



Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed
Urbanistica

Corso di Laurea Magistrale in: Ingegneria Edile

Analisi dinamica calibrata su dati reali secondo UNI EN ISO 52016 e analisi
LCA di tre sistemi di involucro ad alte prestazioni termiche: confronto tra
termolaterizio, parete leggera in lana di roccia e in paglia

Dynamic analysis calibrated using real-world data in accordance with UNI
EN ISO 52016 and LCA analysis of three high-thermal-performance building
envelope systems: a comparison of thermal brick, lightweight rock wool
walls, and lightweight straw walls

Studente:

Jamee Hasnat

Relatrice:

Prof./Dott. Francesca Stazi

Correlatrice:

Dott. Serena Summa

Anno Accademico 2025-2026

Sommario

1. Introduzione	1
2. Materiali e metodi	5
2.1 Metodo sperimentale	5
2.1.1 Inquadramento climatico e condizioni al contorno	5
2.1.2 Caratterizzazione costruttiva e termografica dei moduli (Box 1 e Box 2)	6
2.1.3 Apparato strumentale e protocollo di acquisizione	7
2.2 Metodo numerico (EN ISO 52016)	8
Modellazione in regime dinamico orario	8
2.3 Simulazioni	10
2.3.1 Pareti	10
2.3.2 Configurazione delle simulazioni dinamiche orarie	13
2.3.3 Profilo di occupazione	16
2.4 Descrittori statistici	17
2.4.1 Introduzione al problema della calibrazione nei modelli	17
2.4.2 La Linea Guida ASHRAE 14: Il quadro normativo di riferimento	18
2.4.3 Gli indici statistici di validazione: NMBE e CVRMSE	19
3. Risultati	23
3.1 Calibrazione del modello	23
3.1.1 Continuo	23
3.1.2 Intermittente	27
3.2 Stay Home (SH)	28
3.2.1 Simulazione scenario 1:	28
3.2.2 Simulazione scenario 2:	30
3.2.3 Simulazione scenario 3:	32

3.2.4 Simulazione scenario 4:.....	33
3.2.5 Simulazione scenario 5:.....	35
3.3 Day Work (DW)	36
3.3.1 Simulazione scenario 1:.....	36
3.3.2 Simulazione scenario 2:.....	39
3.3.3 Simulazione scenario 3:.....	41
3.3.4 Simulazione scenario 4:.....	43
3.3.5 Simulazione scenario 5:.....	45
3.4 Analisi di sostenibilità	48
4. Discussioni.....	53
4.1 Influenza delle proprietà termo-fisiche sul comportamento dinamico dell'involucro	53
4.2 Confronto energetico delle tre soluzioni costruttive	54
4.3 Comfort termico e distribuzione delle temperature operative	58
4.3.1 Profilo Stay Home	58
4.3.2 Profilo Day Work.....	60
4.3.3 Ruolo della ventilazione notturna.....	63
4.4 Valutazione ambientale e confronto con la letteratura	64
4.5 Confronto con la letteratura scientifica	67
4.6 Implicazioni progettuali	69
5. Conclusioni	72
Riferimenti bibliografici	76

1. Introduzione

Il settore edilizio svolge un ruolo strategico nel raggiungimento degli obiettivi globali di sostenibilità energetica e decarbonizzazione, essendo responsabile di circa il 40% dei consumi finali di energia e del 36% delle emissioni di CO₂ associate all'uso dell'energia in Europa [1], [2]. Per questo motivo, negli ultimi decenni le politiche comunitarie hanno promosso una progressiva riduzione dei fabbisogni energetici degli edifici attraverso il miglioramento delle prestazioni dell'involucro edilizio e degli impianti tecnologici, culminando nell'introduzione del concetto di Nearly Zero Energy Building (nZEB) e, più recentemente, degli Zero Emission Buildings previsti dalla rifusione della Direttiva EPBD [1].

Tradizionalmente, la progettazione energetica dell'involucro si è concentrata principalmente sulla riduzione delle dispersioni termiche mediante l'adozione di componenti caratterizzati da bassi valori di trasmittanza termica. Tale approccio ha favorito la diffusione di sistemi costruttivi altamente isolati, spesso costituiti da materiali a bassa densità e limitata capacità termica. Tuttavia, numerosi studi hanno evidenziato come componenti edilizi caratterizzati dalla stessa trasmittanza termica possano presentare comportamenti energetici significativamente differenti a causa delle diverse proprietà dinamiche dei materiali che li compongono [4], [5].

In particolare, nei climi mediterranei il comportamento termico estivo dell'involucro assume un'importanza crescente a causa dell'incremento delle temperature esterne e della maggiore frequenza di eventi climatici estremi. In tali condizioni, la sola riduzione della trasmittanza termica non garantisce necessariamente le migliori prestazioni energetiche, poiché il controllo dei carichi termici dipende anche dalla capacità delle strutture di accumulare e rilasciare energia nel tempo [4], [6]. L'impiego di componenti caratterizzati da elevata inerzia termica consente infatti di attenuare e ritardare la propagazione dell'onda termica attraverso l'involucro, riducendo le oscillazioni della temperatura interna e migliorando le condizioni di comfort degli occupanti [4], [5].

L'importanza della massa termica è oggi ampiamente riconosciuta dalla comunità scientifica. Numerose ricerche hanno dimostrato che l'adozione di strutture massive può contribuire alla riduzione dei consumi energetici estivi, al contenimento dei picchi di temperatura interna e

al miglioramento della stabilità termo-igrometrica degli ambienti confinati [4], [6], [7]. In particolare, Stazi [5] evidenzia come, a parità di trasmittanza termica, le pareti caratterizzate da elevata capacità termica possano garantire significativi benefici in termini di comfort e riduzione dei fabbisogni energetici. Analogamente, studi sperimentali condotti in clima mediterraneo hanno confermato che la presenza di massa termica può contribuire in maniera significativa alla mitigazione del surriscaldamento estivo e alla riduzione della domanda di raffrescamento [6].

Tuttavia, la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici non può prescindere dalle modalità di utilizzo degli stessi. Numerosi studi hanno infatti evidenziato come il comportamento degli occupanti rappresenti una delle principali fonti di variabilità nei consumi energetici reali degli edifici [9]. Le modalità di occupazione, gli orari di permanenza, l'utilizzo degli impianti e le strategie di ventilazione possono modificare significativamente le prestazioni energetiche e il comfort indoor, rendendo necessario l'impiego di modelli dinamici capaci di rappresentare realisticamente tali condizioni operative [9], [11].

Parallelamente all'attenzione verso i consumi energetici operativi, negli ultimi anni è cresciuto l'interesse nei confronti degli impatti ambientali associati ai materiali da costruzione. L'elevata efficienza energetica raggiunta dagli edifici di nuova generazione ha infatti determinato una progressiva riduzione dell'incidenza dei consumi operativi sul bilancio ambientale complessivo, aumentando il peso relativo degli impatti incorporati nei materiali e nei processi costruttivi [8], [13]. Di conseguenza, la scelta delle tecnologie edilizie richiede oggi una valutazione integrata che consideri non solo le prestazioni energetiche durante la fase d'uso, ma anche gli impatti ambientali associati all'intero ciclo di vita dell'edificio.

In questo contesto, i materiali bio-based stanno assumendo un ruolo sempre più rilevante grazie alla loro capacità di ridurre l'energia incorporata e le emissioni di gas serra associate alla produzione dei componenti edilizi [12], [13]. Tra questi, la paglia rappresenta una delle soluzioni più promettenti grazie alla sua ampia disponibilità come sottoprodotto agricolo, alla ridotta energia richiesta per la sua lavorazione e alla capacità di immagazzinare carbonio atmosferico durante il ciclo di crescita della biomassa [14], [15]. Le recenti ricerche condotte sulle costruzioni in paglia hanno evidenziato prestazioni termo-isolanti comparabili a quelle

delle tecnologie convenzionali, unite a significativi vantaggi dal punto di vista ambientale [14], [18].

Le analisi di Life Cycle Assessment (LCA) hanno infatti dimostrato come l'impiego della paglia possa ridurre in modo significativo il Global Warming Potential degli edifici rispetto alle soluzioni tradizionali, grazie sia al basso contenuto energetico del materiale sia al fenomeno del carbon storage associato alla biomassa vegetale [17], [18]. Tuttavia, nonostante il crescente interesse verso le costruzioni bio-based, risultano ancora limitati gli studi che confrontano direttamente pareti in paglia, pareti leggere convenzionali e murature massive mantenendo costante la trasmittanza termica dell'involucro.

Dall'analisi della letteratura emerge pertanto una lacuna scientifica. Sebbene numerosi lavori abbiano approfondito singolarmente le prestazioni delle pareti massive, delle soluzioni leggere altamente isolate e delle tecnologie bio-based, risultano ancora limitate le ricerche che analizzano simultaneamente l'influenza dell'inerzia termica, dei profili di occupazione e della sostenibilità ambientale confrontando componenti caratterizzati dalla medesima prestazione termica stazionaria. Inoltre, la maggior parte degli studi disponibili si concentra esclusivamente sui consumi energetici, trascurando una valutazione integrata che includa comfort termo-igrometrico e impatti ambientali lungo il ciclo di vita.

Alla luce di tali considerazioni, il presente lavoro si propone di confrontare tre differenti tecnologie di involucro edilizio caratterizzate dal medesimo valore di trasmittanza termica: una parete massiva in termolaterizio, una parete leggera isolata con lana di roccia e una parete a struttura lignea isolata con balle di paglia. L'analisi viene sviluppata mediante simulazioni energetiche dinamiche basate sulla UNI EN ISO 52016-1 [19] e calibrate attraverso dati sperimentali secondo i criteri definiti dalla ASHRAE Guideline 14 [20]. Le prestazioni delle tre soluzioni vengono valutate considerando differenti profili di occupazione residenziale, con particolare riferimento ai consumi energetici annuali, alle condizioni di comfort termo-igrometrico e agli impatti ambientali determinati mediante metodologia Life Cycle Assessment secondo le norme ISO 14040 e ISO 14044 [21], [22].

L'obiettivo finale della ricerca è verificare se pareti caratterizzate dalla stessa trasmittanza termica possano presentare differenti comportamenti energetici, differenti livelli di comfort e differenti impatti ambientali, contribuendo alla definizione di criteri progettuali che

superino il tradizionale approccio basato esclusivamente sulla trasmittanza termica e integrino aspetti energetici, ambientali e di benessere degli occupanti.

2. Materiali e metodi

2.1 Metodo sperimentale

2.1.1 Inquadramento climatico e condizioni al contorno

La campagna sperimentale è stata condotta attraverso il monitoraggio in situ di due moduli di test a scala reale (denominati Box 1 e Box 2) Figura 1, collocati nel polo universitario della città di Ancona. La localizzazione geografica (latitudine: 43.537; longitudine: 13.516) colloca il sito, secondo la classificazione di Köppen-Geiger, in un'area a clima subtropicale umido (Cfa), caratterizzata da estati calde con elevata radiazione solare e inverni moderatamente freddi. Ai sensi del DPR 412/93, il sito ricade in zona climatica D (1688 Gradi Giorno).

Per garantire la massima pulizia del dato sperimentale, i due moduli sono stati realizzati come "scatole cieche", ovvero totalmente privi di componenti finestrati. Questa scelta metodologica è cruciale: l'assenza di superfici trasparenti elimina l'incertezza legata agli apporti solari diretti trasmessi all'interno degli ambienti e alle complesse dinamiche di assorbimento da parte delle superfici interne. In questo modo, l'unico forzante termico è rappresentato dallo scambio termico per trasmissione attraverso l'involucro opaco, guidato dal differenziale di temperatura interno-esterno e dalla radiazione solare incidente sulle sole superfici esterne. Inoltre, l'area circostante è stata mantenuta libera da ostruzioni e vegetazione per garantire un'esposizione uniforme alla volta celeste e ai venti dominanti per entrambi i moduli.



Figura 1 I box presi in considerazione sono quelli cerchiati, mentre la lettera C indica la posizione della stazione di monitoraggio delle condizioni climatiche

2.1.2 Caratterizzazione costruttiva e termografica dei moduli (Box 1 e Box 2)

I moduli sperimentali possiedono una geometria scatolare semplice, con una superficie in pianta netta di 9 m^2 e un volume interno di circa 31 m^3 . Le strutture di base (copertura, basamento e le pareti orientate a nord, est e ovest) sono identiche per entrambi i Box, realizzate con sistemi ad alta coibentazione (pannelli sandwich in alluminio e poliuretano per l'elevazione, platea isolata in EPS per l'attacco a terra) per confinare e standardizzare le dispersioni termiche non oggetto di indagine.

Il focus della ricerca risiede esclusivamente nelle pareti esposte a sud, le quali sono state differenziate per confrontare due paradigmi costruttivi antitetici:

- **Box 1 (Modulo Super-isolato a bassa inerzia):** La parete sud è declinata secondo i principi della costruzione a secco (lightweight construction). La stratigrafia, procedendo dall'esterno all'interno, comprende: una lastra di rivestimento in fibrocemento, un'intercapedine d'aria, un pannello strutturale in OSB, uno spesso

strato coibente in lana di roccia e una doppia lastra in cartongesso per la finitura interna. Questa parete è progettata per minimizzare la trasmittanza termica stazionaria (U), ma presenta una massa superficiale (M_s) estremamente ridotta. Fisicamente, ciò si traduce in una scarsa capacità di accumulo termico: l'onda termica generata dalla radiazione solare estiva attraversa rapidamente la struttura, causando picchi di temperatura interna quasi sincroni rispetto alle forzanti esterne.

- **Box 2 (Modulo Massivo ad alta inerzia):** La parete sud del secondo modulo è realizzata con blocchi in laterizio poroso di ultima generazione. La peculiarità di questo materiale risiede nel suo processo produttivo: l'aggiunta di additivi organici (come farine di legno o polimeri) all'argilla cruda fa sì che, durante la cottura in fornace, questi sublimino lasciando un fitto reticolo di microporosità. Il risultato è un blocco "a isolamento diffuso" che abbina un'elevata densità (garantendo massa) a una bassissima conducibilità termica (λ). A parità di trasmittanza termica stazionaria con il Box 1, questa parete massiva è in grado di immagazzinare grandi quantità di calore sensibile.

La massa superficiale dell'involucro, parametro chiave per valutare l'inerzia termica, è definita come:

$$M_s = \sum_{i=1}^n \rho_i t_i$$

dove ρ_i è la densità dell' i -esimo strato (kg/m^3) e t_i è il suo spessore (m). La differenza di massa tra i due Box si riflette direttamente su due parametri dinamici fondamentali: lo *sfasamento* (il ritardo temporale con cui il picco di calore esterno raggiunge l'interno) e l'*attenuazione* (la riduzione dell'ampiezza di tale picco).

2.1.3 Apparato strumentale e protocollo di acquisizione

L'architettura di misurazione si articola in due macrosistemi:

1. Rilievo microclimatico indoor

Ogni Box è stato equipaggiato con una rete di sensori cablata a un datalogger multicanale (DataTaker DT 500), con un *time step* di acquisizione impostato a 1 minuto per catturare con alta risoluzione i transitori termici.

- **Temperature dell'aria e superficiali:** Sono state impiegate termoresistenze al platino PT100 (in Classe A, cablaggio a 4 fili per compensare la resistenza dei cavi). I sensori per l'aria sono stati sospesi al centro geometrico del volume, schermati da cilindri riflettenti per evitare l'influenza della radiazione infrarossa emessa dalle pareti. I sensori superficiali sono stati applicati tramite paste termoconduttive sulle facce interne della parete sud.
- **Flussi termici:** Sulla faccia interna della parete sud di ciascun modulo sono stati installati flussimetri a termopila (piastre termoflussimetriche). Per garantire una lettura rappresentativa, i sensori sono stati posizionati evitando i ponti termici (es. giunti di malta nel Box 2 o montanti metallici nel Box 1).

2. Rilievo meteorologico outdoor

Per definire accuratamente le condizioni al contorno (forzanti), è stata predisposta una stazione meteorologica locale posizionata in quota, per evitare disturbi generati da ombreggiamenti o riflessioni del suolo (albedo locale). La stazione registra temperatura a bulbo secco, umidità relativa, velocità e direzione del vento. Particolare attenzione è stata dedicata alla misurazione della radiazione solare (forzante dominante nel regime estivo) mediante piranometri termoelettrici conformi allo standard ISO 9060:2018, configurati per acquisire separatamente la radiazione globale orizzontale e la componente diffusa.

2.2 Metodo numerico (EN ISO 52016)

Modellazione in regime dinamico orario

La simulazione numerica del comportamento transitorio dei moduli di test è stata eseguita avvalendosi del software ICARO, un ambiente di calcolo avanzato basato sulla norma tecnica internazionale EN ISO 52016-1:2017. L'approccio numerico dinamico è indispensabile poiché il metodo stazionario (basato sui gradi giorno o sulle medie mensili)

non è matematicamente in grado di risolvere i fenomeni di accumulo e rilascio termico che caratterizzano i materiali massivi come il laterizio poroso.

A differenza dei modelli a parametri concentrati più semplificati, il metodo implementato in ICARO sfrutta l'Annesso Nazionale Italiano della normativa, che introduce una formulazione fisico-matematica molto più rigorosa per la scomposizione della stratigrafia in una rete Resistenze-Capacità (RC). Nel metodo standard europeo, ogni parete viene sempre discretizzata con un massimo di cinque nodi capacitivi. Questo approccio risulta tuttavia approssimativo quando si confrontano materiali sottili e leggeri (come le lastre in fibrocemento del Box 1) con materiali spessi e massivi (come i blocchi del Box 2).

