regolare il flusso d'aria e di utilizzare la cavità come canale per il preriscaldamento.

A partire da questo riferimento, Responsive Parasite non viene inteso come semplice riproduzione del Muro Trombe tradizionale, ma come una sua rielaborazione progettuale in chiave leggera, modulare e applicabile al retrofit.

Il sistema riprende alcuni principi fondamentali: la captazione della radiazione solare, la presenza di un'intercapedine ventilata, l'utilizzo di una superficie assorbente e il controllo della portata d'aria. Questi elementi vengono però adattati a una logica di intervento più flessibile, capace di confrontarsi con le condizioni geometriche e architettoniche dell'edificio esistente.

Rispetto al Muro Trombe convenzionale, il sistema proposto non richiede necessariamente una parete massiva di grande spessore come unico elemento di accumulo. La sua efficacia viene ricercata attraverso la combinazione tra strato esterno leggero, intercapedine ventilata, superficie assorbente e gestione della portata d'aria. In questo modo, la facciata può essere interpretata come un'interfaccia energetica capace di assumere configurazioni diverse in funzione dell'orientamento, della continuità della superficie disponibile e del rapporto con gli ambienti interni.

Questa impostazione permette di spostare l'attenzione dal singolo componente tecnico alla sua possibile integrazione nell'edificio. Il sistema non viene quindi considerato come una soluzione unica e standardizzata, ma come un dispositivo adattabile, declinabile in configurazioni differenti a seconda delle caratteristiche dell'involucro esistente e degli obiettivi dell'intervento.

5.2 CONFIGURAZIONI APPLICATIVE DEL SISTEMA

5.2.1 CONFIGURAZIONE SU PROSPETTO CIECO LATERALE

La prima configurazione applicativa riguarda l'installazione del sistema su prospetti ciechi laterali. Questa condizione è frequente negli edifici residenziali pluripiano, dove alcune pareti laterali presentano superfici opache continue, prive di aperture o caratterizzate da una limitata presenza di bucatore.

L'applicazione su prospetto cieco consente di sfruttare superfici spesso poco valorizzate dal punto di vista energetico e architettonico. In questa configurazione, il sistema Responsive Parasite può essere disposto come una fascia verticale o come una sequenza di moduli affiancati, trasformando una superficie prevalentemente disperdente in un elemento capace di captare radiazione solare e contribuire al preriscaldamento dell'aria.

Lo schema progettuale dell'intervento, con i moduli attivi applicati ai prospetti ciechi laterali, è riportato in **Figura 5.1**.

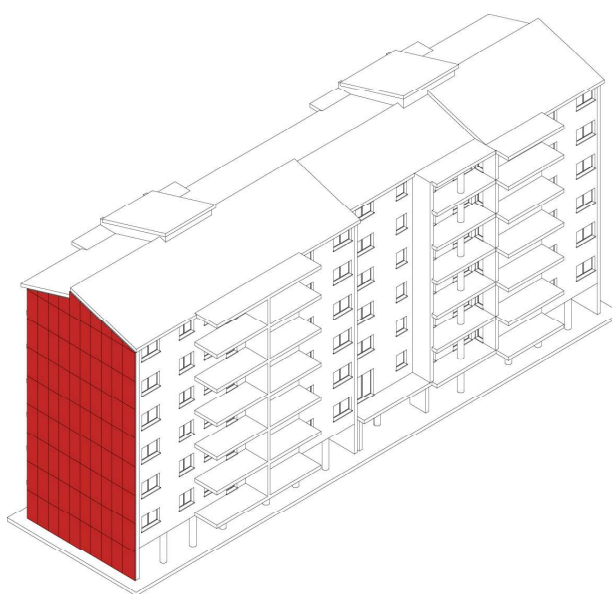


Figura 5.1 — Schema progettuale dell'intervento Responsive Parasite. In rosso sono evidenziati i moduli attivi applicati ai prospetti ciechi laterali. Fonte: elaborazione propria.

Il vantaggio principale di questa soluzione è la continuità della superficie disponibile, l'assenza di finestre, balconi o elementi aggettanti permette una maggiore libertà nella disposizione dei moduli e riduce le interferenze con la distribuzione interna degli ambienti.

Inoltre, la presenza di una superficie cieca facilita l'integrazione del sistema senza alterare in modo significativo il rapporto tra pieni e vuoti della facciata principale.

Dal punto di vista progettuale, questa configurazione risulta particolarmente adatta quando il prospetto presenta un orientamento favorevole e una buona esposizione solare.

La continuità verticale del sistema può inoltre favorire l'attivazione dei moti convettivi all'interno dell'intercapedine, soprattutto nelle soluzioni che prevedono una ventilazione naturale o ibrida.

Allo stesso tempo, l'applicazione su prospetto cieco richiede una verifica attenta del rapporto tra il sistema e gli ambienti serviti. Il dispositivo, infatti, non deve essere considerato come un semplice rivestimento esterno, ma come un componente capace di dialogare con gli spazi interni attraverso immissioni d'aria, canalizzazioni o punti di collegamento localizzati.

Per questo motivo, la continuità della superficie esterna deve essere valutata insieme alla distribuzione interna dell'edificio.

5.2.2 CONFIGURAZIONE PUNTUALE E MODULARE

La seconda configurazione riguarda un'applicazione puntuale e modulare del sistema. In questo caso, il Responsive Parasite non viene esteso in modo continuo sull'intera facciata, ma viene inserito solo in alcune porzioni dell'involucro, selezionate in base all'esposizione, alla disponibilità di superficie e al rapporto con gli ambienti interni.

Questa soluzione risulta particolarmente adatta agli edifici caratterizzati da prospetti frammentati, con finestre, balconi, rientranze o elementi architettonici che non consentono l'inserimento di una pelle continua.

Il sistema può quindi assumere la forma di moduli indipendenti, applicati in corrispondenza delle superfici opache disponibili e dimensionati in funzione delle esigenze del singolo ambiente o della singola unità abitativa.

La logica di inserimento puntuale dei moduli nelle porzioni libere del prospetto è rappresentata in **Figura 5.2**.

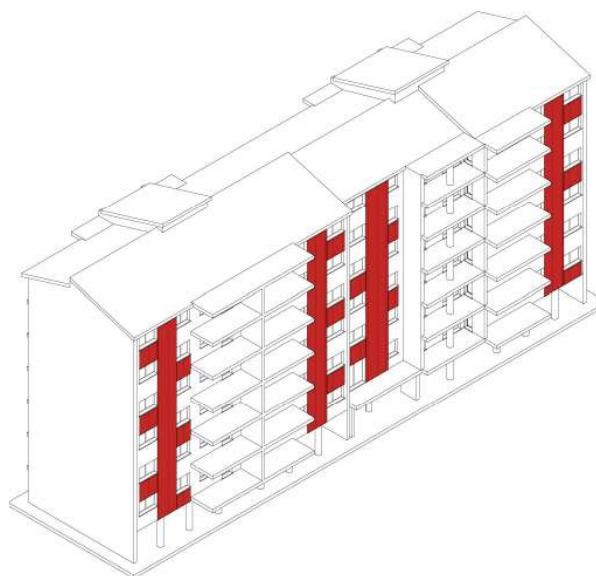


Figura 5.2 — Schema di applicazione puntuale del sistema Responsive Parasite.

Inserimento rarefatto dei moduli attivi di facciata nelle porzioni libere del prospetto, in relazione alla configurazione delle aperture esistenti. Sono indicati i pannelli con vegetazione integrati sui fronti dei balconi.

Fonte: elaborazione propria.

La configurazione puntuale permette una maggiore flessibilità di intervento, ogni modulo può essere progettato come unità autonoma, dotata di uno strato esterno trasparente o semitrasparente, di un'intercapedine ventilata, di una superficie assorbente e un ventilatore per il controllo della portata d'aria. In questo modo, il sistema può essere adattato progressivamente all'edificio, senza richiedere una trasformazione completa dell'intero prospetto.

Questa modalità è coerente con la logica del retrofit selettivo, perché consente di intervenire solo sulle porzioni di facciata realmente favorevoli dal punto di vista solare e funzionale.

La scelta dei punti di applicazione dipende quindi da diversi fattori: orientamento, ombreggiamento, vicinanza agli ambienti principali, possibilità di immissione dell'aria preriscaldata e compatibilità con la composizione architettonica del prospetto.

Rispetto alla configurazione su prospetto cieco, l'applicazione puntuale ha un potenziale energetico più limitato in termini di superficie captante complessiva, ma offre una maggiore adattabilità.

Essa permette inoltre di ridurre l'impatto visivo e costruttivo dell'intervento, mantenendo leggibile la struttura originaria della facciata e introducendo il sistema solo dove risulta realmente utile.

5.2.3 CONFIGURAZIONE A RIVESTIMENTO COMPLETO

La terza configurazione prevede l'estensione del sistema a una porzione ampia o all'intero prospetto dell'edificio. In questo caso, il Responsive Parasite assume il ruolo di una seconda pelle tecnologica, capace di integrare funzioni di protezione, captazione solare e ventilazione controllata.

La configurazione a rivestimento completo, con applicazione estesa della nuova pelle sui prospetti dell'edificio, è sintetizzata in **Figura 5.3**.

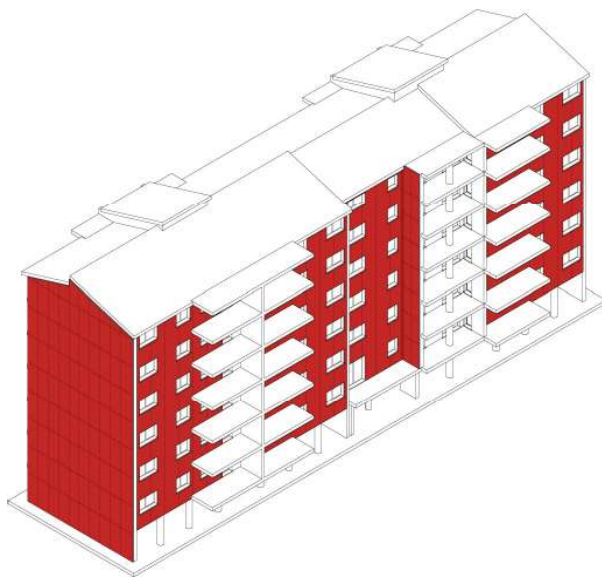


Figura 5.3 — Responsive Parasite: rivestimento completo dell'involucro. Schema assometrico dell'intervento con applicazione estesa della nuova pelle tecnologica, evidenziata in rosso, sui prospetti dell'edificio. Fonte: elaborazione propria.

Il rivestimento completo rappresenta la soluzione con il maggiore potenziale di trasformazione energetica e architettonica. L'estensione del sistema su una superficie ampia permette di aumentare la quota di radiazione intercettata e di costruire una nuova immagine unitaria dell'edificio.

Questa configurazione può risultare particolarmente adatta nei casi in cui il prospetto presenti un forte degrado, una bassa qualità architettonica o una necessità di riqualificazione complessiva.

Dal punto di vista energetico, una pelle continua consente di lavorare non solo sulla captazione solare diretta, ma anche sulla protezione dell'involucro esistente. L'intercapedine ventilata può contribuire alla riduzione delle dispersioni nei periodi freddi e allo smaltimento del calore nei periodi caldi, assumendo un comportamento diverso in funzione della stagione. La presenza di moduli ripetuti permette inoltre di distribuire il sistema lungo la facciata e di adattarne il funzionamento a gruppi di ambienti o unità abitative.

Questa configurazione richiede tuttavia un controllo progettuale più accurato. L'estensione del sistema su grandi superfici comporta infatti maggiori implicazioni strutturali, economiche, manutentive e compositive.

È necessario valutare il peso dei componenti, la facilità di accesso per la pulizia e la manutenzione, la durabilità dei materiali, la gestione delle aperture e il rapporto con le parti finestate. Per questi motivi, la foderazione completa non deve essere considerata come soluzione automaticamente preferibile.

Essa può risultare efficace quando l'edificio richiede una trasformazione profonda dell'involucro, ma deve essere confrontata con configurazioni più leggere e selettive, capaci di ottenere benefici localizzati con un impatto più contenuto.

5.3 CRITERI DI SCELTA TRA LE CONFIGURAZIONI

Le tre configurazioni descritte non rappresentano soluzioni alternative in senso assoluto, ma possibili modalità di applicazione dello stesso principio progettuale. La scelta tra prospetto cieco, applicazione puntuale e rivestimento completo dipende dalle condizioni specifiche dell'edificio e dagli obiettivi dell'intervento. Il primo criterio riguarda l'orientamento. Le superfici più favorevoli sono quelle capaci di intercettare una quantità significativa di radiazione solare durante il periodo invernale, quando il contributo del sistema può risultare più utile per il preriscaldamento dell'aria. La presenza di ombreggiamenti permanenti, edifici vicini o aggetti profondi può invece ridurre l'efficacia del dispositivo e rendere meno conveniente l'applicazione su alcune porzioni di facciata.

Il secondo criterio riguarda la continuità della superficie disponibile. Le pareti cieche o poco frammentate favoriscono configurazioni più estese, mentre i prospetti caratterizzati da molte aperture richiedono soluzioni puntuali e modulari.

In entrambi i casi, il sistema deve essere integrato senza compromettere la funzionalità degli ambienti interni e senza alterare in modo incoerente la composizione architettonica dell'edificio.

Un terzo criterio riguarda il rapporto con la ventilazione. Poiché il sistema lavora attraverso il movimento dell'aria nella cavità, la sua applicazione deve essere valutata in relazione agli ambienti che possono ricevere aria preriscaldata o beneficiare del comportamento termico della facciata.

La configurazione fan-assisted permette un maggior **controllo** ² rispetto alla sola ventilazione naturale, ma richiede l'inserimento di componenti ausiliari, alimentazione elettrica e logiche di attivazione.