L'Annesso Italiano ovvia a questo limite calcolando un numero variabile di nodi capacitivi per ogni specifico strato materiale j -esimo (Ncn_j), determinando il livello di mesh termica in funzione della diffusività del materiale attraverso il numero di Fourier:

$$Ncn_j = \max \left[1; \text{Int} \left(\sqrt{\frac{Fo_{ref}}{Fo_j}} + 0.99999 \right) \right]$$

Il numero di Fourier di riferimento della parete è calcolato come:

$$Fo_{ref} = \frac{\lambda_j}{\rho_j \cdot c_j} \cdot \frac{\Delta t}{d_j^2}$$

In queste espressioni, λ_j rappresenta la conducibilità termica del materiale, ρ_j la densità, c_j la capacità termica massica, d_j lo spessore geometrico dello strato e Δt rappresenta il passo temporale di integrazione del solutore (impostato a 1 h). Fisicamente, questo significa che il software suddividerà il blocco in laterizio del Box 2 in un numero di "fette" (nodi) molto superiore rispetto ai pannelli del Box 1. Questa fitta discretizzazione spaziale permette alle equazioni differenziali del software di simulare con estrema precisione il lento avanzamento dell'onda termica all'interno della muratura massiva, catturando accuratamente lo sfasamento e il comportamento inerziale che sfuggirebbe a una modellazione standard.

2.3 Simulazioni

2.3.1 Pareti

Di seguito sono riportate le tabelle per la caratterizzazione della stratigrafia, dei materiali e dei valori termici delle pareti simulate. Nello specifico:

- Per la parete massiva fare riferimento alle Figura 2, Tabella 1, Tabella 2
- Per la parete leggera fare riferimento alle Figura 3, Tabella 3, Tabella 4
- Per la parete in paglia fare riferimento alle Figura 4, Tabella 5, Tabella 6

N strati	Descrizione	s [m]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	Ms [kg/m ²]	R [m ² K/W]	Sd [m]	α [m ² /s]
Superficie esterna								0,040		
1	Malta di calce o di calce e cemento	0,020	1800	0,900	1000	16	36,0	0,022	0,320	0,500
2	Pth BIO PLAN 45-25/19,9 T - 0,09 (Wienerberger)	0,450	830	0,090	1000	10	373,5	5,000	4,500	0,108
3	Malta di calce o di calce e cemento	0,020	1800	0,900	1000	16	36,0	0,022	0,320	0,500
Superficie interna								0,130		

Tabella 1 Stratigrafia e caratteristiche dei materiali della parete massiva

Prestazioni Statici	Valori
Spessore s [m]	0,490
Massa superficiale m _s [kg/m ²]	445,5
Resistenza R [m ² K/W]	5,21
Trasmittanza U [W/m ² K]	0,192
Capacità termica totale κ [kJ/m ² K]	445,5

Prestazioni Dinamiche	Valori
Trasmittanza periodica Y _{ie} [W/m ² K]	0,001
Fattore di attenuazione f _a [-]	0,004
Sfasamento ϕ [-]	31h 5'
Capacità termica periodica interna κ_i [kJ/m ² K]	45,43
Capacità termica periodica esterna κ_e [kJ/m ² K]	56,15
Ammetenza interna Y _{ii} [W/m ² K]	3,303
Ammetenza esterna Y _{ee} [W/m ² K]	4,083

Tabella 2 Caratteristiche statiche e dinamiche della parete massiva

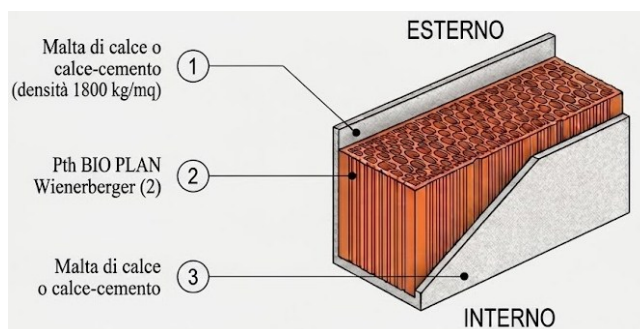


Figura 2 Stratigrafia della parete massiva

N strati	Descrizione	s [m]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	M _s [kg/m ²]	R [m ² K/W]	Sd [m]	α [m ² /s]
Superficie esterna								0,040		
1	Fibro cemento	0,016	1600	0,420	1000	49	25,6	0,038	0,784	0,263
2	Pannello OBS	0,020	650	0,130	1699	30	13,0	0,154	0,600	0,118
3	Pannelli rigidi in fibre minerali di rocce feldspatiche	0,176	100	0,037	1029	1	17,6	4,757	0,176	0,359
4	Cartongesso (densità 900 kg/mq)	0,013	900	0,250	1000	4	11,7	0,052	0,052	0,278
5	Cartongesso (densità 900 kg/mq)	0,013	900	0,250	1000	4	11,7	0,052	0,052	0,278
Superficie interna								0,130		

Tabella 3 Stratigrafia e caratteristiche dei materiali della parete leggera

Prestazioni Statici	Valori
Spessore s [m]	0,238
Massa superficiale m _s [kg/m ²]	79,6
Resistenza R [m ² K/W]	5,22
Trasmittanza U [W/m ² K]	0,191
Capacità termica totale κ [kJ/m ² K]	89,2

Prestazioni Dinamiche	Valori
Trasmittanza periodica Y _{ie} [W/m ² K]	0,135
Fattore di attenuazione f _a [-]	0,704
Sfasamento φ [-]	6h 39'
Capacità termica periodica interna κ _i [kJ/m ² K]	27,25
Capacità termica periodica esterna κ _e [kJ/m ² K]	49,88
Ammetenza interna Y _{ii} [W/m ² K]	1,853
Ammetenza esterna Y _{ee} [W/m ² K]	3,495

Tabella 4 Caratteristiche statiche e dinamiche della parete leggera

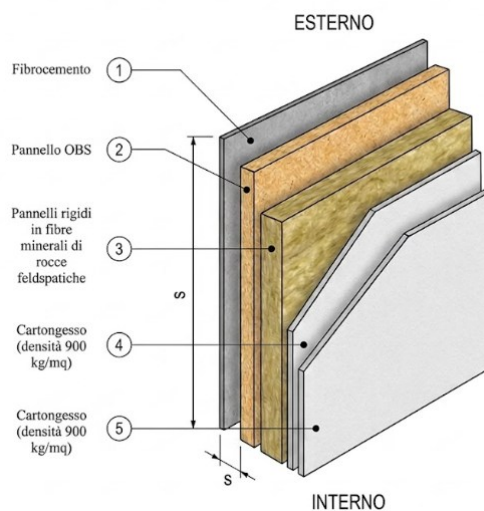


Figura 3 Stratigrafia della parete leggera

N strati	Descrizione	s [m]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	M _s [kg/m ²]	R [m ² K/ W]	Sd [m]	α [m ² /s]
Superficie esterna								0,040		
1	CLIMATHERM (ext-calce)	0,020	400	0,057	1000	6	8,0	0,351	0,120	0,143
2	EAP_THERMUS (paglia)	0,255	100	0,055	900	1	25,5	4,636	0,255	0,611
3	KARTONSAN	0,022	1450	0,355	1100	10	31,9	0,062	0,220	0,223
Superficie interna								0,130		

Tabella 5 Stratigrafia e caratteristiche dei materiali della parete in paglia

Prestazioni Statici	Valori
Spessore s [m]	0,297
Massa superficiale m _s [kg/m ²]	65,4
Resistenza R [m ² K/W]	5,22
Trasmittanza U [W/m ² K]	0,192
Capacità termica totale κ [kJ/m ² K]	66,0

Prestazioni Dinamiche	Valori
Trasmittanza periodica Y _{ie} [W/m ² K]	0,119
Fattore di attenuazione f _a [-]	0,621
Sfasamento φ [-]	7h 6'
Capacità termica periodica interna κ _i [kJ/m ² K]	37,04
Capacità termica periodica esterna κ _e [kJ/m ² K]	14,35
Ammetenza interna Y _{ii} [W/m ² K]	2,579
Ammetenza esterna Y _{ee} [W/m ² K]	0,929

Tabella 6 Caratteristiche statiche e dinamiche della parete in paglia

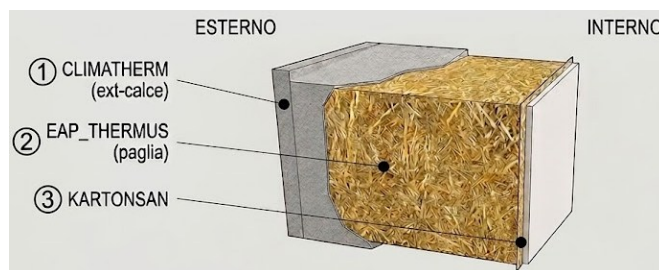


Figura 4 Stratigrafia della parete in paglia

2.3.2 Configurazione delle simulazioni dinamiche orarie

Al fine di valutare la risposta termo-fisica degli involucri edilizi in condizioni al contorno più articolate e realistiche rispetto alla sola configurazione di monitoraggio sperimentale, è stata condotta un'analisi parametrica accoppiata a simulazioni dinamiche orarie. Il modello matematico è stato implementato nel software di simulazione energetica dinamica oraria ICARO (versione 1.0.9) basato sull'algoritmo di calcolo standardizzato della norma EN ISO 52016-1:2017. Per l'analisi degli scambi termici attraverso le strutture opache, si è adottato l'approccio avanzato descritto nell'Appendice Nazionale Italiana (National Annex A). Tale variante metodologica, basata sul criterio del numero di Fourier (Fo), consente di discretizzare ciascuno strato della stratigrafia in reti resistive-capacitive (RC) multinodo flessibili. Rispetto al modello semplificato a 5 nodi proposto dalla versione standard europea, questa configurazione riduce l'errore sull'ampiezza del flusso termico interno in una percentuale compresa tra il 14% e il 67%, garantendo una calibrazione ottimale del modello numerico rispetto ai dati rilevati sul campo [38].

Una volta completata e validata la procedura di calibrazione energetica del software tramite gli indici statistici di riferimento (CVRMSE, NMBE), il modello numerico delle celle di prova è stato configurato per analizzare **cinque scenari di simulazione incrementali**. Ciascuno scenario è finalizzato a isolare e quantificare l'influenza di specifici fattori architettonici e gestionali, quali l'inerzia termica massiva, gli apporti solari diretti attraverso i componenti vetrati, la dispersione geometrica dell'ambiente e le strategie di ventilazione naturale accoppiate al *free-cooling* notturno.

I cinque scenari investigati (graficamente schematizzati nella Figura 5) sono definiti come segue:

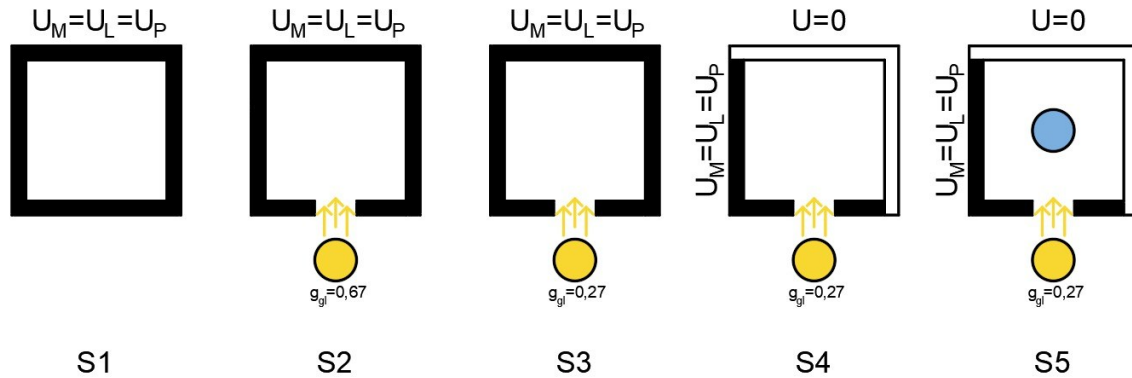


Figura 5 Schematizzazione grafica dei diversi scenari utilizzati per le simulazioni

- **Scenario 1: Involucro opaco puro**

Lo Scenario 1 prevede l'estensione delle varie tecnologie edilizie principali (massiva, leggera e paglia) a tutte e quattro le pareti verticali della cella di prova, mantenendo la totale assenza di superfici trasparenti (configurazione *windowless*). Questo scenario isola l'effetto dei parametri dinamici (sfasamento ϕ e fattore di attenuazione f_a) a parità di dispersione termica stazionaria. Il tasso di ricambio d'aria è stato assunto pari a 0,5 vol/h, rappresentativo della portata d'aria dovuta alle infiltrazioni attraverso l'involucro edilizio e le discontinuità dei serramenti. Tale valore descrive quindi il ricambio d'aria non controllato in assenza di apertura volontaria delle finestre o di ventilazione meccanica.

- **Scenario 2: Introduzione degli apporti solari (Superficie vetrata sul lato Sud)**

A partire dalle geometrie opache definite nello scenario precedente, lo Scenario 2 introduce una componente di guadagno termico solare diretto inserendo un'apertura vetrata sulla parete orientata a Sud. La finestra modellata presenta una superficie geometrica pari a $1,5 \text{ m}^2$, un fattore di telaio (frame factor) pari a 0,84, una trasmittanza termica complessiva dell'infisso $U_w = 1,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e un fattore di trasmissione solare totale del vetro (solar heat gain coefficient, SHGC) elevato, con $g_{gl} = 0,67$. L'obiettivo è analizzare come le varie strutture gestiscano i carichi termici impulsivi indotti dalla radiazione solare interna in assenza di schermature.

- **Scenario 3: Ottimizzazione del componente vetrato (Vetro a controllo solare)**

Lo Scenario 3 mantiene inalterate le caratteristiche geometriche e strutturali dello Scenario 2, introducendo però una variante tecnologica sul componente trasparente per ridurre l'impatto termico estivo. Il coefficiente di trasmissione solare globale del vetro viene ridotto drasticamente, passando da $g_{gl} = 0,67$ a $g_{gl} = 0,27$, simulando così l'adozione di una vetratura a controllo solare altamente performante. Questo step permette di quantificare l'efficacia combinata tra strategie di mitigazione attiva/passiva sui componenti trasparenti e l'inerzia interna dell'involucro opaco.

- **Scenario 4: Modifica della dispersione geometrica (Pareti confinate adiabatiche)**

Nello Scenario 4 si varia il grado di isolamento e di esposizione della cella rispetto all'ambiente esterno per replicare un contesto edilizio multipiano o a schiera più realistico rispetto alla cella isolata. Mantenendo la configurazione della finestra a controllo solare ($g_{gl} = 0,35$), le pareti orientate a Est e Nord, insieme al solaio di copertura e al basamento a terra, vengono impostate come superfici adiabatiche ($U = 0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). La dispersione e lo scambio termico della stanza avvengono esclusivamente attraverso i due soli prospetti d'angolo esposti all'esterno, ovvero le pareti Sud (dotata di finestra) e Ovest.

- **Scenario 5: Attivazione della ventilazione naturale dinamica (Free-cooling notturno)**

Quest' ultimo scenario introduce l'interazione tra l'utenza e l'involucro edilizio mediante l'attivazione di profili di ventilazione naturale controllata. Sulla base della geometria con pareti adiabatiche dello scenario 4, viene modificata la portata d'aria oraria per sfruttare le temperature esterne più favorevoli durante le ore notturne (dalle 18:00 alle 06:00). Nello scenario di free cooling notturno è stato assunto un tasso di ventilazione pari a 7 vol/h. Tale valore è stato selezionato in quanto rappresentativo delle condizioni comunemente adottate negli studi sulla night ventilation e collocato all'interno dell'intervallo di 5–10 vol/h frequentemente considerato nelle analisi di raffrescamento passivo mediante ventilazione naturale notturna [29]. Inoltre, il valore scelto risulta coerente con le evidenze sperimentali riportate da Larsen et al.

[30] per configurazioni di ventilazione monolaterale con finestre completamente aperte, che hanno evidenziato ricambi d'aria compresi tra circa 3 e 11 vol/h. Pertanto, l'adozione di un valore pari a 7 vol/h consente di rappresentare una condizione realistica e cautelativa di raffrescamento passivo notturno, compatibile sia con la letteratura scientifica sia con le potenzialità effettivamente ottenibili mediante ventilazione naturale. Durante le ore diurne (dalle 06:00 alle 18:00), la ventilazione viene ridotta ai valori minimi di igienicità (0,5 vol/h).

2.3.3 Profilo di occupazione

Al fine di valutare l'influenza delle modalità di utilizzo dell'edificio sulle prestazioni energetiche e sul comportamento termico dell'involucro, sono stati definiti due differenti profili di occupazione residenziale, rappresentativi di condizioni realistiche di utilizzo dell'abitazione. La scelta dei profili è stata effettuata sulla base delle indicazioni presenti in letteratura relative alla modellazione del comportamento degli occupanti negli edifici residenziali [23], [24], [25].

Il primo profilo, denominato Stay Home (SH), rappresenta un occupante presente all'interno dell'abitazione durante l'intero arco della giornata. Tale scenario è rappresentativo di categorie quali pensionati, lavoratori in smart working o utenti che trascorrono gran parte del tempo in ambiente domestico. In questo caso si è assunto un funzionamento continuo del sistema di riscaldamento durante la stagione invernale, mentre per la stagione estiva il sistema di raffrescamento è stato considerato attivo dalle ore 08:00 alle ore 23:00.

Il secondo profilo, denominato Day Work (DW), rappresenta invece un occupante che svolge attività lavorativa all'esterno dell'abitazione durante le ore diurne. In accordo con i profili di occupazione residenziale proposti nell'ambito dell'IEA EBC Annex 66 [24] e con i risultati ottenuti da [25], è stata assunta una presenza dell'utente nelle fasce orarie comprese tra le 18:00 e le 08:00 e un'assenza dalle ore 08:00 alle ore 18:00 nei giorni feriali. Conseguentemente, il sistema di riscaldamento è stato considerato attivo nelle fasce orarie 06:00–08:00 e 18:00–23:00 durante il periodo invernale, mentre il sistema di raffrescamento è stato attivato dalle ore 18:00 alle ore 23:00 durante il periodo estivo.

La definizione dei due profili è stata effettuata con l'obiettivo di rappresentare due condizioni limite di occupazione, caratterizzate rispettivamente da elevata e ridotta permanenza degli utenti all'interno dell'edificio. Tale approccio è comunemente adottato negli studi di simulazione energetica per valutare la sensibilità delle prestazioni dell'edificio rispetto al comportamento degli occupanti e alle modalità di utilizzo degli impianti [26], [27].

La Tabella n riporta sinteticamente i profili di occupazione e gli orari di funzionamento degli impianti considerati nelle simulazioni.

Profilo	Occupazione	Riscaldamento (inverno)	Raffrescamento (estate)
Stay Home (SH)	Presenza continua (24 h)	00:00–24:00	08:00–23:00
Day Work (DW)	Presenza 18:00–08:00	06:00–08:00; 18:00–23:00	18:00–23:00

Tabella n. Profilo di occupazione e di accensione degli impianti

I profili definiti sono coerenti con le metodologie di simulazione energetica previste dalla UNI EN ISO 52016-1 [28], che richiede la definizione delle condizioni di utilizzo dell'edificio e degli impianti come dati di input per il calcolo del fabbisogno energetico.

2.4 Descrittori statistici

2.4.1 Introduzione al problema della calibrazione nei modelli

Nell'ambito della ricerca sull'efficienza energetica e sul comportamento termo-fisico degli edifici, la simulazione numerica in regime dinamico rappresenta uno strumento fondamentale. Essa consente di prevedere le risposte termiche delle strutture, valutare il comfort termo-igrometrico indoor e stimare i consumi energetici associati agli impianti di climatizzazione al variare delle condizioni al contorno esterne. Tuttavia, un modello di simulazione, per quanto dettagliato, rimane una schematizzazione matematica della realtà. La transizione dal manufatto fisico reale, in questo caso specifico, i due box sperimentali

oggetto di studio, al modello digitale implementato nel codice di calcolo comporta inevitabilmente l'introduzione di discrepanze, note in letteratura come *performance gap*.

Il divario tra le prestazioni misurate sul campo (*valori sperimentali*) e quelle calcolate dal software (*valori simulati*) può derivare da molteplici fattori:

1. Incertezze intrinseche nelle proprietà termo-fisiche dei materiali (conducibilità termica, calore specifico e densità reali che deviano dai valori nominali di scheda tecnica).
2. Approssimazioni geometriche e modellazione dei ponti termici nodali.
3. Stima dei flussi di infiltrazione d'aria e dei tassi di ventilazione naturale o forzata.
4. Differenze tra le condizioni meteorologiche reali del sito (microclima) e il file climatico inserito nel software.
5. Dinamiche di accensione, spegnimento e modulazione della macchina di raffrescamento e dei relativi sistemi di controllo (set-point, isteresi).

Per annullare, o quantomeno ricondurre entro limiti statisticamente accettabili, tale scostamento si rende necessaria la procedura di calibrazione del modello. Calibrare un modello significa effettuare un processo iterativo di sintonizzazione dei parametri di input più incerti, affinché gli output del software (nel nostro caso, la temperatura dell'aria interna nei periodi di funzionamento passivo e i consumi energetici nei periodi di raffrescamento attivo) ricalchino con la massima fedeltà possibile le curve sperimentali registrate dai sensori in loco.

2.4.2 La Linea Guida ASHRAE 14: Il quadro normativo di riferimento

Per conferire un rigore scientifico e una validità oggettiva al processo di calibrazione, la comunità scientifica internazionale adotta i criteri definiti dalla ASHRAE Guideline 14 [20]. Sebbene la linea guida nasca originariamente per la rendicontazione dei risparmi energetici nei contratti di prestazione energetica (EPC), il suo approccio statistico è diventato lo standard *de facto* per la validazione di qualsiasi modello di Building Energy Simulation (BES).

La linea guida stabilisce che un modello può essere definito "calibrato" quando gli indici statistici di errore, calcolati confrontando i dati storici misurati e i dati simulati sul medesimo orizzonte temporale, si collocano al di sotto di specifiche soglie di tolleranza. La norma distingue l'analisi in base al passo temporale dei dati a disposizione:

- Frequenza mensile: utilizzata tipicamente quando si analizzano le bollette energetiche aggregate.
- Frequenza oraria (o sub-oraria): applicata nell'analisi di campagne sperimentali ad alta risoluzione, come quella condotta sui due box in esame.

Dato che la strumentazione installata nei box ha registrato i parametri termici ed energetici a intervalli continui e ad alta frequenza, la validazione della presente tesi si uniforma rigidamente ai limiti orari imposti dall'ASHRAE, i quali risultano notevolmente più stringenti e complessi da traguardare rispetto a quelli mensili.

2.4.3 Gli indici statistici di validazione: NMBE e CVRMSE

La valutazione matematica dello scostamento si basa sul calcolo accoppiato di due indici statistici complementari: il *Normalized Mean Bias Error* (NMBE) e il *Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error* (CVRMSE). L'utilizzo congiunto di questi due parametri è indispensabile, poiché ciascuno di essi fotografa un aspetto differente dell'errore di modellazione.

Il *Normalized Mean Bias Error* rappresenta la misura del bias complessivo del modello, ovvero definisce l'errore medio normalizzato. Esso quantifica la tendenza del modello a sovrastimare o sottostimare sistematicamente la variabile analizzata lungo l'intero periodo di calibrazione.

La formulazione matematica dell'NMBE è espressa dalla seguente equazione:

$$NMBE = \frac{1}{\bar{m}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n - p} \times 100(\%)$$

Dove:

- m_i è il valore sperimentale misurato all'iesimo intervallo temporale.

- s_i è il valore simulato dal programma Icaro nel medesimo intervallo temporale.
- n è il numero totale di punti di campionamento temporali considerati nell'analisi.
- p è il numero di parametri di input che sono stati modificati o regolati attivamente durante la calibrazione (per analisi standard, secondo l'approccio semplificato ASHRAE, spesso si assume $p = 1$ o $p = 0$ se si valuta l'errore puro del modello, ma formalmente rappresenta i gradi di libertà persi). Nel caso studio tale valore si è assunto 0.
- $\bar{m}$ è la media aritmetica dei valori sperimentali misurati nell'orizzonte temporale considerato

L'NMBE è un indice con segno. Un valore positivo indica che il modello tende globalmente a sottostimare la realtà (poiché i valori reali m_i sono mediamente superiori a quelli simulati s_i), mentre un valore negativo indica una sovrastima da parte del software. Il limite principale dell'NMBE risiede nei fenomeni di compensazione: errori di segno opposto (ad esempio una forte sovrastima di giorno compensata da una forte sottostima di notte) possono annullarsi a vicenda, restituendo un NMBE vicino allo zero che maschererebbe un modello in verità altamente impreciso nelle singole ore. Per questo motivo l'NMBE non può mai essere usato da solo.

Per misurare la dispersione degli errori e la capacità del modello di riprodurre l'esatto andamento ondulatorio e le fluttuazioni delle grandezze reali, si introduce il *Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error*. Il CVRMSE è la deviazione standard dell'errore normalizzata rispetto alla media dei valori misurati. Esso valuta la stabilità del modello ed è insensibile ai fenomeni di compensazione, poiché eleva i singoli scostamenti al quadrato.

La sua espressione matematica è la seguente:

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{m}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n - p}} \times 100 (\%)$$

Questo indice assume sempre valori positivi. Più il CVRMSE è prossimo allo zero, minore è la variabilità dell'errore, indicando che la curva dei dati simulati segue fedelmente la forma, i picchi e gli sfasamenti temporali della curva sperimentale.

Secondo la ASHRAE Guideline 14, un modello di simulazione dinamica applicato a un passo temporale orario può ritenersi ufficialmente validato e calibrato se soddisfa contemporaneamente i seguenti criteri di soglia:

Indice Statistico	Soglia Ammissibile (dati orari)
NMBE	$\leq \pm 10\%$
CVRMSE	$\leq 30\%$

Il raggiungimento della convergenza statistica secondo i criteri ASHRAE 14 non implica che il modello sia una copia perfetta e assoluta della realtà, bensì che gli errori residui siano distribuiti in modo causale e non inficino la bontà predittiva dello strumento. È opportuno, a conclusione del capitolo di calibrazione, mappare e giustificare le sorgenti di errore non eliminabili (*errori residui*):

1. Effetti tridimensionali e flussi d'aria interni: I codici di simulazione energetica come Icaro considerano l'aria interna ad ogni zona termica come un volume perfettamente miscelato a temperatura uniforme (modello a parametri concentrati). Nella realtà sperimentale dei box, si verificano inevitabilmente fenomeni di stratificazione termica verticale e sacche d'aria a velocità differenziata, che causano piccole discrepanze locali rispetto alla lettura del sensore fisico, posizionato a un'altezza specifica.
2. Incertezza della strumentazione: I sensori di temperatura (PT100 o termocoppie) e i misuratori di potenza elettrica possiedono una propria tolleranza strumentale intrinseca. Un allineamento del modello che scendesse al di sotto della soglia di errore strumentale sarebbe un fenomeno di *overfitting* privo di senso fisico.
3. Ritardi di campionamento e orologi di sistema: Piccoli sfasamenti temporali (nell'ordine di pochi minuti) tra i log del sistema di acquisizione dati dei box e il passo di calcolo del solutore di Icaro possono generare picchi isolati nell'errore orario, pur mantenendo intatta la validità globale della simulazione su scala giornaliera e settimanale.

Inquadramento normativo e soglie di accettabilità

Sotto il profilo del rigore metodologico, è necessario evidenziare una distinzione teorica tra i requisiti prescrittivi e le raccomandazioni della letteratura scientifica. La linea guida ASHRAE Guideline 14, per modelli valutati su base oraria o sub-oraria, impone vincoli normativi cogenti esclusivamente per gli indici NMBE e CVRMSE. L' R^2 non viene inserito come parametro formale di scarto obbligatorio all'interno della suddetta linea guida per i passi temporali ad alta frequenza, al fine di evitare ridondanze statistiche in presenza di forti oscillazioni orarie dovute al rumore di fondo strumentale.

3. Risultati

3.1 Calibrazione del modello

3.1.1 Continuo

Sono stati presi in considerazione i dati raccolti dal giorno 13 giugno 2025 al giorno 16 giugno 2025. L'impianto è rimasto sempre acceso nel periodo di monitoraggio.

Giorni	Ta,ext MAX	Ta,ext MIN	IgH MAX	IgH MIN
13	32.32	14.04	938.77	0.00
14	32.02	14.54	955.32	0.00
15	33.62	15.55	831.68	0.00
16	32.40	18.38	922.18	0.00

Tabella 7 Valori massimi e minimi della temperatura dell'aria esterna e della radiazione orizzontale dei giorni di calibrazione

Parete leggera:

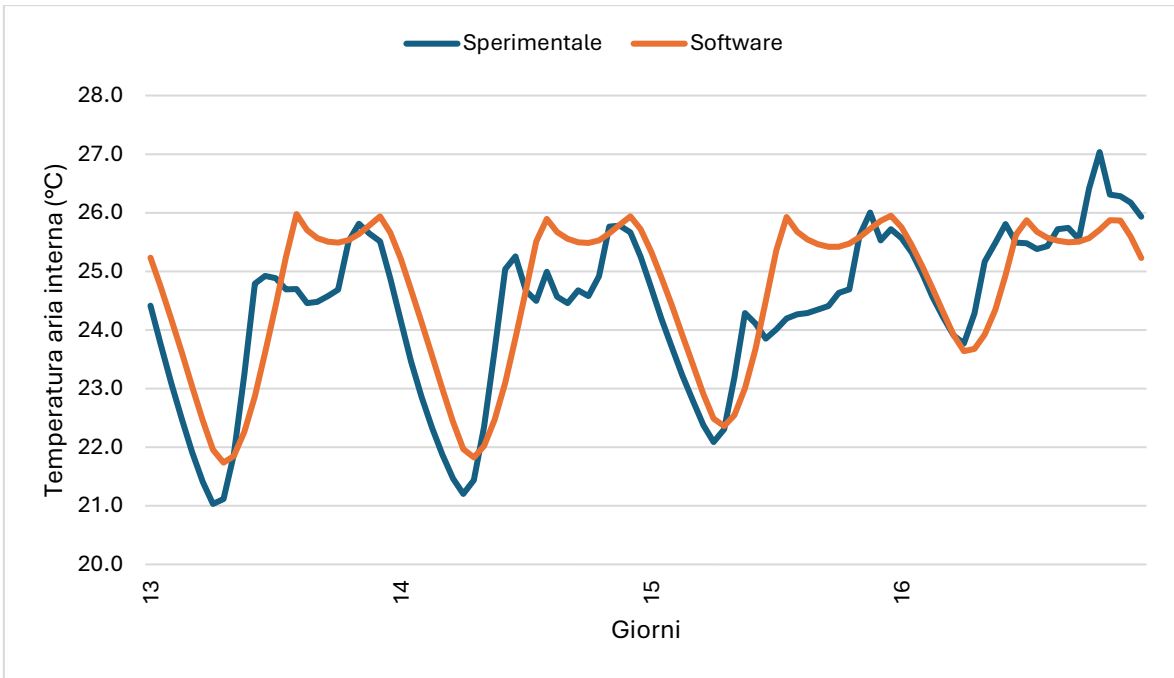


Figura 6 Confronto della temperatura dell'aria interna fra i valori sperimentali e quelli simulati per la parete leggera

CV(RMSE) < 30	
L	6.97%
NMBE ± 10	
L	2.63%

Tabella 8 Indici statistici per le temperature dell'aria interna della parete leggera

Dal grafico si osserva che:

- le due curve hanno un andamento molto simile;
- il modello riesce a seguire correttamente i picchi termici giornalieri;
- gli scostamenti tra simulazione e misura risultano contenuti;
- Il software tende a smorzare leggermente alcuni massimi di temperatura.

Gli indici statistici confermano una buona accuratezza del modello:

- $CVRMSE = 6,97\%$
- $NMBE = 2,63\%$

Entrambi rientrano nei limiti richiesti dalla ASHRAE Guideline 14 per dati orari ($CVRMSE \leq 30\%$, $NMBE \leq \pm 10\%$).

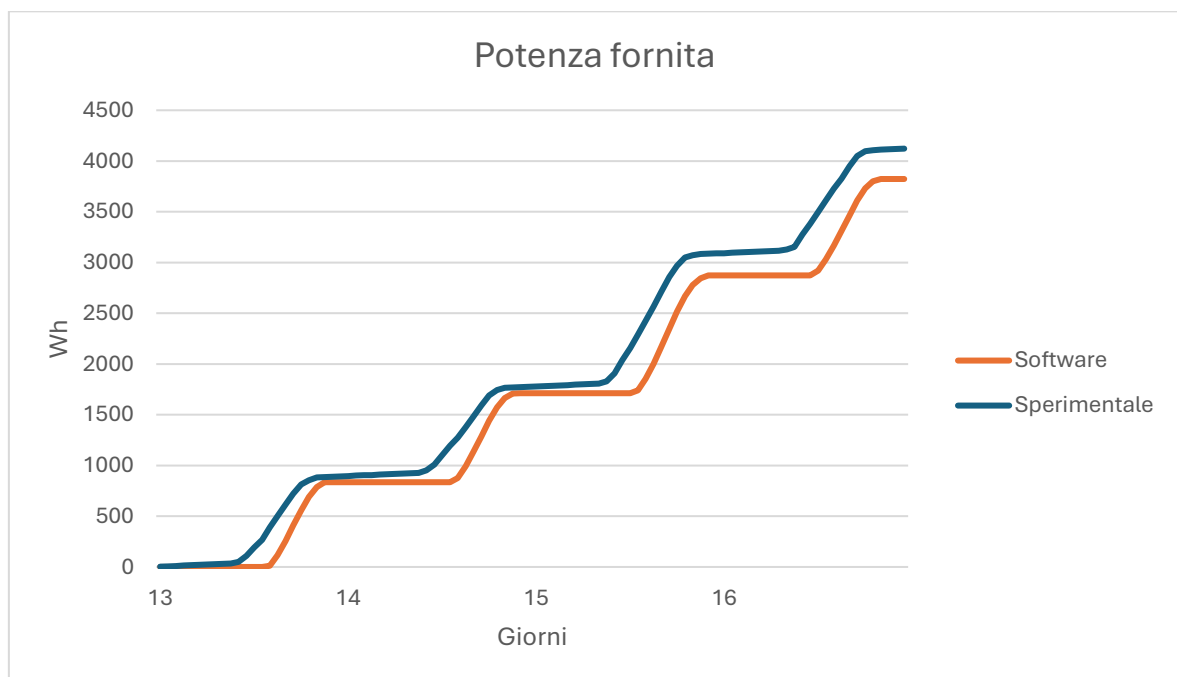


Figura 7 Confronto della potenza fornita cumulata fra i valori sperimentali e quelli simulati della parete leggera

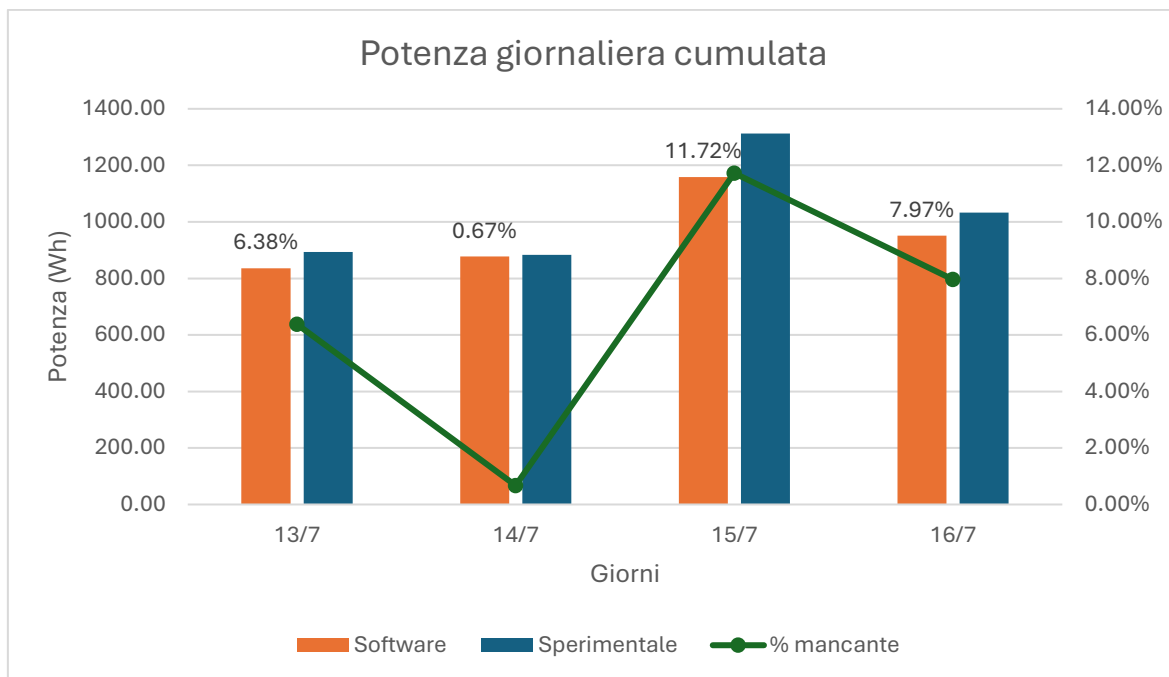


Figura 8 Confronto dei valori cumulati della potenza fornita giorno per giorno della parete leggera

CV(RMSE) < 30	
L	14.93%
NMBE ± 10	
L	12.23%

Tabella 9 Indici statistici dei consumi della parete leggera

Qui emerge che:

- il modello riproduce abbastanza bene l'andamento generale dei consumi;
- alcune giornate mostrano sottostime o sovrastime più marcate.