Alla luce di questi criteri, il sistema Responsive Parasite viene assunto come dispositivo flessibile, declinabile in configurazioni diverse ma fondato su un principio comune: trasformare porzioni selezionate dell'involucro esistente in superfici attive, capaci di contribuire al comportamento energetico dell'edificio.

² Il controllo dipende dalla possibilità di regolare accensione, spegnimento e portata dei ventilatori in base alla temperatura della cavità e degli ambienti interni.

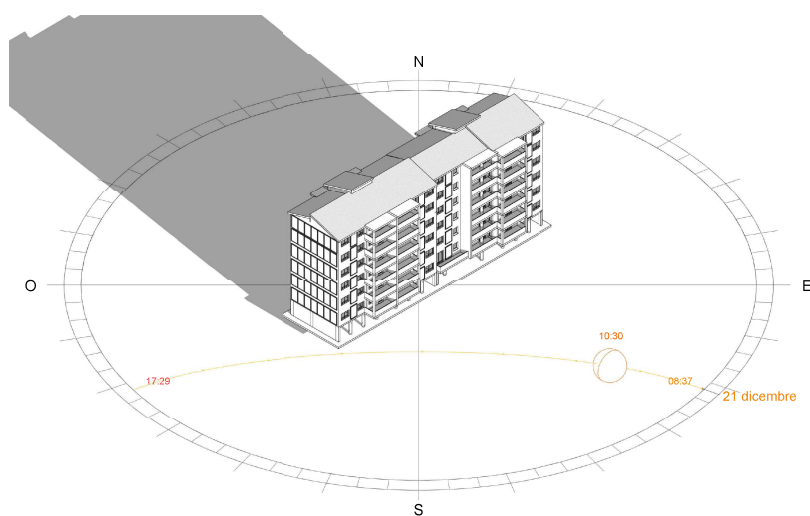
5.4 ANALISI DELLE OMBRE E INDIVIDUAZIONE DELLE SUPERFICI DI APPLICAZIONE

L'analisi delle ombre è stata utilizzata per definire il posizionamento dei pannelli in facciata.

La scelta delle superfici di applicazione non è stata quindi determinata soltanto dalla disponibilità geometrica dell'involucro, ma anche dalla necessità di evitare zone soggette a ombreggiamenti prodotti da aggetti, balconi o elementi esterni all'edificio.

Poiché il funzionamento del sistema Responsive Parasite dipende dalla captazione della radiazione solare, i pannelli sono stati collocati nelle porzioni di facciata maggiormente esposte, in modo da massimizzare l'irraggiamento disponibile e favorire l'efficienza energetica del sistema.

Come rappresentato in **Figura 5.4**, nella configurazione proposta viene sfruttata la parete cieca presente sul lato **sud-ovest** dell'edificio, insieme alle fasce verticali comprese tra le aperture sul lato **sud-est**. Questa scelta consente di utilizzare superfici opache continue o parzialmente libere, limitando le interferenze con serramenti e balconi e valorizzando le porzioni di involucro più adatte all'integrazione dei moduli attivi.



*Figura 5.4 — Studio delle ombre solstizio di inverno orario (mattina).
Fonte: elaborazione propria*

5.5 STRATIGRAFIA E COMPONENTI DEL PANNELLO RESPONSIVE PARASITE

Il pannello Responsive Parasite è composto da diversi strati funzionali, ciascuno dei quali contribuisce al comportamento complessivo del sistema. Come rappresentato in **Figura 5.5**, la stratigrafia del modulo può essere letta dall'esterno verso l'interno, distinguendo lo strato trasparente, l'intercapedine d'aria, lo strato assorbitore e il sistema di ventilazione integrato alla parete esistente.

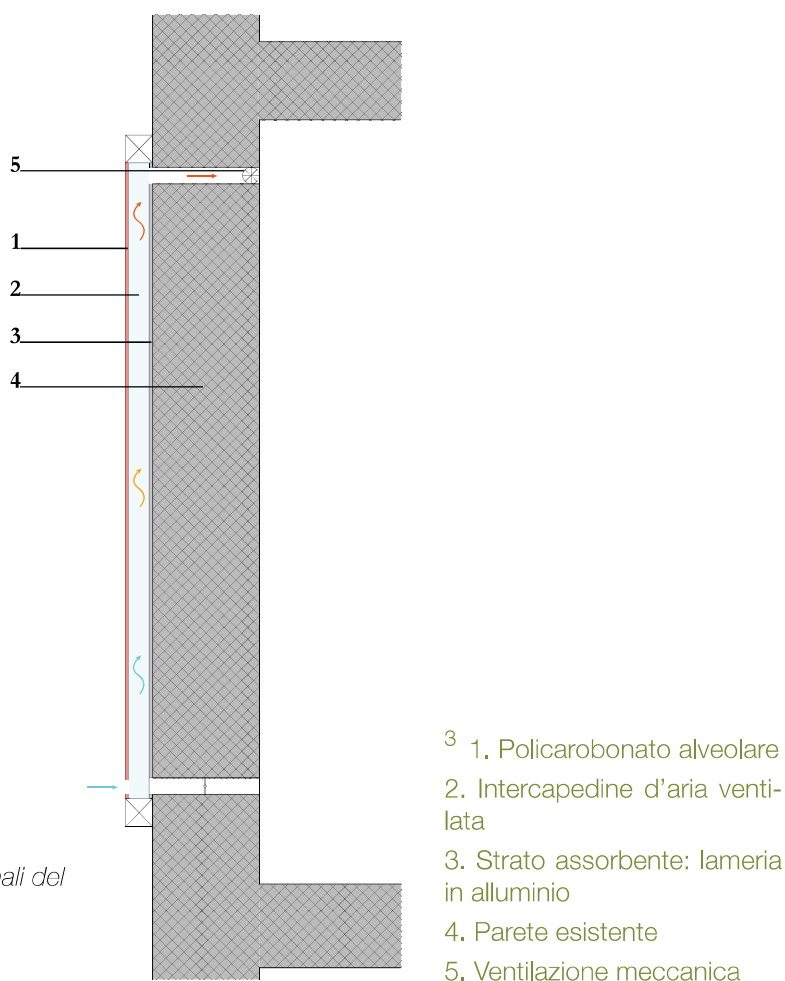


Figura 5.5 — Schema dei layer funzionali del sistema Responsive Parasite³.
Fonte: elaborazione propria

Lo strato più esterno è costituito da un elemento trasparente o semitrasparente, nel caso in esame è stato scelto un pannello in polycarbonato alveolare, con la funzione di consentire il passaggio della radiazione solare e favorire l'attivazione dell'effetto serra all'interno della cavità.

La radiazione incidente attraversa lo strato esterno e raggiunge la superficie assorbente, contribuendo all'aumento della temperatura dell'aria contenuta nell'intercapedine.

Dietro lo strato trasparente è presente un'intercapedine d'aria dello spessore di 8 cm. Questo spazio favorisce lo scambio termico tra l'aria in movimento all'interno della cavità e lo strato assorbitore disposto in prossimità della parete esistente.

Lo strato assorbitore può essere realizzato con materiali differenti; in questa proposta è stata scelta una lamiera in alluminio, caratterizzata da un pattern superficiale pensato per aumentare la superficie di scambio termico durante il passaggio dell'aria.

In corrispondenza della parete esistente viene inoltre integrato un sistema di ventilazione meccanica con recuperatore di calore. Tale sistema consente di immettere aria preriscaldata all'interno degli ambienti, contribuendo al raggiungimento della temperatura di set-point e riducendo il fabbisogno energetico legato al riscaldamento.

In questo modo il pannello non svolge soltanto una funzione di rivestimento, ma diventa un componente attivo capace di partecipare agli scambi energetici tra esterno, involucro e spazio interno.

06.

**VALUTAZIONE
ENERGETICA
DEL SISTEMA
APPLICATO**

Dopo aver definito le configurazioni applicative del sistema di facciata attiva e aver individuato, attraverso l'analisi delle ombre, le superfici più idonee all'inserimento dei pannelli, il presente capitolo approfondisce l'applicazione del sistema al caso studio.

L'obiettivo non è più descrivere il dispositivo dal punto di vista configurativo e progettuale, ma valutarne il possibile contributo energetico all'interno del modello dell'edificio. Per questo motivo, l'analisi viene condotta mediante il confronto tra scenari energetici differenti.

6.1 ANALISI COMPARATIVA DEGLI SCENARI ENERGETICI

Per verificare l'efficacia del sistema Responsive Parasite dal punto di vista della riqualificazione energetica, è stata condotta un'analisi comparativa sui modelli energetici dello stato ante operam e dello stato attuale.

L'obiettivo è valutare in che misura l'integrazione di un sistema di ventilazione meccanica con recuperatore di calore possa incidere sulla riduzione del fabbisogno di energia per il riscaldamento. A tal fine sono stati realizzati quattro modelli energetici. Per lo stato ante operam sono stati costruiti due scenari: il primo con ventilazione meccanica, il secondo con ventilazione meccanica integrata a recuperatore di calore.

Lo stesso procedimento è stato applicato allo stato attuale, ottenendo anche in questo caso un modello con sola ventilazione meccanica e un modello con ventilazione meccanica dotata di recuperatore di calore. Questa impostazione consente di confrontare i diversi scenari a parità di condizioni di ventilazione, isolando il contributo del recuperatore di calore sul bilancio energetico dell'edificio. Il confronto tra i modelli permette quindi di quantificare la riduzione del fabbisogno utile per il riscaldamento attribuibile al sistema integrato e di valutare il possibile contributo del Responsive Parasite come strategia complementare agli interventi di riqualificazione tradizionali.

Come descritto in precedenza, l'analisi delle ombre ha permesso di individuare le porzioni di facciata più idonee all'applicazione del sistema. Tali superfici sono state quindi riportate nel modello energetico, come rappresentato in **Figura 6.3**, al fine di valutare il contributo del sistema Responsive Parasite sul comportamento energetico dell'edificio.

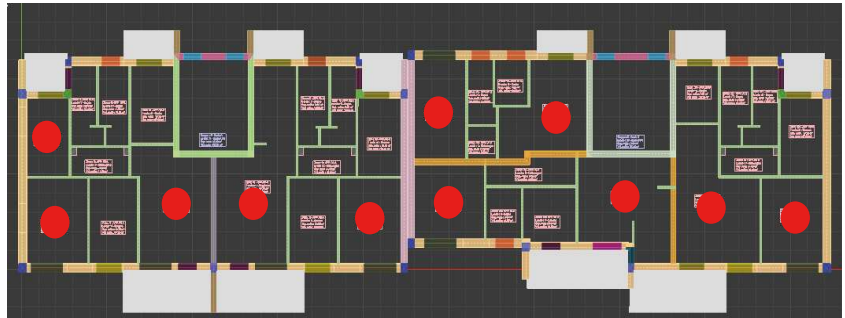


Figura 6.1 — Serie di elaborati estratti dal software Edilclima EC700.
Fonte: elaborazione propria

6.1.1 SCENARIO CON VENTILAZIONE MECCANICA

Il modello con sola ventilazione meccanica è stato impostato intervenendo esclusivamente sul parametro relativo al ricambio d'aria dei locali interessati dall'applicazione del sistema. Per ogni appartamento sono stati individuati due locali serviti da ventilazione meccanica; in un appartamento, caratterizzato da una migliore esposizione e da una maggiore superficie disponibile per l'inserimento dei pannelli, sono stati invece considerati tre locali.

Come rappresentato in **Figura 6.4**, la distribuzione dei locali serviti da ventilazione meccanica è stata individuata a partire dalla pianta del piano tipo, evidenziando gli ambienti direttamente interessati dall'applicazione del sistema.



*Figura 6.2 — Individuazione dei locali serviti da ventilazione meccanica.
Schema della pianta del piano tipo con evidenziazione
degli ambienti interessati dal ricambio d'aria.
Fonte: elaborazione propria*

Questa distribuzione è stata definita con l'obiettivo di bilanciare l'applicazione del sistema tra le diverse unità abitative, evitando di concentrare il contributo della ventilazione su un solo appartamento rendendo il modello più rappresentativo dell'intero edificio.

Come rappresentato in **Figura 6.5**, nei locali selezionati è stata inserita una ventilazione meccanica calcolata a partire dalla portata d'aria associata a ciascun pannello, pari a $43 \text{ m}^3/\text{h}$.

Il ricambio d'aria dei locali è stato quindi definito in funzione della portata del singolo pannello e del volume netto dell'ambiente, in modo da associare a ciascun locale un valore di ventilazione coerente con il contributo del sistema applicato in facciata.

Altezza netta	2,70	m
Superficie utile	25,57	= 25,57 m ²
Volume netto	69,04	m ³

Temperature interne		Apporti interni aggiuntivi	
Potenza invernale	θ _{int,p,H} 20,0 °C	Energia invernale	0,0 W
Energia invernale	θ _{int,e,H} 20,0 °C	Energia estiva	0,0 W
Energia estiva	θ _{int,e,C} 26,0 °C		

Ventilazione	
Ventilazione	☐ Naturale ☒ Meccanica ☐ Ibrida
Metodo di calcolo	Calcolo con ricambi d'aria
f _{ve,t}	0,50

Ricambi d'aria di riferimento	
Potenza invernale	n _{p,H} 0,62 Vol/h
Energia invernale	n _{e,H} 0,50 Vol/h
Energia estiva	n _{e,C} 0,50 Vol/h

Figura 6.3 — Impostazione della ventilazione meccanica nel modello energetico.

Fonte: elaborazione propria mediante Edilclima EC700.