Il grafico della “potenza giornaliera cumulata” evidenzia inoltre la percentuale di scostamento tra energia simulata e reale. Le discrepanze più elevate possono essere legate:

- all'inerzia reale dell'impianto;
- ai ritardi di accensione/spegnimento.

Parete massiva:

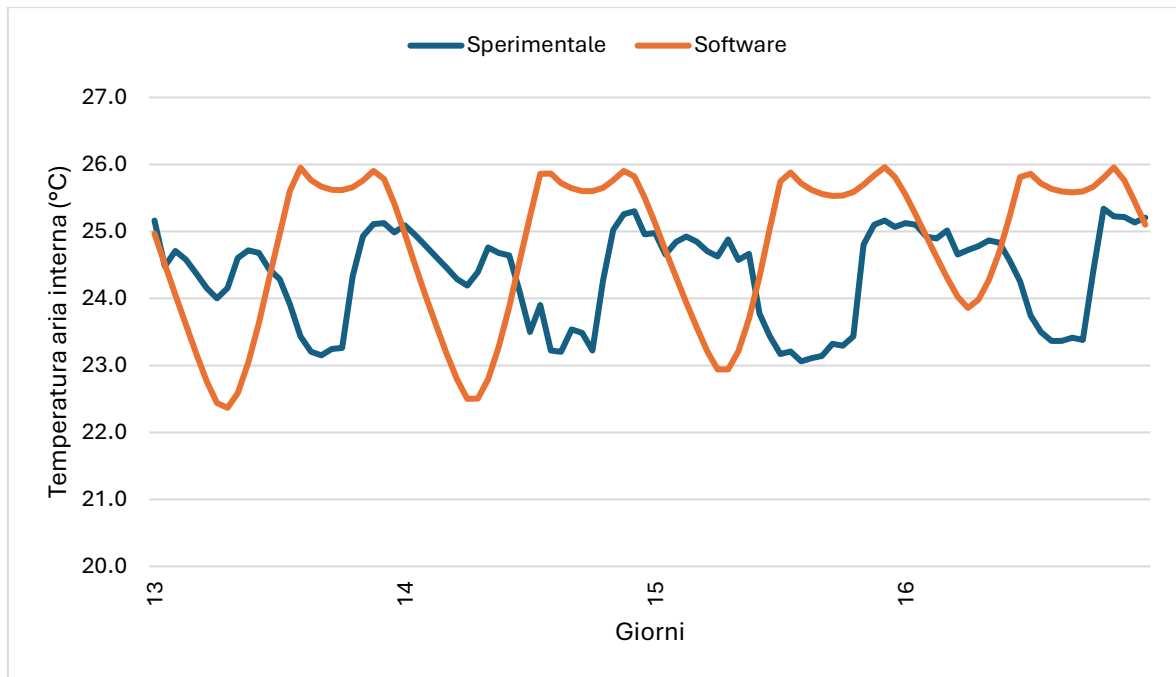


Figura 9 Confronto della temperatura dell'aria interna fra i valori sperimentali e quelli simulati per la parete massiva

CV(RMSE) < 30	
M	6.11%
NMBE ± 10	
M	0.07%

Tabella 10 Indici statistici della temperatura dell'aria interna della parete massiva

Dal punto di vista fisico, il comportamento della parete massiva appare più stabile:

- le oscillazioni termiche sono meno accentuate;
- la temperatura interna varia più lentamente;
- si osserva l'effetto dell'inerzia termica del laterizio.

Questo conferma quanto descritto nel capitolo teorico: la massa termica riesce ad attenuare e ritardare l'onda termica esterna.

Gli indici statistici mostrano:

- $CVRMSE = 6,11\% \rightarrow$ ottimo;
- $NMBE = 0,07\% \rightarrow$ errore medio quasi nullo.

3.1.2 Intermittente

Sono stati presi in considerazione i dati raccolti dal giorno 15 luglio 2025 al giorno 20 luglio 2025. L'impianto è stato messo in funzione dalle ore 5 alle ore 9, poi dalle ore 15 alle ore 23.

Giorni	Ta,ext MAX	Ta,ext MIN	IgH MAX	IgH MIN
15	30.88	16.83	938.60	0.00
16	32.36	13.83	941.73	0.00
17	28.81	15.49	937.08	0.00
18	30.16	13.10	964.48	0.00
19	32.67	16.10	920.62	0.00
20	31.85	19.70	918.55	0.00

Tabella 11 Valori massimi e minimi della temperatura dell'aria esterna e della radiazione orizzontale dei giorni di calibrazione

Parete leggera:

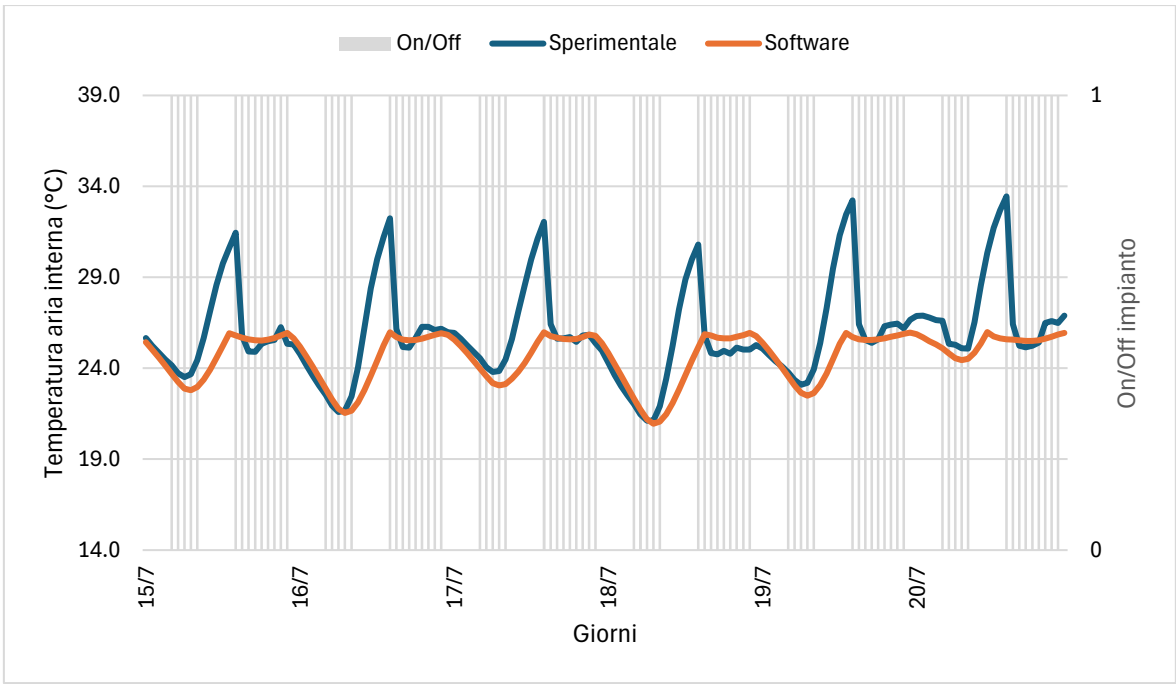


Figura 10 Confronto della temperatura dell'aria interna fra i valori sperimentali e quelli simulati della parete leggera nel caso intermittente

CV(RMSE) < 30	
L	9.64%
NMBE ± 10	
L	4.93%

Tabella 12 Indici statistici della temperatura dell'aria interna nel caso intermittente della parete leggera

In questo scenario:

- la temperatura interna mostra oscillazioni più marcate;
- i cicli ON/OFF dell'impianto generano variazioni rapide;
- il modello segue abbastanza bene la tendenza generale, ma con errori maggiori nei transitori.

Gli indici statistici risultano comunque accettabili:

- $CVRMSE = 9,64\%$;
- $NMBE = 4,93\%$.

Entrambi rispettano ancora i limiti ASHRAE.

Il peggioramento rispetto al funzionamento continuo è normale, perché i sistemi intermittenti sono più difficili da modellare; i transitori termici rapidi amplificano gli errori; entrano in gioco fenomeni dinamici complessi (inerzia impianto, controllo termostatico, ritardi).

3.2 Stay Home (SH)

3.2.1 Simulazione scenario 1:

Dai risultati, Tabella 13, emerge che la parete massiva presenta il fabbisogno energetico totale più contenuto (645 kWh), seguita dalla parete in paglia (669 kWh) e dalla parete leggera (701 kWh). La differenza è dovuta principalmente alla maggiore capacità di accumulo termico della soluzione massiva, che consente di attenuare le oscillazioni della temperatura interna e ridurre il carico sugli impianti.

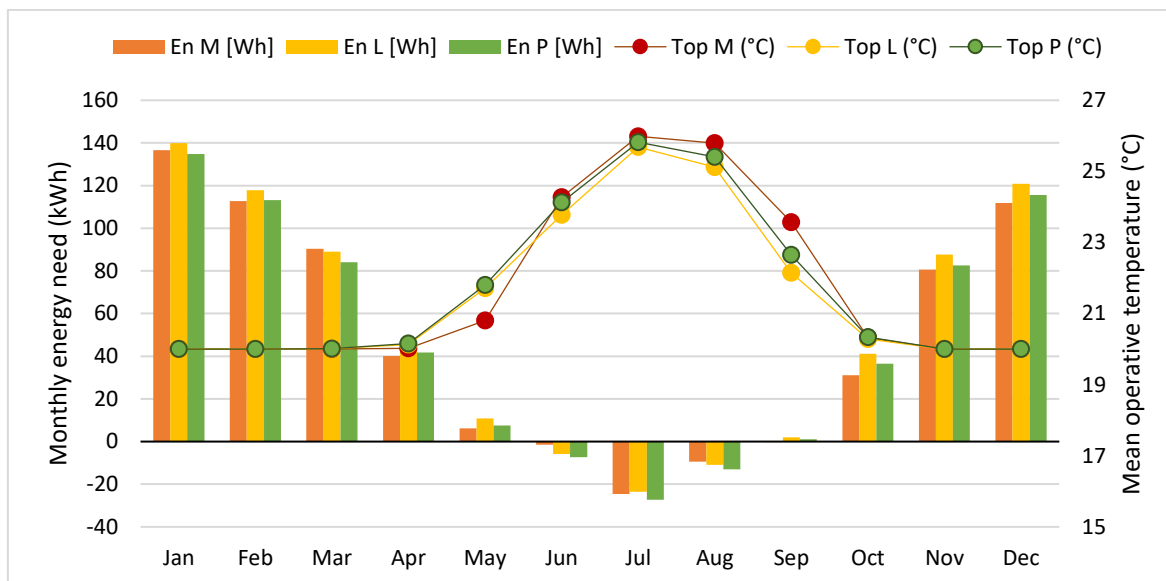


Figura 11 Confronto fra le diverse tecnologie dell'andamento dei consumi e della temperatura operante nello scenario 1 in SH

Anche i picchi di potenza risultano inferiori per la parete massiva, confermando una migliore stabilizzazione delle condizioni interne. Dal punto di vista del comfort, tutte le configurazioni mantengono temperature minime pari a 20 °C, mentre le temperature massime rimangono inferiori a 27 °C. Tuttavia, la parete in paglia mostra il numero più elevato di ore di surriscaldamento (238 h), contro 171 h della parete massiva, Tabella 14.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Energia	Fabbisogno di riscaldamento annuo [kWh]	609	658	619
	Fabbisogno di raffrescamento annuo [kWh]	-36	-42	-50
	Fabbisogno totale annuo [kWh]	645	701	669
	Picco di potenza in riscaldamento [kW]	0.241	0.272	0.262
	Picco di potenza in raffrescamento [kW]	-0.122	-0.153	-0.154

Tabella 13 Valori sull'energia nella simulazione 1 in SH

Categoria	Indicatore	M	L	P
Comfort	Temperatura operativa max	26.5	26.7	26.7
	Temperatura operativa min	20.0	20.0	20.0
	Ore di surriscaldamento (Top > 26°C)	171	175	238
	Ore di sottoriscaldamento (Top < 20°C)	0	0	0

Tabella 14 Valori sul comfort della simulazione 1 in SH

Top	1 SH		
	Top M	Top L	Top P
=20	4156	4235	4206
> 20 e <23	1980	2188	2037
> 23 e <26	2318	2010	2142
> 26 e <27	305	326	374
> 27	0	0	0

Tabella 15 Analisi in frequenza della Top nello scenario 1 in SH

Dalla Tabella 15, si osserva che Il comportamento della parete **M** riduce le ore a 20°C e nella fascia immediatamente successiva (20-23°C spostando e accumulando la frequenza delle ore nella fascia energetica superiore (23-26°C. Questo è riconducibile alla capacità termica volumica del laterizio massivo, che immagazzina l'energia termica e stabilizza l'ambiente interno su livelli di temperatura mediamente più caldi ma confinati sotto la soglia di comfort estivo superiore (26°). Le tecnologie **L** e **P** tendono a stazionare più ore sui valori legati al set-point invernale o nelle immediate vicinanze (20-23°C). Di contro, l'assenza di un'elevata massa interna si traduce in un incremento delle ore nella prima fascia di surriscaldamento (26-27°C), dove la **Paglia (P)** mostra la sensibilità maggiore all'accumulo termico parassita rispetto al comportamento della lana di roccia o della muratura.

Nel complesso, lo scenario evidenzia come l'inerzia termica del sistema massivo permetta di ottenere contemporaneamente minori consumi e migliori condizioni di comfort.

3.2.2 Simulazione scenario 2:

L'introduzione delle modifiche previste nello Scenario 2 comporta un aumento significativo dei fabbisogni energetici rispetto allo Scenario 1. La parete massiva continua a mostrare le prestazioni migliori con un fabbisogno totale di 727 kWh, mentre la parete leggera raggiunge il valore più elevato (809 kWh).

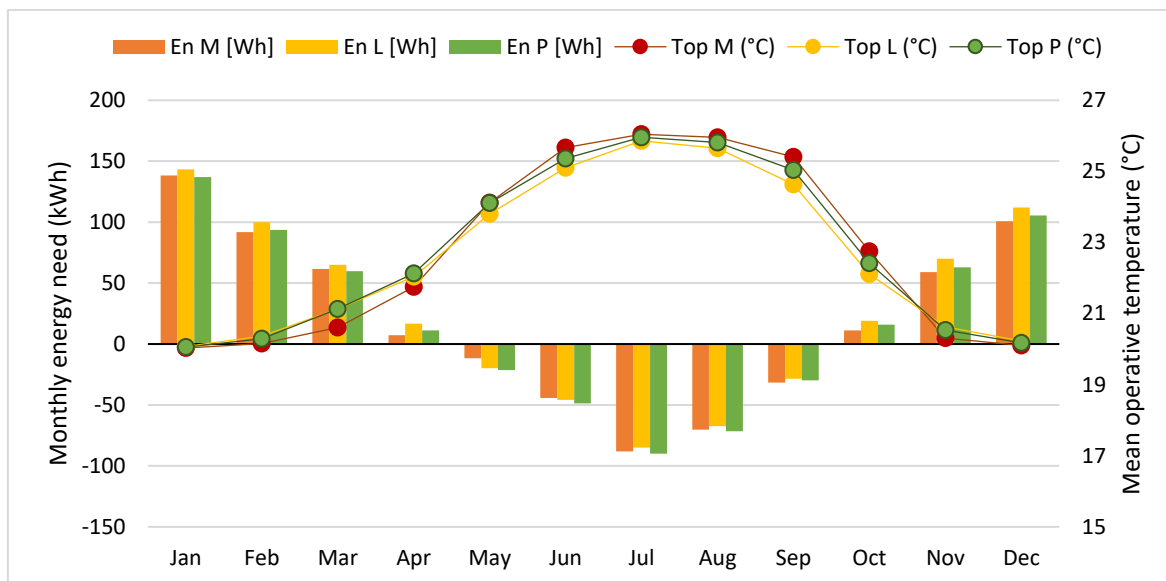


Figura 12 Confronto fra le diverse tecnologie dell'andamento dei consumi e della temperatura operante nello scenario 2 in SH

L'aumento dei consumi può essere associato alle differenti condizioni operative introdotte nello scenario, che determinano una maggiore richiesta energetica sia invernale sia estiva. Tuttavia, la capacità di accumulo della parete massiva continua a svolgere un ruolo significativo nel contenimento dei carichi energetici.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Energia	Fabbisogno di riscaldamento annuo [kWh]	475	544	500
	Fabbisogno di raffreddamento annuo [kWh]	-252	-265	-275
	Fabbisogno totale annuo [kWh]	727	809	775
	Picco di potenza in riscaldamento [kW]	0.277	0.322	0.310
	Picco di potenza in raffreddamento [kW]	-0.412	-0.475	-0.469

Tabella 16 Valori sull'energia nella simulazione 2 in SH

Dal punto di vista del comfort estivo emerge invece un comportamento differente. Sebbene la parete massiva garantisca consumi inferiori, il numero di ore di surriscaldamento risulta superiore rispetto alla soluzione leggera. Questo fenomeno è riconducibile alla maggiore capacità della struttura di trattenere il calore accumulato durante le ore più calde, prolungando la permanenza delle temperature interne al di sopra della soglia di comfort. Si evidenzia pertanto come il miglioramento dell'efficienza energetica non coincida necessariamente con la minimizzazione delle ore fuori comfort.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Comfort	Temperatura operativa max	27.0	27.2	27.2
	Temperatura operativa min	20.0	20.0	20.0
	Ore di surriscaldamento (Top > 26°C)	288	166	259
	Ore di sottoriscaldamento (Top < 20°C)	0	0	0

Tabella 17 Valori sul comfort della simulazione 2 in SH

2 SH			
Top	Top M	Top L	Top P
=20	2760	2766	2696
> 20 e <23	1938	2047	1961
> 23 e <26	3450	3406	3479
> 26 e <27	610	539	619
> 27	1	1	4

Tabella 18 Analisi in frequenza della Top nello scenario 2 in SH

3.2.3 Simulazione scenario 3:

I risultati dello Scenario 3 confermano le tendenze osservate nei casi precedenti. La parete massiva continua a registrare il minor fabbisogno energetico annuale, pari a 702 kWh, seguita dalla parete in paglia e dalla parete leggera.

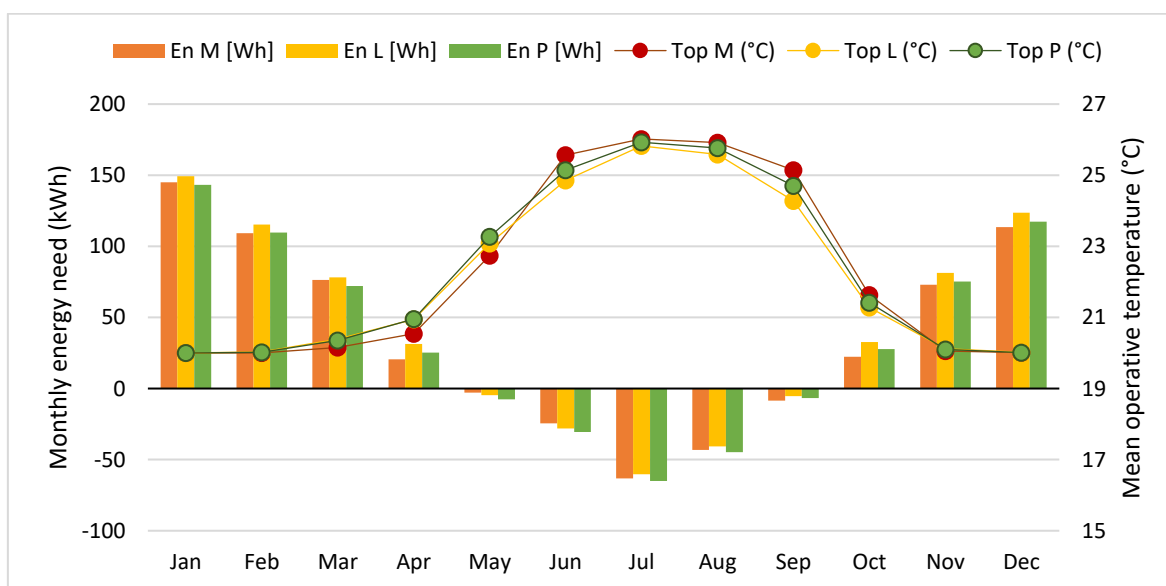


Figura 13 Confronto fra le diverse tecnologie dell'andamento dei consumi e della temperatura operante nello scenario 3 in SH

Le differenze tra le temperature operative massime risultano relativamente contenute, segno che tutte le configurazioni garantiscono un livello di comfort generalmente accettabile. Tuttavia, l'analisi delle ore di surriscaldamento mostra ancora una volta una maggiore sensibilità delle soluzioni ad elevata inerzia termica agli apporti termici estivi.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Energia	Fabbisogno di riscaldamento annuo [kWh]	560	618	574
	Fabbisogno di raffrescamento annuo [kWh]	-142	-145	-158
	Fabbisogno totale annuo [kWh]	702	763	732
	Picco di potenza in riscaldamento [kW]	0.286	0.322	0.311
	Picco di potenza in raffrescamento [kW]	-0.256	-0.285	-0.287

Tabella 19 Valori sull'energia nella simulazione 3 in SH

Categoria	Indicatore	M	L	P
Comfort	Temperatura operativa max	27.0	27.1	27.2
	Temperatura operativa min	20.0	20.0	20.0
	Ore di surriscaldamento (Top > 26°C)	237	162	243
	Ore di sottoriscaldamento (Top < 20°C)	0	0	0

Tabella 20 Valori sul comfort della simulazione 3 in SH

3 SH			
Top	Top M	Top L	Top P
=20	3256	3332	3209
> 20 e <23	2086	2159	2131
> 23 e <26	2909	2847	2889
> 26 e <27	508	420	527
> 27	0	1	3

Tabella 21 Analisi in frequenza della Top nello scenario 3 in SH

3.2.4 Simulazione scenario 4:

Nello Scenario 4 si registra una riduzione significativa dei consumi rispetto agli scenari precedenti. Anche in questo caso la parete massiva risulta la soluzione più performante, con un fabbisogno energetico totale di 570 kWh, seguita dalla parete in paglia e dalla parete leggera.

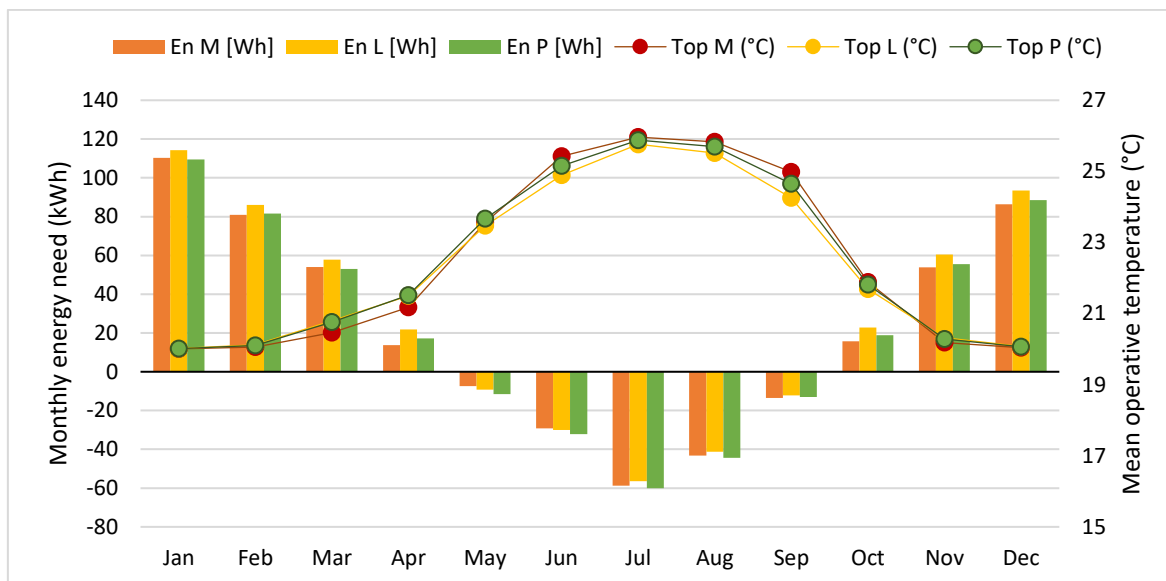


Figura 14 Confronto fra le diverse tecnologie dell'andamento dei consumi e della temperatura operante nello scenario 4 in SH

L'analisi dei grafici mostra una sostanziale uniformità delle temperature operative interne, indice di una buona capacità delle tre configurazioni di garantire condizioni di comfort adeguate. Le differenze più rilevanti emergono osservando i consumi e i picchi di potenza, che risultano sistematicamente inferiori per la soluzione massiva.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Energia	Fabbisogno di riscaldamento annuo [kWh]	416	464	429
	Fabbisogno di raffrescamento annuo [kWh]	-154	-157	-166
	Fabbisogno totale annuo [kWh]	570	621	595
	Picco di potenza in riscaldamento [kW]	0.234	0.256	0.248
	Picco di potenza in raffrescamento [kW]	-0.252	-0.272	-0.274

Tabella 22 Valori sull'energia nella simulazione 4 in SH

Le ore di surriscaldamento si riducono sensibilmente rispetto agli scenari precedenti, a testimonianza dell'efficacia delle strategie adottate in questa configurazione. Nel complesso, lo scenario evidenzia un buon equilibrio tra comfort ed efficienza energetica, con prestazioni particolarmente favorevoli per la parete massiva.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Comfort	Temperatura operativa max	27.3	27.5	27.5
	Temperatura operativa min	20.0	20.0	20.0
	Ore di surriscaldamento (Top > 26°C)	185	126	195
	Ore di sottoriscaldamento (Top < 20°C)	0	0	0

Tabella 23 Valori sul comfort della simulazione 4 in SH

4 SH			
Top	Top M	Top L	Top P
=20	2951	3001	2946
> 20 e <23	2108	2228	2140
> 23 e <26	3195	3072	3146
> 26 e <27	501	453	521
> 27	4	5	6

Tabella 24 Analisi in frequenza della Top nello scenario 4 in SH

3.2.5 Simulazione scenario 5:

Lo Scenario 5 rappresenta la configurazione più efficiente tra quelle analizzate. Il fabbisogno energetico totale raggiunge infatti i valori minimi dell'intero studio, con 562 kWh per la parete massiva, 604 kWh per la parete in paglia e 625 kWh per la parete leggera.

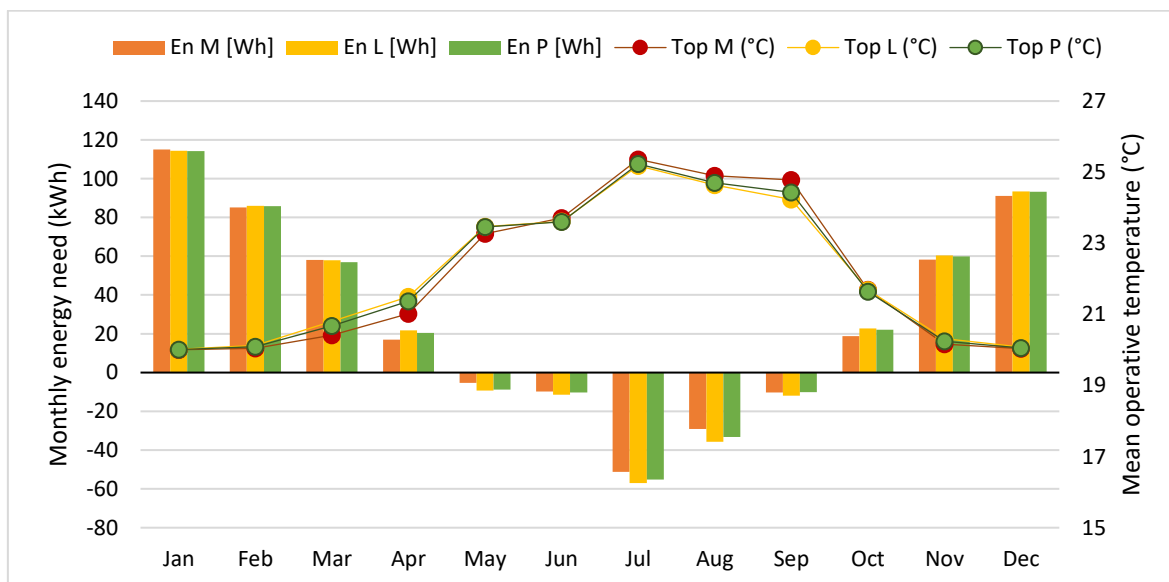


Figura 15 Confronto fra le diverse tecnologie dell'andamento dei consumi e della temperatura operante nello scenario 5 in SH

Oltre alla riduzione dei consumi, si osserva una significativa diminuzione dei picchi di potenza richiesti dagli impianti, segno di una migliore distribuzione temporale dei carichi termici. Tale comportamento contribuisce non solo a ridurre i consumi energetici ma anche a migliorare la gestione operativa dell'edificio.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Energia	Fabbisogno di riscaldamento annuo [kWh]	450	478	469
	Fabbisogno di raffreddamento annuo [kWh]	-112	-147	-134
	Fabbisogno totale annuo [kWh]	562	625	604
	Picco di potenza in riscaldamento [kW]	0.269	0.326	0.323

	Picco di potenza in raffrescamento [kW]	-0.440	-0.515	-0.515
--	---	--------	--------	--------

Tabella 25 Valori sull'energia nella simulazione 5 in SH

Particolarmente rilevante è la drastica riduzione delle ore di surriscaldamento, che si attestano attorno a poche decine di ore annue per tutte le configurazioni. Questo risultato dimostra l'efficacia delle strategie passive implementate e conferma il ruolo fondamentale della ventilazione naturale e del raffrescamento notturno nel controllo del comfort estivo.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Comfort	Temperatura operativa max	27.2	27.6	27.5
	Temperatura operativa min	20.0	20.0	20.0
	Ore di surriscaldamento (Top > 26°C)	50	54	58
	Ore di sottoriscaldamento (Top < 20°C)	0	0	0

Tabella 26 Valori sul comfort della simulazione 5 in SH

5 SH			
Top	Top M	Top L	Top P
=20	3096	3088	3109
> 20 e <23	2473	2503	2490
> 23 e <26	2915	2842	2882
> 26 e <27	273	318	271
> 27	2	8	7

Tabella 27 Analisi in frequenza della Top nello scenario 5 in SH

Dalla Tabella 27 si evince che l'elevata capacità termica volumica del laterizio massivo riduce il tempo di permanenza nelle fasce inferiori e sposta la distribuzione oraria verso la fascia medio-alta, mantenendo l'ambiente interno su livelli energetici stabilmente più caldi.

Nel complesso, la combinazione tra elevata inerzia termica e strategie passive di climatizzazione consente di ottenere le migliori prestazioni energetiche e ambientali dell'intero studio.

3.3 Day Work (DW)

3.3.1 Simulazione scenario 1:

La Figura 16 riporta l'andamento mensile dei fabbisogni energetici per la climatizzazione e della temperatura operativa media interna per le tre configurazioni di involucro analizzate nello Scenario 1, in corrispondenza del profilo di utilizzo Day Work. In questo scenario l'edificio è caratterizzato da un involucro completamente opaco, privo di superfici trasparenti

e soggetto esclusivamente agli scambi termici attraverso le strutture disperdenti opache e alle infiltrazioni d'aria.

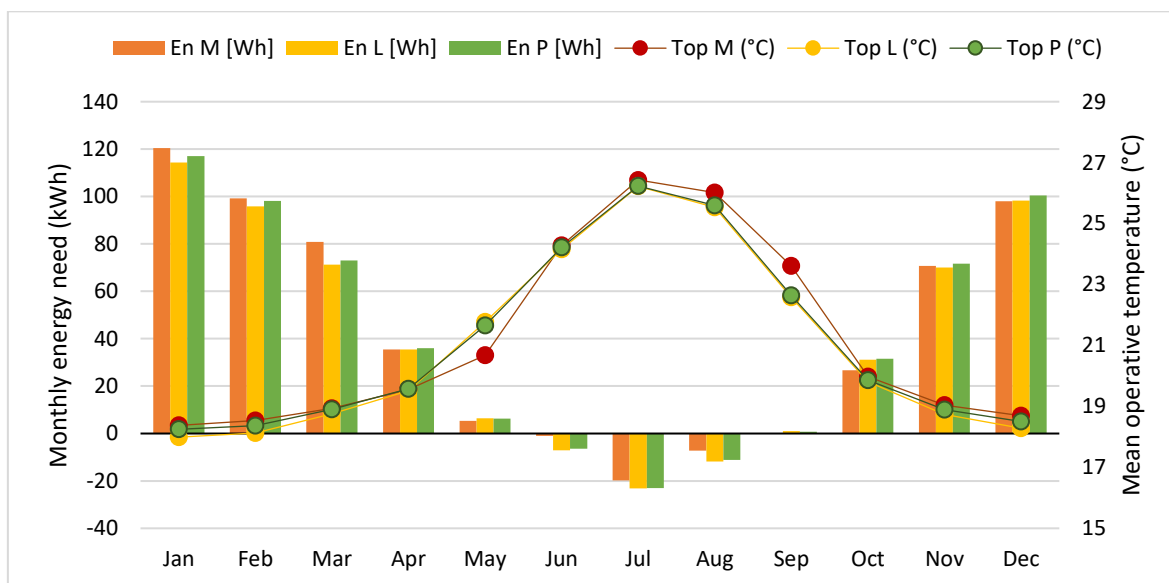


Figura 16 Confronto fra le diverse tecnologie dell'andamento dei consumi e della temperatura operante nello scenario 1 in DW

I risultati energetici riportati nella Tabella 28 evidenziano differenze contenute tra le tre soluzioni costruttive. Il fabbisogno annuo di riscaldamento varia, infatti, tra 526 kWh e 537 kWh, mentre quello di raffrescamento risulta compreso tra 28 kWh e 44 kWh. Anche il fabbisogno energetico totale presenta scostamenti limitati, confermando che, a parità di trasmittanza termica e in assenza di apporti solari, le proprietà dinamiche dell'involucro influenzano solo marginalmente i consumi stagionali.