6.1.2 SCENARIO CON VENTILAZIONE MECCANICA + RECUPERATORE DI CALORE

Nel modello con ventilazione meccanica e recuperatore di calore è stato considerato anche il contributo del pannello applicato in facciata. Per rappresentare il sistema all'interno del modello energetico, nella stratigrafia della parete esistente è stato inserito un **materiale non omogeneo**, caratterizzato da una resistenza termica equivalente (R^*). Tale valore è stato ricavato a partire dalla trasmittanza della parete esistente, calcolando inizialmente la resistenza della parete come inverso della trasmittanza.

Il valore ottenuto è stato successivamente diviso per un coefficiente di correzione **b_{tr}** pari a 0,7 e da questo risultato è stata infine sottratta la resistenza iniziale della parete. In questo modo è stato possibile attribuire al sistema applicato in facciata un contributo termico aggiuntivo rispetto alla parete esistente.

Inoltre, come rappresentato in **Figura 6.6**, nel modello è stato inserito il recuperatore di calore associato alla ventilazione meccanica. L'efficienza del recuperatore è stata posta pari al 25%, mentre il coefficiente relativo al **fattore di efficienza della regolazione** è stato assunto pari a 0,6.

Tali valori permettono di valutare il contributo del sistema al recupero del calore dall'aria e alla riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento.

The screenshot displays the 'Ventilazione meccanica bilanciata' (Balanced mechanical ventilation) configuration window. At the top, the 'Dispositivi presenti' (Devices present) section has 'Recuperatore di calore' (Heat exchanger) checked, while 'Riscaldamento aria' (Air heating) and 'Umidificazione' (Humidification) are unchecked. Below this is a schematic diagram of a house with a mechanical ventilation unit (represented by a yellow box with a blue and red coil) connected to the house via two ducts: a red supply duct and a blue return duct, both equipped with fans. The 'Portate aggiuntive di infiltrazione' (Additional infiltration flows) section includes a checkbox for 'Trascura portate aggiuntive di infiltrazione' (Ignore additional infiltration flows), which is currently unchecked. Below this, the 'Ricambi d'aria a 50 Pa' (Air changes at 50 Pa) is set to 1.00 1/h, with coefficients 'e' (0.10) and 'f' (15.00). The 'Ricambio d'aria medio per ventilazione naturale' (Average air change for natural ventilation) is set to 0.50. The 'Dati per calcolo mensile' (Monthly calculation data) section contains two sub-sections: 'Funzionamento dell'impianto' (System operation) and 'Recuperatore di calore' (Heat exchanger). In the 'Funzionamento dell'impianto' section, the 'Fattore di efficienza della regolazione' (Regulation efficiency factor) is set to 0.60 for both 'invernale' (winter) and 'estivo' (summer) periods, and the 'Ore di funzionamento dell'impianto' (System operating hours) is set to 24.00 for both. In the 'Recuperatore di calore' section, the 'Rendimento nominale recuperatore' (Nominal heat exchanger efficiency) is set to 0.25 for both periods.

Figura 6.4 — Impostazione del recuperatore di calore nel modello energetico.
Fonte: elaborazione propria mediante Edilclima EC700.

6.2 ANALISI DEI RISULTATI

L'analisi dei risultati viene impostata su due livelli. Il primo riguarda il comportamento energetico dell'intero fabbricato, utile per valutare l'incidenza complessiva del sistema Responsive Parasite sulla prestazione dell'edificio. Il secondo riguarda invece alcuni approfondimenti condotti su singole unità abitative, selezionate in funzione del numero di pannelli applicati, dell'esposizione e della superficie disponibile.

La lettura dei risultati non viene basata esclusivamente sull'**indice di prestazione energetica**, ma pone particolare attenzione al **fabbisogno di energia primaria non rinnovabile per il servizio di riscaldamento**. Tale parametro risulta infatti più coerente con il funzionamento del sistema proposto, poiché **Responsive Parasite** interviene principalmente sul trattamento dell'aria, sulla ventilazione e sul recupero di calore.

6.2.1 STATO PRE RETROFIT

DATI	V.M.	V.M. + R.C. 25%
Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento ($Q_{p,nren}$ - kWh/anno)	156.734	134.549
Indice di prestazione energetica ($EP_{gl, nren}$ - kWh/m ² anno)	116,95	106,11
Classe energetica	D	D

Tabella 6.1 — Confronto dei risultati energetici nello stato pre retrofit.
Confronto tra modello con sola ventilazione meccanica e modello con ventilazione meccanica integrata a recuperatore di calore con efficienza pari al 25%.

Fonte: elaborazione propria da dati Edilclima EC700.

Nel modello relativo allo stato pre retrofit, il **fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento** passa da **156.734 kWh/anno** a **134.549 kWh/anno**, con una riduzione pari a circa il **14,2%**.

Il sistema Responsive Parasite, configurato come soluzione fan-assisted con recuperatore di calore al 25%, mostra quindi un contributo misurabile alla riduzione dei consumi per il riscaldamento.

Il beneficio risulta tuttavia limitato dalle caratteristiche dell'involucro, ancora caratterizzato da dispersioni per trasmissione significative. In questa condizione, il recupero di calore migliora il comportamento energetico del sistema, ma non è sufficiente a modificare in modo sostanziale la prestazione complessiva dell'edificio.

6.2.2 STATO ATTUALE (SUPERBONUS 110%)

DATI	V.M.	V.M. + R.C. 25%
Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento ($Q_{p,nren}$ - kWh/anno)	66.452	50.132
Indice di prestazione energetica ($EP_{gl, nren}$ - kWh/m ² anno)	47,61	40,50
Classe energetica	A2	A2

Tabella 6.2 — Confronto dei risultati energetici nello stato attuale post Superbonus 110%.

*Confronto tra modello con sola ventilazione meccanica e modello con ventilazione meccanica integrata a recuperatore di calore con efficienza pari al 25%.
Fonte: elaborazione propria da dati Edilclima EC700.*

Nello stato attuale, il **fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento** passa da **66.452 kWh/anno** a **50.132 kWh/anno**, con una riduzione pari a circa il **24,6%**. Il miglioramento risulta quindi più rilevante rispetto allo stato ante operam.

Questa differenza può essere ricondotta alla maggiore qualità dell'involucro nello stato attuale, caratterizzato da prestazioni termiche più elevate e da una minore incidenza delle dispersioni per trasmissione. In un edificio già riqualificato, il controllo della ventilazione e il recupero di calore assumono un peso maggiore nel bilancio energetico, rendendo più evidente il contributo del sistema **Responsive Parasite**.

6.3 APPROFODIMENTO SULLE UNITA' ABITATIVE CAMPIONE

Dopo il confronto condotto sull'intero fabbricato, l'analisi viene approfondita su due unità abitative campione: **l'Appartamento 3 della Scala A** e **l'Appartamento 5 della Scala B**. La scelta di questi due casi permette di confrontare configurazioni differenti, caratterizzate da un diverso numero di pannelli applicati, da una diversa esposizione e da una differente disponibilità di superficie in facciata.