Le differenze diventano invece più evidenti analizzando le potenze di picco richieste dagli impianti. La soluzione massiva registra i valori più bassi sia in riscaldamento (0,846 kW) sia in raffrescamento (0,380 kW), mentre l'involucro leggero presenta i valori più elevati, pari rispettivamente a 1,069 kW e 0,588 kW. Rispetto alla parete massiva, il picco di riscaldamento aumenta del 26% nel caso dell'involucro leggero e del 18% nel caso della parete in paglia; analogamente, il picco di raffrescamento risulta superiore del 55% e del 37%. Ciò evidenzia come la massa termica contribuisca principalmente alla riduzione delle richieste istantanee di potenza, pur senza produrre variazioni significative sui consumi annuali.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Energia	Fabbisogno di riscaldamento annuo [kWh]	537	526	537
	Fabbisogno di raffrescamento annuo [kWh]	-28	-44	-42
	Fabbisogno totale annuo [kWh]	565	570	579
	Picco di potenza in riscaldamento [kW]	0.846	1.069	0.996
	Picco di potenza in raffrescamento [kW]	-0.380	-0.588	-0.520

Tabella 28 Valori sull'energia nella simulazione 1 in DW

L'analisi degli indicatori di comfort (Tabella 29) mette ulteriormente in evidenza il diverso comportamento dinamico dei tre involucri. La struttura massiva presenta la temperatura operativa massima più contenuta (27,9°C) e la minima più elevata (16,4°C), mentre l'involucro leggero raggiunge sia il massimo più elevato (29,3°C) sia il minimo più basso (14,4°C). La parete in paglia assume nuovamente una posizione intermedia.

Tuttavia, la valutazione delle ore di discomfort mostra come la riduzione dei picchi termici non si traduca necessariamente in una diminuzione delle ore critiche. L'involucro massivo registra infatti il maggior numero di ore di surriscaldamento (943 h con Top > 26°C), contro le 818 h della parete in paglia e le 775 h della soluzione leggera. Tale comportamento è attribuibile alla maggiore capacità di accumulo termico, che tende a prolungare la permanenza delle temperature interne in prossimità della soglia di discomfort estivo. In inverno, invece, la stessa caratteristica consente alla struttura massiva di ridurre le ore di sottomiscaldamento (3099 h con Top < 20°C), rispetto alle 3146 h della parete in paglia e alle 3157 h dell'involucro leggero.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Comfort	Temperatura operativa max	27.9	29.5	28.8
	Temperatura operativa min	15.9	13.6	14.7
	Ore di surriscaldamento (Top > 26°C)	849	727	769
	Ore di sottomiscaldamento (Top < 20°C)	3145	3199	3195

Tabella 29 Valori sul comfort della simulazione 1 in DW

Top	1 DW		
	Top M	Top L	Top P
≤12	0	0	0
> 12 e ≤14	0	5	0
> 14 e ≤16	6	310	114
> 16 e ≤18	1161	1214	1204
> 18 e ≤20	3629	3268	3514
> 20 e ≤22	1065	1099	1045
> 22 e ≤24	690	789	789
> 24 e ≤26	1297	1269	1252
> 26 e ≤28	911	743	811
> 28 e ≤30	0	62	30
> 30 e ≤32	0	0	0
> 32 e ≤34	0	0	0
>34	0	0	0

Tabella 30 Analisi in frequenza della Top nello scenario 1 in DW

Dalla Tabella 30, La capacità termica volumica del laterizio massivo impedisce il crollo repentino delle temperature interne nelle ore di spegnimento dell'impianto, confinando quasi totalmente le ore invernali sopra i 16°C. Le strutture **L** e **P** risentono maggiormente della fluttuazione negativa a causa della minore inerzia parietale. In condizioni estive, la massa termica (**M**) assorbe i picchi d'onda termica trattenendoli nella fascia moderata, impedendo il passaggio alla fascia superiore. Questo surriscaldamento più elevato si verifica invece nelle strutture reattive a minore inerzia (**L** e **P**).

Nel complesso, i risultati mostrano come, in assenza di apporti solari e strategie di ventilazione naturale, l'effetto principale dell'inerzia termica non riguardi tanto la riduzione dei consumi energetici, quanto la modulazione della risposta termica dell'edificio, con una riduzione dei picchi di carico e delle escursioni termiche interne, ma anche una maggiore persistenza delle condizioni di surriscaldamento durante il periodo estivo.

3.3.2 Simulazione scenario 2:

La Figura 17 mostra l'andamento mensile dei fabbisogni energetici e della temperatura operativa media per le tre configurazioni di involucro nello Scenario 2, caratterizzato dalla presenza di una superficie finestrata esposta a Sud e da elevati apporti solari diretti. I guadagni solari riducono sensibilmente il fabbisogno di riscaldamento rispetto allo Scenario 1, ma determinano un marcato incremento delle esigenze di raffrescamento e delle condizioni di surriscaldamento estivo.

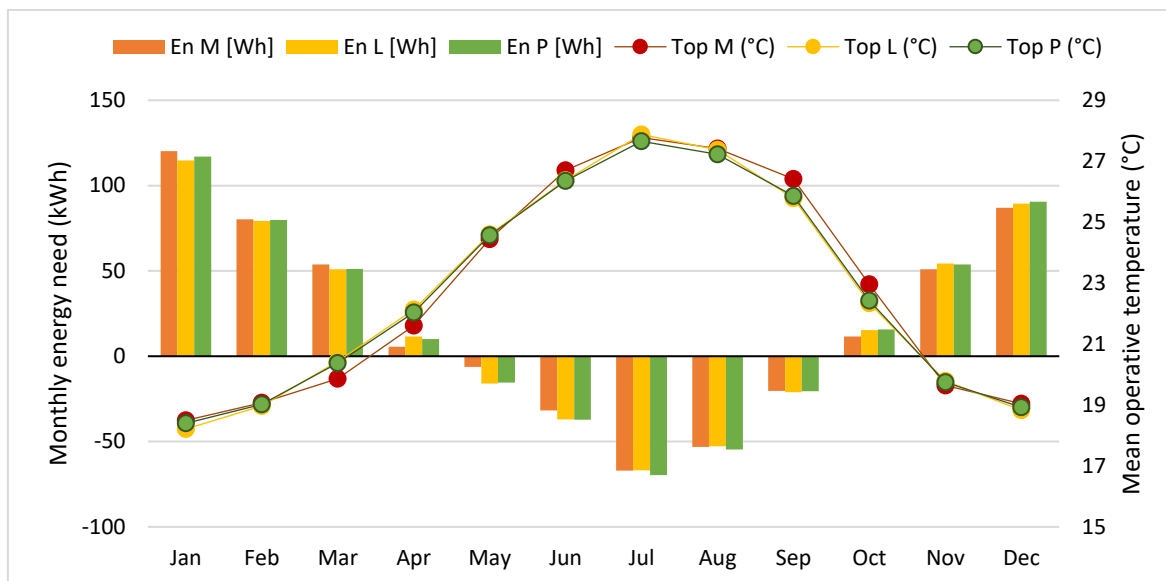


Figura 17 Confronto fra le diverse tecnologie dell'andamento dei consumi e della temperatura operante nello scenario 2 in DW

I dati energetici riportati in Tabella 31 evidenziano come il fabbisogno annuo di riscaldamento si riduca fino a valori compresi tra 412 e 426 kWh, mentre il fabbisogno di raffrescamento aumenta considerevolmente, raggiungendo valori tra 181 e 205 kWh. Il fabbisogno energetico totale varia tra 593 e 631 kWh, con la configurazione massiva che mantiene il valore più contenuto.

L'effetto della massa termica emerge soprattutto nell'analisi delle potenze di picco. La parete massiva presenta il minor picco di raffrescamento (-1,009 kW), mentre la soluzione leggera raggiunge il valore più elevato (-1,492 kW), superiore di circa il 48%. Analogamente, anche i picchi di riscaldamento risultano più contenuti nel caso massivo (0,864 kW contro 1,097 kW della parete leggera). Ciò conferma la capacità dell'inerzia termica di attenuare gli effetti dei guadagni solari e ridurre le richieste istantanee agli impianti.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Energia	Fabbisogno di riscaldamento annuo [kWh]	412	426	426
	Fabbisogno di raffrescamento annuo [kWh]	-181	-204	-205
	Fabbisogno totale annuo [kWh]	593	631	631
	Picco di potenza in riscaldamento [kW]	0.864	1.097	1.039
	Picco di potenza in raffrescamento [kW]	-1.009	-1.492	-1.368

Tabella 31 Valori sull'energia nella simulazione 2 in DW

Dal punto di vista del comfort (Tabella 32), la parete massiva mantiene la temperatura operativa massima più bassa (31,6°C), mentre l'involucro leggero raggiunge il valore più

elevato (35,7°C). Tuttavia, la struttura massiva registra il maggior numero di ore di surriscaldamento (1958 h), a fronte delle 1662 h della parete leggera e delle 1713 h della parete in paglia. Questo risultato evidenzia come l'elevata capacità di accumulo termico contribuisca a limitare i picchi di temperatura ma favorisca una maggiore permanenza delle condizioni di discomfort estivo. Le ore di sottoriscaldamento risultano invece leggermente inferiori per la soluzione massiva, grazie alla maggiore capacità di conservare il calore accumulato durante le ore favorevoli.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Comfort	Temperatura operativa max	31.6	35.7	34.0
	Temperatura operativa min	15.7	13.4	14.4
	Ore di surriscaldamento (Top > 26°C)	1958	1662	1713
	Ore di sottoriscaldamento (Top < 20°C)	2105	2044	2058

Tabella 32 Valori sul comfort della simulazione 2 in DW

2 DW			
Top	Top M	Top L	Top P
≤12	0	0	0
> 12 e ≤14	0	10	0
> 14 e ≤16	14	256	120
> 16 e ≤18	761	820	823
> 18 e ≤20	2533	2108	2256
> 20 e ≤22	1012	1034	1058
> 22 e ≤24	693	847	792
> 24 e ≤26	1644	1826	1846
> 26 e ≤28	1318	1029	1128
> 28 e ≤30	546	331	381
> 30 e ≤32	238	287	285
> 32 e ≤34	0	178	70
>34	0	33	0

Tabella 33 Analisi in frequenza della Top nello scenario 2 in DW

3.3.3 Simulazione scenario 3:

La Figura 18 riporta i risultati dello Scenario 3, nel quale la finestra è dotata di vetro a controllo solare. L'introduzione di una vetratura con ridotto fattore solare consente di limitare i guadagni radiativi estivi, mantenendo al contempo i benefici della superficie trasparente durante il periodo invernale.

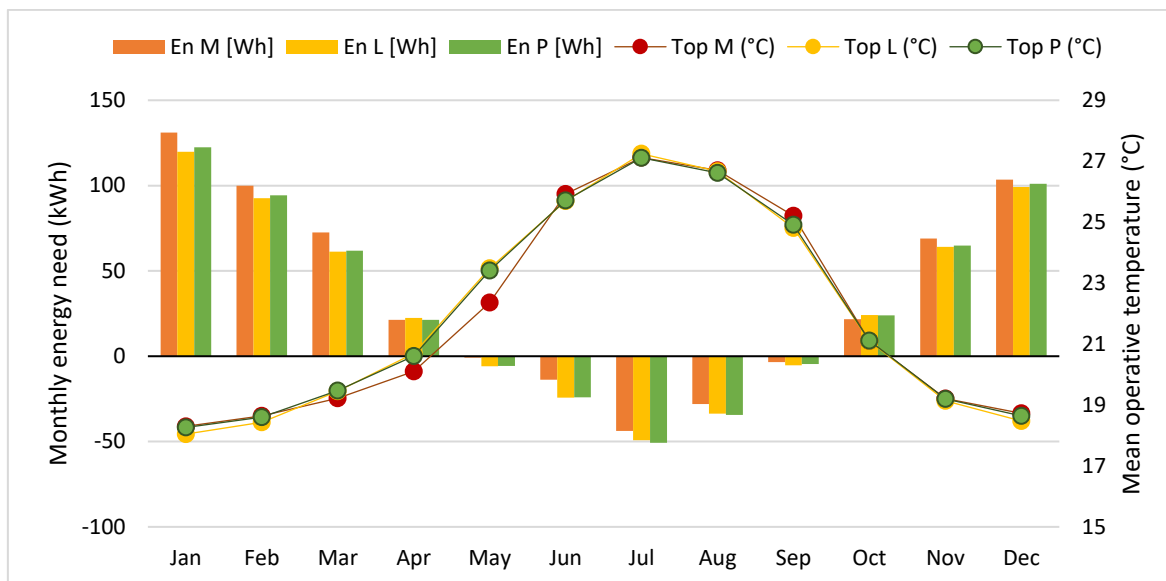


Figura 18 Confronto fra le diverse tecnologie dell'andamento dei consumi e della temperatura operante nello scenario 3 in DW

Rispetto allo Scenario 2, il fabbisogno di raffreddamento diminuisce sensibilmente per tutte le configurazioni, passando a valori compresi tra 90 e 122 kWh annui (Tabella 34). Contestualmente aumenta il fabbisogno di riscaldamento, che varia tra 487 e 519 kWh, a causa della riduzione degli apporti solari gratuiti invernali. Il bilancio energetico complessivo rimane tuttavia sostanzialmente invariato, con valori prossimi ai 610 kWh annui.

Anche in questo scenario la parete massiva presenta le minori richieste di potenza sia in riscaldamento (0,907 kW) sia in raffreddamento (-0,756 kW), mentre l'involucro leggero evidenzia i picchi più elevati. La riduzione dei picchi di raffreddamento rispetto allo Scenario 2 dimostra l'efficacia del vetro selettivo nel contenere i carichi solari estivi.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Energia	Fabbisogno di riscaldamento annuo [kWh]	519	487	492
	Fabbisogno di raffreddamento annuo [kWh]	-90	-122	-122
	Fabbisogno totale annuo [kWh]	609	608	614
	Picco di potenza in riscaldamento [kW]	0.907	1.097	1.039
	Picco di potenza in raffreddamento [kW]	-0.756	-1.093	-0.992

Tabella 34 Valori sull'energia nella simulazione 3 in DW

Dal punto di vista del comfort termico (Tabella 35), le temperature massime diminuiscono rispetto allo scenario precedente, attestandosi tra 30,0°C e 32,8°C. Anche le ore di

surriscaldamento si riducono sensibilmente, passando da valori superiori a 1600 ore a valori compresi tra 1277 e 1429 ore. La parete massiva continua a registrare il numero maggiore di ore oltre la soglia di 26°C, confermando come la maggiore inerzia termica tenda a prolungare la permanenza delle temperature interne elevate. Le ore di sottoriscaldamento aumentano rispetto allo Scenario 2 a causa della minore disponibilità di apporti solari invernali.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Comfort	Temperatura operativa max	30.0	32.8	31.5
	Temperatura operativa min	15.5	13.4	14.4
	Ore di surriscaldamento (Top > 26°C)	1429	1277	1316
	Ore di sottoriscaldamento (Top < 20°C)	2614	2496	2505

Tabella 35 Valori sul comfort della simulazione 3 in DW

3 DW			
Top	Top M	Top L	Top P
≤12	0	0	0
> 12 e ≤14	0	10	0
> 14 e ≤16	33	274	125
> 16 e ≤18	1007	981	988
> 18 e ≤20	2961	2563	2744
> 20 e ≤22	1183	1136	1145
> 22 e ≤24	624	760	677
> 24 e ≤26	1408	1632	1646
> 26 e ≤28	1196	900	1006
> 28 e ≤30	347	327	355
> 30 e ≤32	0	159	73
> 32 e ≤34	0	17	0
>34	0	0	0

Tabella 36 Analisi in frequenza della Top nello scenario 3 in DW

Dalla Tabella 36, la capacità termica volumica della parete massiva mitiga il raffreddamento locale dell'aria interna durante le ore di inattività dell'impianto, riducendo drasticamente lo stazionamento sotto i 16°C rispetto alla reattività termica negativa evidenziata dal sistema leggero. In regime estivo intermittente, l'inerzia della muratura agisce come un ammortizzatore termico: assorbe l'energia dei picchi radianti e convettivi accumulando le ore nella fascia moderata ed eliminando del tutto le escursioni sopra i 30°C. Le strutture a minore inerzia non riescono a contenere l'ampiezza dell'onda termica interna, subendo uno slittamento delle ore verso i range critici superiori.

3.3.4 Simulazione scenario 4:

La Figura 19 rappresenta i risultati dello Scenario 4, caratterizzato dalla presenza di superfici adiabatiche e quindi da una riduzione significativa delle dispersioni termiche verso l'esterno. Tale configurazione simula una situazione edilizia più realistica, assimilabile a un'unità abitativa inserita in un contesto plurifamiliare o a schiera.