L'Appartamento 3 della Scala A rappresenta la configurazione più favorevole, poiché è servito da tre pannelli e dispone di una maggiore superficie utile per l'applicazione del sistema. L'Appartamento 5 della Scala B, invece, è servito da due pannelli e consente di valutare il comportamento del sistema in una condizione di applicazione più contenuta. In questo caso, uno dei pannelli è collocato sul prospetto **sud-ovest**, in corrispondenza della parete cieca, e l'aria preriscaldata viene immessa nell'ambiente attraverso un sistema di canalizzazione.

La scelta di sfruttare il prospetto cieco sud-ovest deriva dalla volontà di inserire il maggior numero possibile di pannelli sulle superfici opache disponibili, in modo da servire anche gli appartamenti che, sul prospetto principale, sarebbero stati interessati da un solo pannello e quindi da un solo ambiente con ventilazione meccanica. Questa soluzione permette di ampliare il numero di locali serviti dal sistema e di rendere più equilibrata la distribuzione del contributo energetico tra le diverse unità abitative, come mostrato nella **Figura 6.7**.

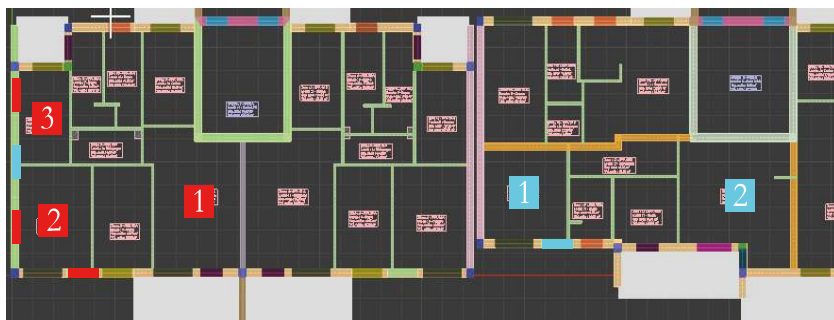


Figura 6.5 — Locali serviti dal sistema Responsive Parasite negli appartamenti campione.

Fonte: elaborazione propria da dati Edilclima EC700.

I risultati relativi ai due appartamenti campione sono riportati nelle **Tabelle 6.3 e 6.4**, distinte tra stato ante operam e stato attuale, così da rendere più immediato il confronto tra le configurazioni analizzate.

STATO ANTE

APP.	DATI	V.M	V.M+R.C	%
3 A	Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento ($Q_{p,nren}$ - kWh/anno)	6.019	5.008	17%
5 B	Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento ($Q_{p,nren}$ - kWh/anno)	3.431	2.847	17%

Tabella 6.3 — Confronto del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento negli appartamenti campione nello stato pre retrofit.
Fonte: elaborazione propria da dati Edilclima EC700.

STATO ATTUALE (SUPERBONUS 110%)

APP.	DATI	V.M	V.M+R.C	%
3 A	Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento ($Q_{p,nren}$ - kWh/anno)	2.249	1.620	28%
5 B	Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento ($Q_{p,nren}$ - kWh/anno)	1.616	1.147	29%

Tabella 6.4 — Confronto del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento negli appartamenti campione nello stato attuale post Superbonus 110%.
Fonte: elaborazione propria da dati Edilclima EC700.

Il confronto tra le due unità abitative evidenzia come, nello stato ante operam, la riduzione del **fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento** risulti pari al **17%** in entrambi i casi analizzati. Nello stato attuale post Superbonus, invece, il beneficio aumenta, raggiungendo il **28%** per l'Appartamento 3 della Scala A e il **29%** per l'Appartamento 5 della Scala B.

Questo andamento mostra come il contributo del sistema risulti più evidente in presenza di un involucro già riqualificato, confermando l'importanza del rapporto tra prestazione dell'edificio e numero di pannelli applicati.

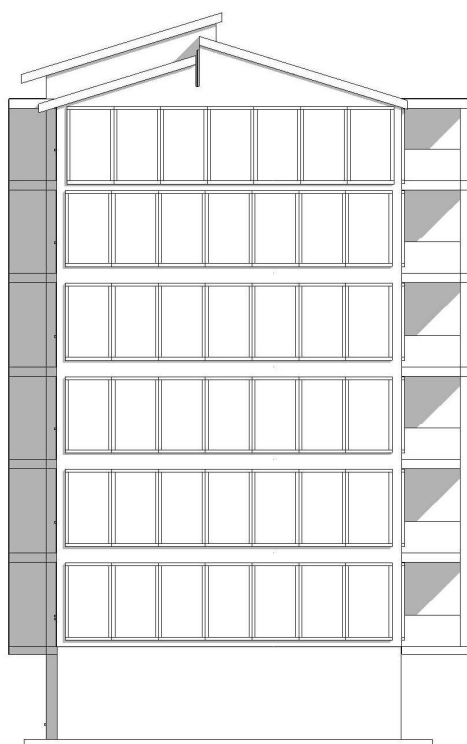
6.4 ELABORATI PROGETTUALI FINALI

A conclusione del capitolo vengono riportati gli elaborati progettuali finali relativi all'applicazione del sistema **Responsive Parasite** sull'edificio oggetto di studio. Gli elaborati hanno lo scopo di restituire non solo la posizione dei pannelli sulle superfici opache disponibili, ma anche l'impatto complessivo del sistema sulla composizione architettonica dei prospetti.

In particolare, i prospetti permettono di verificare la distribuzione dei moduli sulle diverse facciate e il rapporto tra il nuovo sistema tecnologico, le aperture esistenti e la geometria dell'edificio.

L'assonometria consente invece di leggere in modo più immediato la configurazione complessiva dell'intervento, evidenziando il ruolo del Responsive Parasite come dispositivo applicato all'involucro esistente.

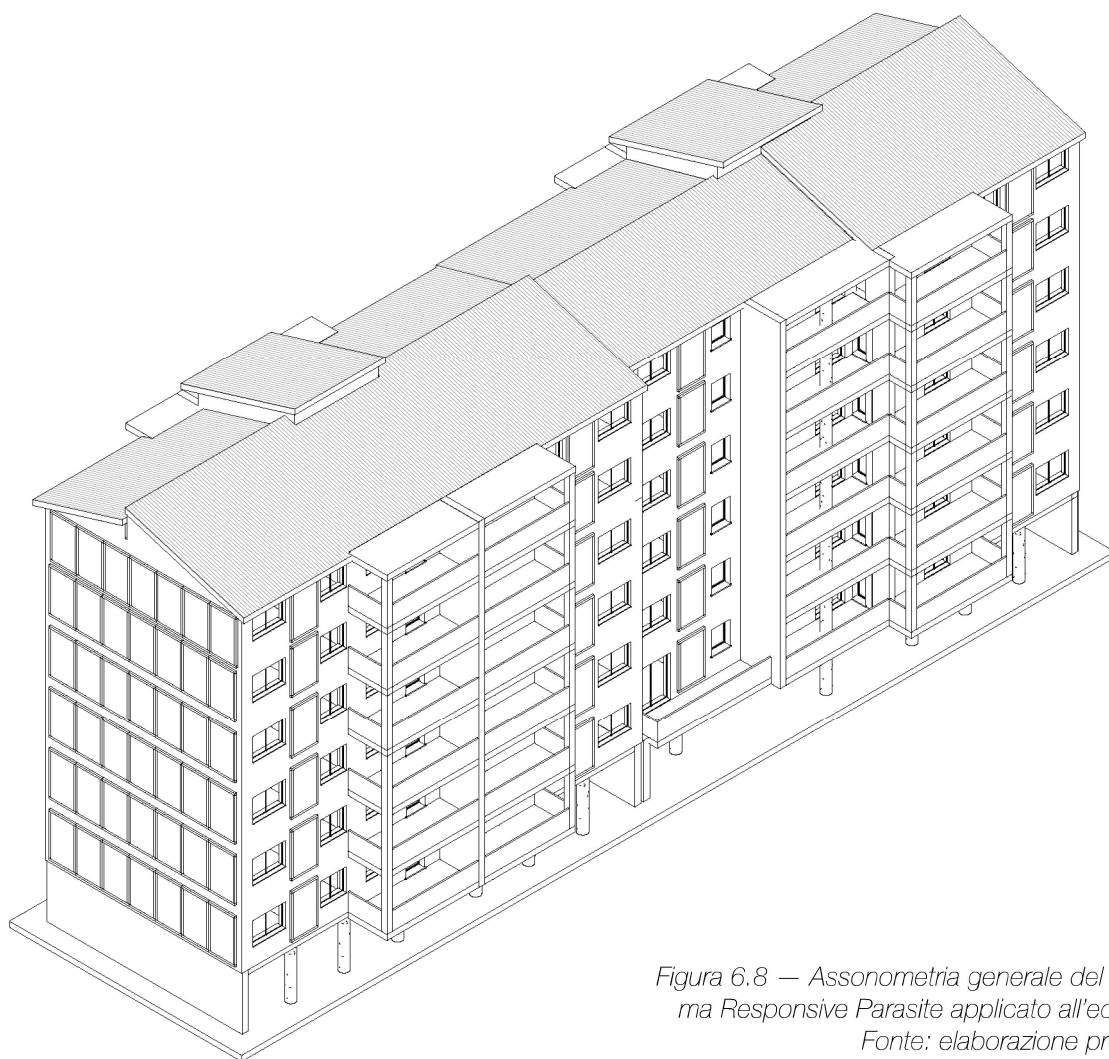
Gli elaborati finali rappresentano quindi la sintesi tra valutazione energetica e proposta architettonica, mostrando come il sistema possa essere integrato nella facciata senza limitarsi a una funzione esclusivamente impiantistica, ma assumendo anche un ruolo nella riqualificazione dell'immagine dell'edificio.



*Figura 6.6 — Prospetto Sud-Ovest con applicazione del sistema Responsive Parasite.
Fonte: elaborazione propria.*



*Figura 6.7 — Prospetto Sud-Est con applicazione del sistema Responsive Parasite..
Fonte: elaborazione propria.*



*Figura 6.8 — Assonometria generale del sistema Responsive Parasite applicato all'edificio.
Fonte: elaborazione propria.*

07.

CONCLUSIONI

Dalle analisi sviluppate nel corso della tesi è emerso come la riqualificazione energetica del patrimonio residenziale esistente non possa essere affidata esclusivamente a interventi puntuali sull'involucro o sugli impianti, ma richieda una lettura più integrata del sistema edificio.

In questo quadro, l'involucro edilizio assume un ruolo centrale: non più soltanto elemento di separazione tra ambiente interno ed esterno, ma componente capace di contribuire attivamente al controllo degli scambi energetici, della ventilazione e del comfort interno.

Il caso studio analizzato ha permesso di confrontare due condizioni significative dell'edificio: lo stato pre retrofit e lo stato attuale post Superbonus 110%. Il confronto ha evidenziato come gli interventi tradizionali di riqualificazione abbiano prodotto un miglioramento rilevante della prestazione energetica, soprattutto attraverso la riduzione delle dispersioni per trasmissione. Tuttavia, la lettura del bilancio energetico ha mostrato anche come le dispersioni legate alla ventilazione rimangano sostanzialmente invariate, rappresentando una componente ancora significativa del fabbisogno complessivo.

Da questa osservazione nasce l'interesse per sistemi di facciata attiva capaci di integrare il miglioramento dell'involucro con il trattamento dell'aria e il recupero di calore.

La ricerca ha quindi approfondito i principi dei sistemi solari ad aria, delle facciate ventilate opache e del Muro Trombe, individuando in questi riferimenti un passaggio teorico verso un involucro più dinamico, adattabile e capace di interagire con le condizioni climatiche esterne.

A partire da questi riferimenti, il sistema Responsive Parasite è stato interpretato come una soluzione integrativa per il retrofit energetico, basata sulla captazione della radiazione solare, sul preriscaldamento dell'aria all'interno di un'intercapedine e sull'immissione controllata dell'aria negli ambienti interni.

L'obiettivo non è stato quello di proporre un'alternativa agli interventi tradizionali, ma di valutare il contributo di una tecnologia complementare, capace di valorizzare le superfici opache disponibili e di trasformare la facciata in un dispositivo attivo.

L'applicazione al caso studio ha richiesto una valutazione attenta delle condizioni reali dell'edificio. Le configurazioni analizzate sono state definite considerando la geometria del fabbricato, l'esposizione dei prospetti, la presenza di aperture, balconi, ombreggiamenti e superfici disponibili. L'analisi delle ombre ha permesso di individuare le porzioni di facciata più favorevoli all'inserimento dei pannelli, confermando l'importanza del rapporto tra sistema tecnologico e configurazione architettonica dell'edificio esistente.

La valutazione energetica è stata condotta attraverso il confronto tra scenari con sola ventilazione meccanica e scenari con ventilazione meccanica integrata a recuperatore di calore. I risultati ottenuti sull'intero fabbricato mostrano che, nello stato pre retrofit, l'inserimento del sistema determina una riduzione del fabbisogno di energia primaria non rinnovabile per il riscaldamento pari a circa il **14,2%**. Nello stato attuale post Superbonus 110%, invece, la riduzione raggiunge circa il **24,6%**.

Questo andamento evidenzia come il contributo della facciata attiva diventi più significativo in presenza di un involucro già riqualificato. Una volta ridotte le dispersioni per trasmissione, infatti, la componente legata alla ventilazione assume un peso maggiore nel bilancio energetico complessivo, rendendo più efficace l'integrazione di strategie orientate al recupero di calore e al preriscaldamento dell'aria.

Il miglioramento ottenuto non determina un salto di classe energetica. Questo aspetto non deve essere interpretato come un limite assoluto del sistema, ma come un'indicazione del suo specifico campo di azione. La facciata attiva incide infatti su una componente precisa del bilancio energetico, contribuendo alla riduzione del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento senza modificare necessariamente la classificazione energetica complessiva dell'edificio.