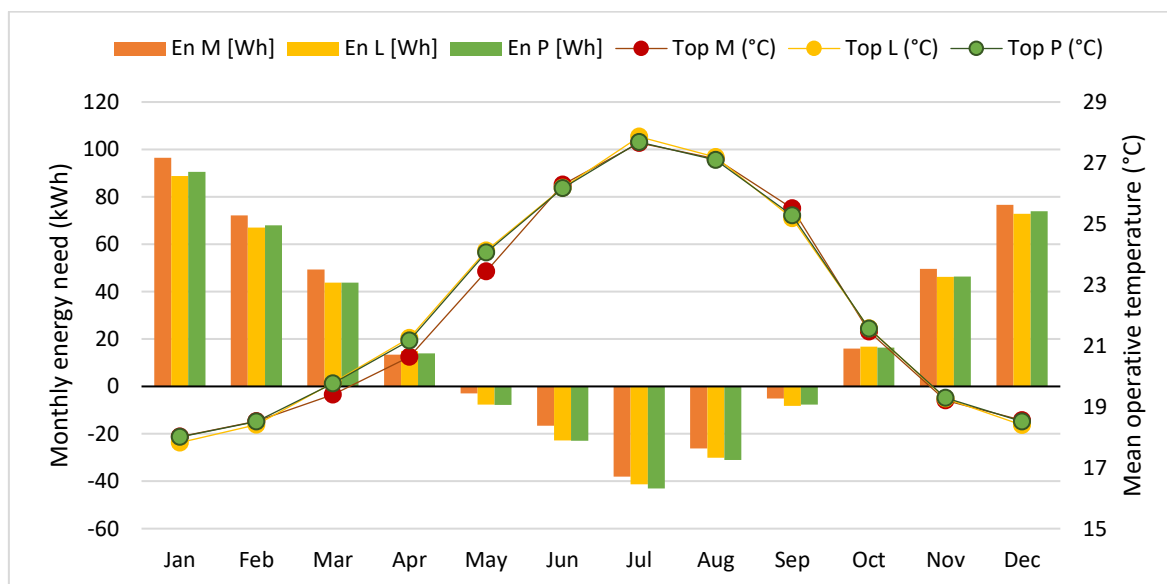


Figura 19 Confronto fra le diverse tecnologie dell'andamento dei consumi e della temperatura operante nello scenario 4 in DW

La riduzione delle superfici disperdenti determina un'importante diminuzione dei consumi energetici. Il fabbisogno totale annuo scende infatti a valori compresi tra 464 e 471 kWh, i più bassi tra tutti gli scenari analizzati. Anche il fabbisogno di riscaldamento si riduce sensibilmente, attestandosi tra 355 e 374 kWh annui (Tabella 37).

Le richieste di potenza rimangono inferiori nel caso della parete massiva, che presenta il minor picco di riscaldamento (0,754 kW) e di raffrescamento (-0,768 kW). Le configurazioni leggere e in paglia mostrano invece valori più elevati, confermando il ruolo dell'inerzia termica nella limitazione dei carichi di punta.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Energia	Fabbisogno di riscaldamento annuo [kWh]	374	355	356
	Fabbisogno di raffrescamento annuo [kWh]	-89	-114	-115
	Fabbisogno totale annuo [kWh]	464	469	471
	Picco di potenza in riscaldamento [kW]	0.754	0.882	0.844
	Picco di potenza in raffrescamento [kW]	-0.768	-1.038	-0.964

Tabella 37 Valori sull'energia nella simulazione 4 in DW

Dal punto di vista del comfort (Tabella 38), la maggiore capacità di trattenere il calore all'interno dell'ambiente determina un incremento delle temperature massime, che raggiungono 32,3°C per la parete massiva e 35,7°C per quella leggera. Le ore di surriscaldamento risultano elevate per tutte le soluzioni e superano le 1400 ore annue. La parete massiva registra il valore più alto (1549 h), mentre l'involucro leggero presenta il valore minimo (1424 h). Nonostante ciò, la soluzione massiva continua a garantire le temperature minime più elevate e il minor numero di ore di sottoriscaldamento, confermando una migliore capacità di stabilizzazione termica durante il periodo invernale.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Comfort	Temperatura operativa max	32.3	35.7	34.2
	Temperatura operativa min	14.3	12.2	13.1
	Ore di surriscaldamento (Top > 26°C)	1549	1424	1469
	Ore di sottoriscaldamento (Top < 20°C)	2418	2305	2307

Tabella 38 Valori sul comfort della simulazione 4 in DW

4 DW			
Top	Top M	Top L	Top P
≤12	0	0	0
> 12 e ≤14	0	76	17
> 14 e ≤16	220	413	311
> 16 e ≤18	1017	831	909
> 18 e ≤20	2494	2235	2344
> 20 e ≤22	1109	1082	1101
> 22 e ≤24	707	874	800
> 24 e ≤26	1539	1685	1679
> 26 e ≤28	1003	773	879
> 28 e ≤30	462	347	370
> 30 e ≤32	205	255	263
> 32 e ≤34	3	153	82
>34	0	35	4

Tabella 39 Analisi in frequenza della Top nello scenario 4 in DW

3.3.5 Simulazione scenario 5:

La Figura 20 riporta i risultati dello Scenario 5, nel quale è stata introdotta una strategia di ventilazione naturale notturna finalizzata al raffrescamento passivo dell'edificio. L'incremento della portata di ventilazione nelle ore serali e notturne consente di sfruttare le temperature esterne più favorevoli per smaltire il calore accumulato durante il giorno.

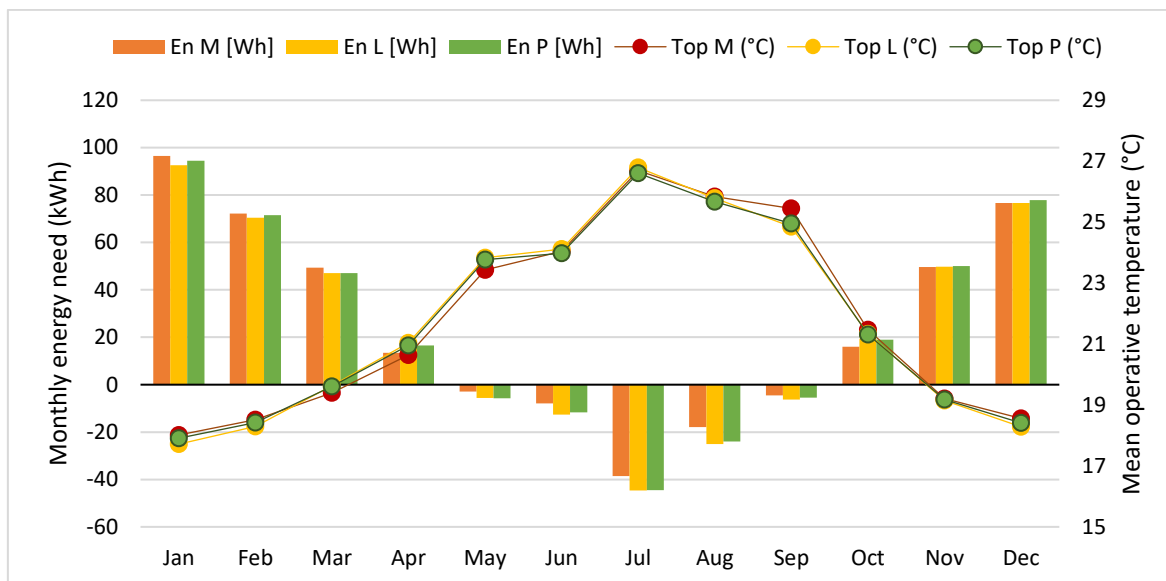


Figura 20 Confronto fra le diverse tecnologie dell'andamento dei consumi e della temperatura operante nello scenario 5 in DW

Dal punto di vista energetico (Tabella 40), questo scenario produce i migliori risultati complessivi. Il fabbisogno totale annuo si riduce ulteriormente, raggiungendo valori compresi tra 450 e 488 kWh. Anche il fabbisogno di raffrescamento diminuisce significativamente rispetto allo Scenario 4, con riduzioni comprese tra il 15% e il 20% a seconda della soluzione costruttiva considerata.

L'effetto della ventilazione naturale risulta particolarmente evidente nelle richieste di raffrescamento stagionale, mentre i picchi di potenza rimangono comunque inferiori nel caso della parete massiva. La configurazione leggera continua a mostrare i valori più elevati sia in riscaldamento sia in raffrescamento, evidenziando una maggiore sensibilità alle variazioni delle condizioni esterne.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Energia	Fabbisogno di riscaldamento annuo [kWh]	376	384	385
	Fabbisogno di raffrescamento annuo [kWh]	-74	-104	-99
	Fabbisogno totale annuo [kWh]	450	488	484
	Picco di potenza in riscaldamento [kW]	0.754	0.912	0.873
	Picco di potenza in raffrescamento [kW]	-1.011	-1.422	-1.324

Tabella 40 Valori sull'energia nella simulazione 5 in DW

L'analisi del comfort (Tabella 41) conferma l'efficacia della ventilazione notturna. Le ore di surriscaldamento si riducono sensibilmente rispetto allo Scenario 4, passando da circa 1500 ore a valori prossimi alle 1000 ore annue. La parete in paglia registra il miglior risultato

(1003 h), seguita dalla parete massiva (1043 h) e da quella leggera (1057 h). Anche le temperature operative massime risultano inferiori rispetto allo scenario precedente. Le ore di surriscaldamento rimangono sostanzialmente invariate, indicando che la strategia adottata agisce principalmente sul miglioramento delle condizioni estive senza penalizzare in modo significativo il comportamento invernale dell'edificio.

Categoria	Indicatore	M	L	P
Comfort	Temperatura operativa max	31.8	35.0	33.7
	Temperatura operativa min	14.3	11.9	12.9
	Ore di surriscaldamento (Top > 26°C)	1043	1057	1003
	Ore di sottomiscaldamento (Top < 20°C)	2451	2455	2455

Tabella 41 Valori sul comfort della simulazione 5 in DW

5 DW				
Top	Top M	Top L	Top P	
≤12	0	3	0	
> 12 e ≤14	0	102	30	
> 14 e ≤16	220	428	361	
> 16 e ≤18	1019	897	952	
> 18 e ≤20	2536	2371	2437	
> 20 e ≤22	1273	1264	1296	
> 22 e ≤24	998	1028	1019	
> 24 e ≤26	1596	1529	1580	
> 26 e ≤28	665	535	583	
> 28 e ≤30	360	302	298	
> 30 e ≤32	92	198	167	
> 32 e ≤34	0	85	36	
>34	0	17	0	

Tabella 42 Analisi in frequenza della Top nello scenario 5 in DW

Dalla Tabella 42, Nello spegnimento intermittente associato a schermature attive, la capacità termica volumica del laterizio massivo (**M**) funge da volano termico stoccando il calore residuo ed evitando che la temperatura interna crolli sotto i 14°C, fenomeno che invece interessa la parete leggera **L** per ben 76 ore. In regime estivo, pur registrando la parete **M** più ore complessive nella fascia di surriscaldamento moderato per via del rilascio termico posticipato, sia la tecnologia **Massiva (M)** che quella in **Paglia (P)** dimostrano una capacità di attenuazione dell'ampiezza dell'onda termica superiore rispetto al sistema **Leggero (L)**, azzerando o riducendo a poche ore la permanenza nella fascia critica più alta.

Nel complesso, lo Scenario 5 rappresenta la soluzione più efficace tra quelle analizzate, poiché combina i benefici dell'inerzia termica e della ventilazione naturale, riducendo contemporaneamente consumi energetici, picchi di carico e rischio di surriscaldamento estivo.

3.4 Analisi di sostenibilità

L'impatto ambientale delle tre tecnologie costruttive è stato valutato adottando un approccio "cradle-to-gate" tramite il calcolo effettuato sul sito web di Ubakus [37], confrontando i valori di energia primaria e di potenziale di emissione di gas serra relativi a un metro quadrato di ciascuna facciata. Questo approccio presenta alcune limitazioni che dovrebbero essere affrontate in studi futuri:

- Il fabbisogno di climatizzazione considerato dal software LCA viene generalmente calcolato tramite il valore U, secondo la norma EN-ISO 6946:2018, tralasciando così tutte le caratteristiche del rivestimento e dell'intercapedine d'aria, nonché l'effetto della posizione della massa. Il flusso termico annuale dovrebbe essere calcolato e preso in considerazione negli impatti relativi.
- Questo database considera l'impatto ambientale «cradle-to-gate» dei materiali definiti, ma non la durabilità dei materiali né la manutenzione e la sostituzione richieste per i diversi elementi.

Per ogni tipo di pannello murario, nella Figura 21, il grafico superiore mostra il potenziale di riscaldamento globale della produzione del componente nella parte verticale della curva. Le emissioni di gas serra (dovute al riscaldamento) che si generano durante l'utilizzo dell'edificio sono indicate dalla curva ascendente.

Mentre il grafico inferiore mostra il consumo di energia primaria non rinnovabile per la produzione del componente nella parte verticale della curva. L'energia primaria necessaria durante l'utilizzo dell'edificio (per il riscaldamento) è rappresentata dalla curva ascendente.

Più a lungo il componente viene utilizzato senza modifiche, più è rispettoso dell'ambiente, poiché i costi di produzione contribuiscono in misura minore alle emissioni totali (come indicato dal colore della curva).

A causa dei guadagni solari e interni sconosciuti, il fabbisogno di riscaldamento può essere solo stimato. Di conseguenza, il consumo di energia primaria e il potenziale di riscaldamento globale durante la fase di utilizzo sono noti solo in modo approssimativo. Per la stima si è ipotizzato che i guadagni solari e interni contribuiscano con 4 kWh/a/m² di superficie del componente. L'area grigio chiaro indica la zona in cui la curva si colloca con grande certezza. Per la generazione di calore sono stati utilizzati un apporto di energia primaria di 0,60 kWh per kWh di calore e un potenziale di riscaldamento globale di 0,16 kg CO₂ eqv/m² per kWh di calore. Fonte di calore: pompa di calore (aria-acqua) [37].

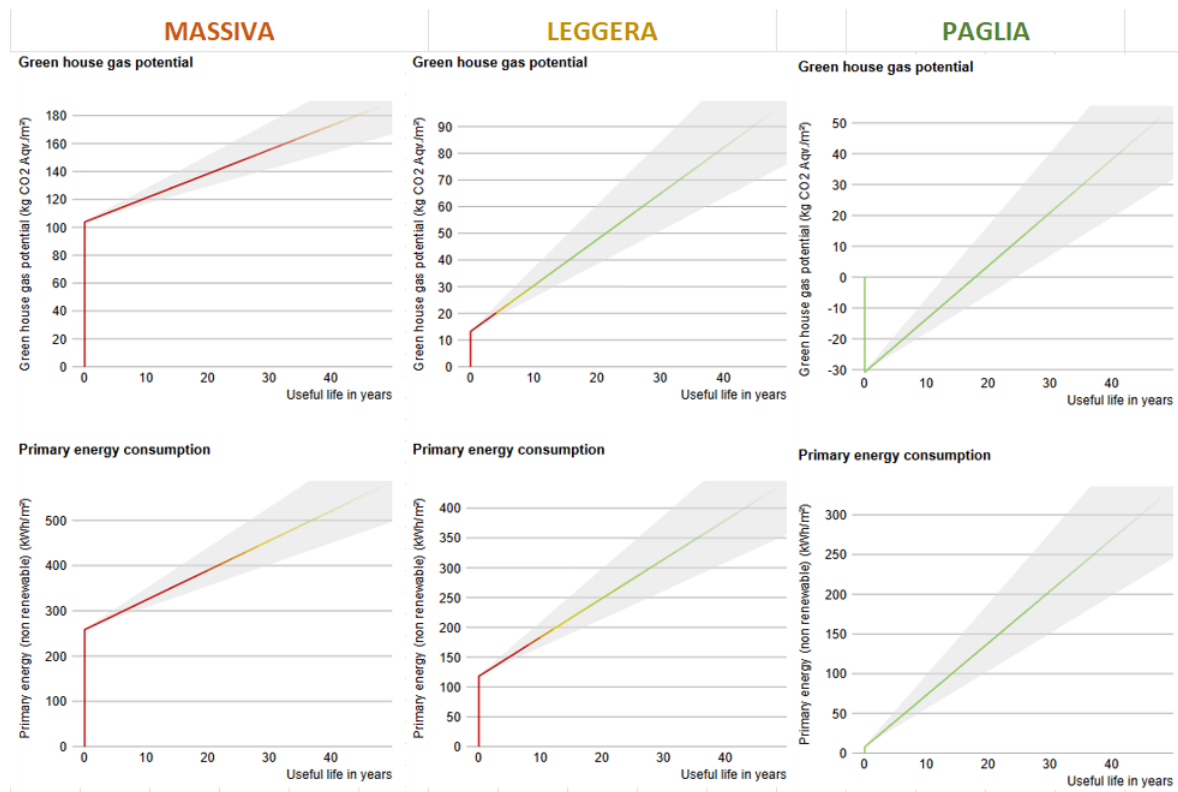


Figura 21 Confronto grafico fra le tre tecnologie sul consumo di energia primaria e il potenziale di riscaldamento globale

Andando a descrivere il grafico “Green house gas potential”:

- Il tratto verticale rappresenta l'Embodied Carbon (il carbonio incorporato iniziale), ovvero l'impatto ambientale legato alla fase di produzione (dall'estrazione delle materie prime fino alla fabbricazione del componente, corrispondente alle fasi A1-A3 della norma EN 15978);
- Il tratto obliquo rappresenta l'Operational Carbon (il carbonio operativo), cioè le emissioni cumulative di gas serra legate alla fase di uso del componente all'interno dell'edificio (fase B), in questo caso specificamente dovute al riscaldamento. Essendo emissioni continue che si ripetono anno dopo anno, la curva sale in modo costante nel tempo. La pendenza della retta indica il tasso di emissione annuale dovuto ai consumi energetici, mentre l'area ombreggiata grigia rappresenta la fascia di incertezza o i diversi scenari previsionali sul lungo periodo.

Mentre per quanto riguarda il grafico “Primary energy consumption”, segue esattamente la stessa logica metodologica del precedente:

- Il tratto verticale rappresenta l'Embodied Energy (l'energia incorporata iniziale non rinnovabile) del componente edilizio. È la quantità totale di energia primaria non rinnovabile spesa a monte per estrarre le materie prime, trasportarle e lavorarle in fabbrica fino alla produzione del componente pronto per l'installazione (fasi A1-A3 dell'LCA);
- Il tratto obliquo rappresenta l'Operational Energy (l'energia primaria non rinnovabile operativa), ovvero i consumi energetici cumulativi legati alla fase d'uso (fase B). È la quota di energia non rinnovabile che l'edificio deve consumare anno dopo anno per il riscaldamento degli ambienti, a causa delle dispersioni termiche o del comportamento del componente stesso durante la vita utile dell'immobile.