Nel complesso, il lavoro svolto mostra come i sistemi di facciata attiva possano rappresentare una strategia complementare per la riqualificazione energetica degli edifici esistenti. Il loro valore non risiede soltanto nella riduzione dei consumi, ma anche nella possibilità di attribuire alla facciata una funzione energetica aggiuntiva, trasformandola da semplice elemento di chiusura a componente dinamico del sistema edificio-impianto.

In conclusione, il sistema proposto non si pone come soluzione unica o sostitutiva degli interventi tradizionali, ma come parte di un approccio integrato alla riqualificazione energetica. Isolamento, ventilazione, recupero di calore, captazione solare e qualità architettonica possono concorrere alla definizione di un retrofit più evoluto, in cui l'involucro edilizio non è più soltanto una barriera passiva, ma un'interfaccia dinamica capace di contribuire alla prestazione energetica e alla trasformazione dell'immagine dell'edificio.

BIBLIOGRAFIA

NORMATIVE EUROPEE E NAZIONALI DI RIFERIMENTO

- Parlamento europeo e Consiglio dell'Unione europea. Direttiva (UE) 2024/1275 sulla prestazione energetica nell'edilizia. Fonte consultata: ACCA software, BibLus, pagina di approfondimento sulla Direttiva Case Green. <https://biblus.acca.it/direttiva-case-green/>
- Parlamento europeo e Consiglio dell'Unione europea. Direttiva (UE) 2023/1791 sull'efficienza energetica. Fonte consultata: EUR-Lex <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L1791>
- D.M. 26 giugno 2015, Decreto Requisiti Minimi. Fonte consultata: ACCA software, BibLus, pagina di approfondimento sul Decreto Requisiti Minimi. https://biblus.acca.it/download/decreto-requisiti-minimi-dm-26-giugno-2015/?utm_source=PDF-decreto-requisiti-minimi
- D.M. 28 ottobre 2025, aggiornamento dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici. Fonte consultata: ACCA software, BibLus, pagina di approfondimento sul D.M. 28/10/2025. https://biblus.acca.it/download/decreto-requisiti-minimi-dm-26-giugno-2015/?utm_source=PDF-decreto-requisiti-minimi
- Repubblica Italiana. D.Lgs. 9 gennaio 2026, n. 5, recepimento della Direttiva (UE) 2023/2413 sulla promozione dell'energia da fonti rinnovabili. Fonte consultata: ACCA software, BibLus, pagina di approfondimento sul recepimento della Direttiva RED III. <https://biblus.acca.it/notizie/cambiano-nel-2026-le-quote-obbligatorie-di-fonti-rinnovabili-negli-edifici-ecco-come/>
- Repubblica Italiana. D.L. 34/2020, art. 119, Superbonus 110%. Fonte consultata: ACCA software, BibLus, pagina di approfondimento sul Superbonus e sugli interventi trainanti e trainati. <https://biblus.acca.it/dl-34-2020-superbonus-pdf-aggiornato/>
- Repubblica Italiana. D.Lgs. 19 agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia. Fonte consultata: ACCA software, BibLus, pagina di approfondimento sulla prestazione energetica degli edifici. <https://biblus.acca.it/download/dlgs-192-2005/>
- Repubblica Italiana. D. Lgs. 30 maggio 2008, n. 115. Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici. Fonte consultata: ACCA software, BibLus. <https://biblus.acca.it/per-il-risparmio-energetico-e-possibile-derogare-alle-distanze-legali/>
- D.M. 23 giugno 2022. Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione e dei lavori per interventi edilizi. Fonte consultata: ACCA software, BibLus. <https://biblus.acca.it/download/decreto-23-giugno-2022-256-criteri-ambientali-minimi-2022-edilizia/>
- UNI/TS 11300. Prestazioni energetiche degli edifici. Fonte consultata: ACCA software, BibLus. <https://biblus.acca.it/uni-ts-11300-nuova-certificazione-energetica/>

FONTI SCIENTIFICHE E TECNICHE

- European Commission. New European Bauhaus Compass. A guiding framework for decision and project makers wishing to apply the NEB principles and criteria to their activities. Fonte consultata: New European Bauhaus. https://new-european-bauhaus.europa.eu/tools-and-resources/use-compass_en
- Callegari, G., Spinelli, A., Bianco, L., Serra, V., & Fantucci, S. (2015). NATURALWALL® — A solar timber façade system for building refurbishment: optimization process through in-field measurements. *Energy Procedia*, 78, 291–296. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215023735>
- Longo, V., Isaia, F., Fantucci, S., Bianco, L., & Serra, V. (2018). Experimental analysis on a solar air heating façade system. *Proceedings of the 7th International Building Physics Conference, IBPC 2018, Syracuse, NY, USA*. https://www.researchgate.net/publication/329391445_Experimental_analysis_on_a_solar_air_heating_facade_system
- Longo, V. (2017). Ottimizzazione energetica di un componente di facciata caratterizzato da un comportamento dinamico [Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino]. <https://webthesis.biblio.polito.it/6324/?template=default>
- Isaia, F., Fantucci, S., Serra, V., & Longo, V. (2019). The effect of airflow rate control on the performance of a fan-assisted solar air heating façade. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 609, 032008.
- Isaia, F., Fantucci, S., Serra, V., & Longo, V. (2019). The effect of airflow rate control on the performance of a fan-assisted solar air heating façade. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 609, 032008. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/609/3/032008>
- Fantucci, S., Serra, V., & Carbonaro, C. (2020). An experimental sensitivity analysis on the summer thermal performance of an Opaque Ventilated Façade. *Energy and Buildings*, 225, 110354. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819328750>
- Karanafti, A., Badino, E., Serra, V., & Fantucci, S. (2025). Experimental study on the effect of the ventilation and operation mode on the thermal efficiency of a full-scale Trombe wall under real operating conditions. *Solar Energy*, 302, 114039. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X25008023>
- Tareemi, A. A. (2026). Advances in Trombe wall performance challenges, photovoltaic shading schemes, phase change material, and composite enhancements. *Solar Energy*, 306, 114277. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X25010400>
- Zhang, L., Hou, Y., Liu, Z., Du, J., Xu, L., Zhang, G., & Shi, L. (2020). Trombe wall for a residential building in Sichuan-Tibet alpine valley — A case study. *Renewable Energy*, 156, 31–46. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120305991>

- Rodríguez-Gómez, Y. C., Serrano-Arellano, J., Demesa-López, F. N., Belman-Flores, J. M., & Ituna-Yudonago, J. F. (2025). Thermal Performance Assessment of a Trombe Wall in Social Housing through Numerical Simulation: A Case Study in Mexico. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 23(6), 2073–2107. <https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S2151862925000829>
- Bevilacqua, P., Bruno, R., Szyszka, J., Cirone, D., & Rollo, A. (2022). Summer and winter performance of an innovative concept of Trombe wall for residential buildings. *Energy*, 258, 124798. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222017017>