	Primary energy consumption [kWh/m ²]		Green house gas potential [kg CO ₂ -Äqv./m ²]	
	Valore tratto verticale	Valore dopo 50 anni	Valore tratto verticale	Valore dopo 50 anni
M	258	585,5	104	186,5
L	118	436,75	13	98
P	7,7	335,58	-31	56,5

Tabella 43 Confronto numerico dei valori trattati fra le diverse tecnologie costruttive

Dall'osservazione dei grafici emerge che le configurazioni caratterizzate da una maggiore massa termica presentano generalmente impatti iniziali più elevati, dovuti alla maggiore quantità di materiali impiegati e all'energia necessaria per la loro produzione. Tuttavia, tali impatti vengono progressivamente compensati nel corso della vita utile dell'edificio grazie alla riduzione dei consumi energetici durante la fase di esercizio.

Le soluzioni leggere mostrano invece impatti ambientali iniziali più contenuti, ma presentano consumi energetici operativi maggiori, che nel lungo periodo possono determinare un incremento degli impatti complessivi. Questo comportamento evidenzia come la valutazione della sostenibilità non possa essere limitata alla sola fase produttiva ma debba necessariamente considerare l'intero ciclo di vita dell'edificio.

Particolarmente interessanti risultano le configurazioni realizzate con materiali naturali, come la paglia. Queste soluzioni consentono infatti di coniugare buone prestazioni energetiche con ridotti impatti ambientali legati alla produzione dei materiali, grazie all'impiego di risorse rinnovabili caratterizzate da basse emissioni incorporate. La parete in paglia rappresenta pertanto un efficace compromesso tra efficienza energetica, comfort abitativo e sostenibilità ambientale.

L'analisi complessiva evidenzia che le migliori prestazioni ambientali sono ottenute dalle soluzioni che riescono a bilanciare opportunamente energia incorporata ed energia operativa. In questo contesto, le configurazioni massive e quelle in paglia risultano le alternative più promettenti, poiché permettono di ridurre significativamente i consumi energetici garantendo al contempo un impatto ambientale complessivo contenuto.

I risultati confermano infine l'importanza di adottare un approccio integrato alla progettazione dell'involucro edilizio, nel quale gli aspetti energetici, ambientali e di comfort

vengano considerati congiuntamente al fine di individuare la soluzione più sostenibile nel lungo periodo.

4. Discussioni

4.1 Influenza delle proprietà termo-fisiche sul comportamento dinamico dell'involucro

L'obiettivo principale del presente lavoro è stato valutare come tre differenti tecnologie costruttive, caratterizzate dalla medesima trasmittanza termica ($U \approx 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$), rispondano alle sollecitazioni climatiche e ai differenti profili di utilizzo dell'edificio. I risultati dimostrano chiaramente che il comportamento energetico dell'involucro non dipende esclusivamente dalla trasmittanza termica, ma è fortemente influenzato dalle proprietà dinamiche della stratigrafia, quali capacità termica periodica interna, fattore di attenuazione e sfasamento dell'onda termica.

Dal confronto delle proprietà termo-fisiche emerge innanzitutto come la **massa superficiale** delle tre pareti sia estremamente differente. La parete massiva in termolaterizio presenta una massa pari a $445,5 \text{ kg/m}^2$, circa 5,6 volte superiore rispetto alla parete leggera ($79,6 \text{ kg/m}^2$) e quasi sette volte superiore rispetto alla parete in paglia ($65,4 \text{ kg/m}^2$). Tuttavia, tale differenza non si traduce in un incremento proporzionale della capacità termica periodica interna, che rappresenta il parametro maggiormente correlato con il comportamento dinamico dell'involucro.

Infatti, mentre la massa superficiale della parete in paglia risulta inferiore dell'85% rispetto alla parete massiva, la **capacità termica periodica interna** diminuisce solamente del 18%, passando da $45,43$ a $37,04 \text{ kJ/m}^2\text{K}$. La parete leggera, pur possedendo una massa leggermente superiore alla parete in paglia, presenta invece una capacità termica periodica interna pari a $27,25 \text{ kJ/m}^2\text{K}$, inferiore del 40% rispetto alla parete massiva. Tale risultato evidenzia come il comportamento dinamico dell'involucro non dipenda dalla sola quantità di massa presente, ma soprattutto dalla porzione di massa termicamente attiva sul lato interno della parete e dalla distribuzione degli strati lungo la stratigrafia.

Un'ulteriore conferma deriva dal confronto del **fattore di attenuazione**. La parete massiva presenta un valore pari a $0,004$, indicando che meno dell'1% dell'onda termica incidente viene trasmessa verso l'ambiente interno. La parete in paglia e quella leggera mostrano invece valori rispettivamente pari a $0,621$ e $0,704$, trasmettendo oltre il 60% dell'onda termica esterna. Il fattore di attenuazione risulta quindi il parametro che meglio descrive la

capacità della struttura di smorzare le oscillazioni termiche esterne e rappresenta uno dei principali elementi interpretativi delle differenze osservate nelle simulazioni.

Particolarmente interessante risulta inoltre il confronto dello **sfasamento dell'onda termica**. Per le pareti in paglia e in lana di roccia lo sfasamento è pari rispettivamente a circa 7 h 06 min e 6 h 39 min, mentre la parete massiva presenta uno sfasamento reale di circa 31 h 05 min. Il software restituisce un valore pari a 7 h 05 min poiché, come specificato nel manuale, per valori superiori alle 24 ore il risultato viene visualizzato sottraendo un ciclo giornaliero. Dal punto di vista fisico ciò significa che il picco dell'onda termica attraversa la parete massiva con un ritardo superiore ad un'intera giornata, contribuendo a disaccoppiare temporalmente gli apporti esterni dalle condizioni interne. Tuttavia, lo sfasamento, da solo, non è sufficiente a spiegare il comportamento energetico osservato. I risultati dimostrano infatti che è la combinazione tra sfasamento, capacità termica periodica interna e fattore di attenuazione a determinare le prestazioni complessive dell'involucro.

4.2 Confronto energetico delle tre soluzioni costruttive

L'analisi energetica conferma in tutti gli scenari il comportamento più efficiente della parete massiva. Nel profilo **Stay Home**, caratterizzato dalla presenza continua degli occupanti e dal funzionamento prolungato degli impianti, la soluzione massiva registra sistematicamente il minore fabbisogno totale annuo.

Nello Scenario 1 il fabbisogno totale risulta pari a 645 kWh, contro 701 kWh della parete leggera e 669 kWh della parete in paglia. La parete massiva riduce quindi il consumo complessivo dell'8,0% rispetto alla soluzione leggera e del 3,6% rispetto alla parete bio-based.

L'effetto diventa ancora più evidente nello Scenario 2, caratterizzato da maggiori apporti solari. In questo caso il consumo totale della parete massiva è pari a 727 kWh, mentre la parete leggera raggiunge 809 kWh (+11,3%) e la parete in paglia 775 kWh (+6,6%). Analogamente, nello Scenario 3 la riduzione del consumo totale è pari all'8,0% rispetto alla parete leggera e al 4,1% rispetto alla parete in paglia.

Negli Scenari 4 e 5 le differenze si riducono leggermente ma rimangono significative. Nello Scenario 4 la parete massiva consuma l'8,2% in meno della parete leggera e il 4,2% in meno

della parete in paglia, mentre nello Scenario 5 la riduzione raggiunge rispettivamente il 10,1% e il 7,0%. Complessivamente, considerando tutti gli scenari Stay Home, la parete massiva consente una riduzione media del fabbisogno energetico annuo di circa il 9% rispetto alla parete leggera e di circa il 5% rispetto alla parete in paglia.

Scenario (Stay Home)	Parete massiva vs leggera	Parete vs massiva paglia	vs Osservazioni
SH1	-8.0%	-3.6%	Minimo fabbisogno energetico totale (645 kWh)
SH2	-11.3%	-6.6%	Maggiore vantaggio con elevati apporti solari
SH3	-8.0%	-4.1%	Comportamento analogo allo Scenario 1
SH4	-8.2%	-4.2%	Comportamento analogo allo Scenario 1
SH5	-10.1%	-7.0%	Massimo vantaggio rispetto alla parete in paglia
Media	≈ -9%	≈ -5%	Migliore prestazione energetica in tutti gli scenari

Tabella 44 Sintesi dei risultati energetici – Profilo Stay home

L'analisi dei picchi di potenza conferma ulteriormente il ruolo dell'inerzia termica. Nel profilo Stay Home il picco di potenza in riscaldamento della parete massiva risulta mediamente inferiore del 10-20% rispetto alla parete leggera, mentre i picchi di raffrescamento si riducono mediamente del 10-15%. Ciò indica che la massa termica non solo limita i consumi complessivi, ma contribuisce anche a ridurre la potenza installata necessaria agli impianti HVAC, con potenziali benefici sia economici sia impiantistici.

Parametro	Riduzione con parete massiva	Beneficio
Picco di potenza in riscaldamento	10–20%	Minore potenza installata richiesta
Picco di potenza in raffrescamento	10–15%	Riduzione dei carichi di punta estivi
Consumo energetico annuo	≈9% rispetto alla parete leggera rispetto alla parete in paglia	≈5% Maggiore efficienza energetica complessiva

Tabella 45 Sintesi dei picchi di potenza – Profilo Stay Home

Il comportamento risulta differente nel profilo **Day Work**, caratterizzato dall'assenza degli occupanti durante le ore centrali della giornata. In questo caso le differenze nei consumi annuali risultano generalmente più contenute. Nello Scenario 1, ad esempio, il fabbisogno totale varia solamente tra 565 e 579 kWh, con differenze inferiori al 3%. Analogamente, negli Scenari 3 e 4 il divario tra le tre tecnologie rimane inferiore al 2%.

Tale comportamento è attribuibile alla diversa modalità di utilizzo dell'edificio. Durante le ore di assenza degli occupanti la maggiore inerzia termica della parete massiva non può essere completamente sfruttata per migliorare il comfort interno, mentre una parte dell'energia accumulata viene dissipata naturalmente prima della rioccupazione degli ambienti. Di conseguenza, il vantaggio energetico della soluzione massiva si riduce rispetto al profilo Stay Home.

Diverso è invece il comportamento dei picchi di potenza, che risultano significativamente influenzati dall'inerzia termica anche nel profilo Day Work. Nello Scenario 2, ad esempio, il picco di raffrescamento della parete massiva è pari a 1,009 kW, contro 1,492 kW della parete leggera, corrispondente ad una riduzione del 32%. Analogamente, il picco di riscaldamento risulta inferiore del 21%. Riduzioni analoghe si osservano negli altri scenari, dove la parete massiva limita sistematicamente le richieste istantanee di potenza sia in inverno sia in estate.

Scenario (Day Work)	Parete massiva leggera	Parete vs massiva paglia	vs Osservazioni
DW1	< 3%	< 3%	Fabbisogni molto simili (565–579 kWh)
DW2	Riduzione contenuta	Riduzione contenuta	Consumi annui simili, ma forte riduzione dei picchi
DW3	< 2%	< 2%	Differenze energetiche trascurabili
DW4	< 2%	< 2%	Andamento analogo allo Scenario 3
DW5	Riduzione contenuta	Riduzione contenuta	Beneficio energetico limitato
Media	< 3%	< 3%	L'inerzia è meno efficace sui consumi a causa dell'assenza degli occupanti nelle ore centrali

Tabella 46 Sintesi dei risultati energetici – Profilo Day Work

Dal confronto complessivo emerge quindi che il principale beneficio dell'inerzia termica non consiste esclusivamente nella riduzione del consumo energetico annuale, ma soprattutto nella capacità di smorzare le oscillazioni dei carichi termici e di ridurre le potenze di picco richieste dagli impianti. Questo comportamento assume particolare rilevanza nell'ottica della progettazione di edifici Nearly Zero Energy Building, nei quali la limitazione dei picchi di potenza rappresenta uno degli aspetti fondamentali per l'integrazione con impianti a pompa di calore, sistemi di accumulo e fonti energetiche rinnovabili.

Parametro	Riduzione con parete massiva	Beneficio
Picco di potenza in riscaldamento	≈21% (Scenario 2)	Minore potenza installata richiesta
Picco di potenza in raffrescamento	≈32% (Scenario 2)	Riduzione dei carichi di punta estivi
Picchi di potenza (tutti gli scenari)	Riduzione sistematica	Smorzamento delle oscillazioni dei carichi termici
Consumo energetico annuo	Differenze generalmente < 3%	Beneficio limitato sui consumi, ma elevato sulle potenze di picco

Tabella 47 Sintesi dei picchi di potenza – Profilo Day Work

4.3 Comfort termico e distribuzione delle temperature operative

L'analisi dei consumi energetici, pur rappresentando uno dei principali indicatori delle prestazioni dell'involucro edilizio, non è sufficiente a descrivere il comportamento termofisico delle tre tecnologie costruttive investigate. Materiali caratterizzati da analoghi fabbisogni energetici possono infatti presentare una risposta termica profondamente diversa in termini di stabilità della temperatura interna e capacità di attenuare le oscillazioni termiche. Per questo motivo, oltre agli indicatori energetici, è stata analizzata la distribuzione annuale delle temperature operative, valutando sia gli indicatori sintetici (temperature massime, minime e ore di surriscaldamento/sottoriscaldamento) sia la permanenza dell'ambiente interno nelle diverse classi di temperatura durante l'intero anno di simulazione.

4.3.1 Profilo Stay Home

Nel profilo Stay Home, caratterizzato dalla presenza continua degli occupanti e dal funzionamento permanente dell'impianto HVAC, la temperatura operativa rimane per gran parte dell'anno prossima alle condizioni di progetto. In tutti gli scenari analizzati la temperatura minima coincide con il set-point di riscaldamento (20°C), mentre le temperature

massime risultano comprese tra 26.5°C e 27.6°C, evidenziando un controllo molto efficace delle condizioni interne.

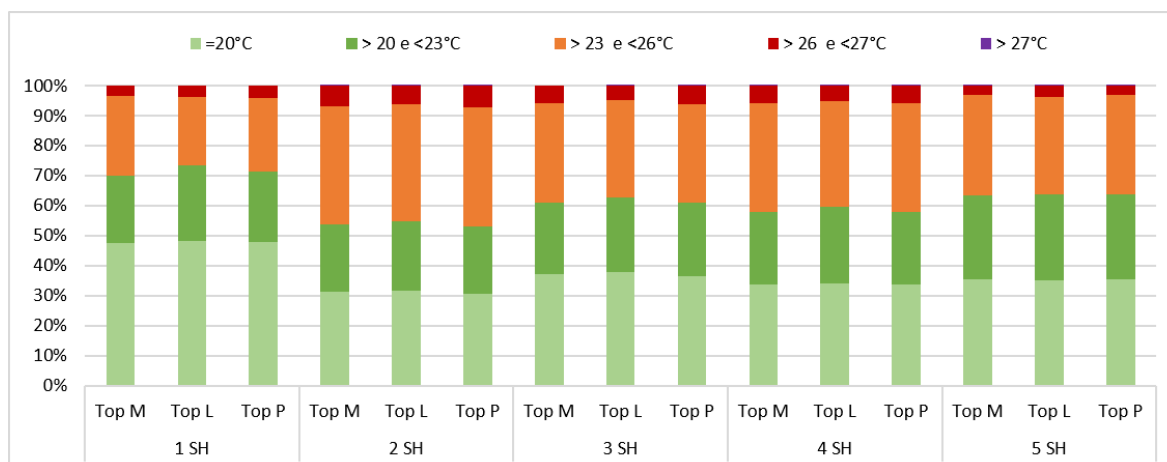


Figura 22 Analisi in frequenza delle temperature operative. Profilo Stay Home

L'analisi della distribuzione annuale delle temperature operative mostra che le differenze tra le tre tecnologie risultano relativamente contenute. Considerando la media dei cinque scenari, la parete **massiva permene** per il 37.0% delle ore a 20°C, per il 24.2% nell'intervallo 20–23°C, per il 33.8% nella fascia 23–26°C e per il restante 5.0% oltre i 26°C. La **parete leggera** presenta una distribuzione molto simile, ma con una quota leggermente maggiore di ore nelle classi inferiori (37.5% a 20°C e 25.4% tra 20 e 23°C) e una permanenza inferiore nell'intervallo 23–26°C (32.4%). La **parete in paglia** assume un comportamento intermedio, con una distribuzione molto vicina a quella della parete massiva nelle classi inferiori a 26°C (36.9%, 24.6% e 33.2%, rispettivamente), ma con una lieve maggiore permanenza oltre i 26°C (5.3%).

Più che modificare i valori estremi raggiunti dalla temperatura operativa, l'inerzia termica determina quindi una lieve redistribuzione delle ore annuali tra le classi di temperatura. La maggiore capacità di accumulo della parete massiva consente infatti di mantenere più a lungo la temperatura operativa nell'intervallo 23–26°C, sottraendo principalmente ore alla fascia 20–23°C, mentre le differenze nelle ore complessive di surriscaldamento risultano limitate.

Tale comportamento evidenzia come, in presenza di un impianto funzionante in continuo, gli effetti dell'inerzia termica sulla temperatura operativa siano in parte attenuati dall'azione

del sistema HVAC. Il controllo continuo della climatizzazione mantiene infatti l'ambiente prossimo al set-point per gran parte dell'anno, riducendo le differenze tra le tre configurazioni costruttive. In queste condizioni, i benefici della parete massiva emergono soprattutto in termini di riduzione dei consumi energetici e delle potenze di picco, mentre la distribuzione delle temperature operative risulta solo marginalmente influenzata dalla diversa capacità di accumulo dell'involucro.

4.3.2 Profilo Day Work

Uno scenario completamente diverso emerge nel profilo **Day Work**, caratterizzato dal funzionamento intermittente dell'impianto e dall'assenza degli occupanti durante le ore centrali della giornata. Durante i periodi di spegnimento dell'HVAC, infatti, l'involucro edilizio diventa il principale elemento responsabile dell'evoluzione della temperatura interna, consentendo di evidenziare con maggiore chiarezza gli effetti dell'inerzia termica.

L'analisi della distribuzione annuale (Figura 23) delle temperature operative mostra che la parete massiva modifica significativamente la distribuzione delle ore tra le diverse classi di temperatura, attenuando contemporaneamente sia gli episodi di sottoriscaldamento sia quelli di surriscaldamento severo e concentrando una quota maggiore di ore nelle classi intermedie.

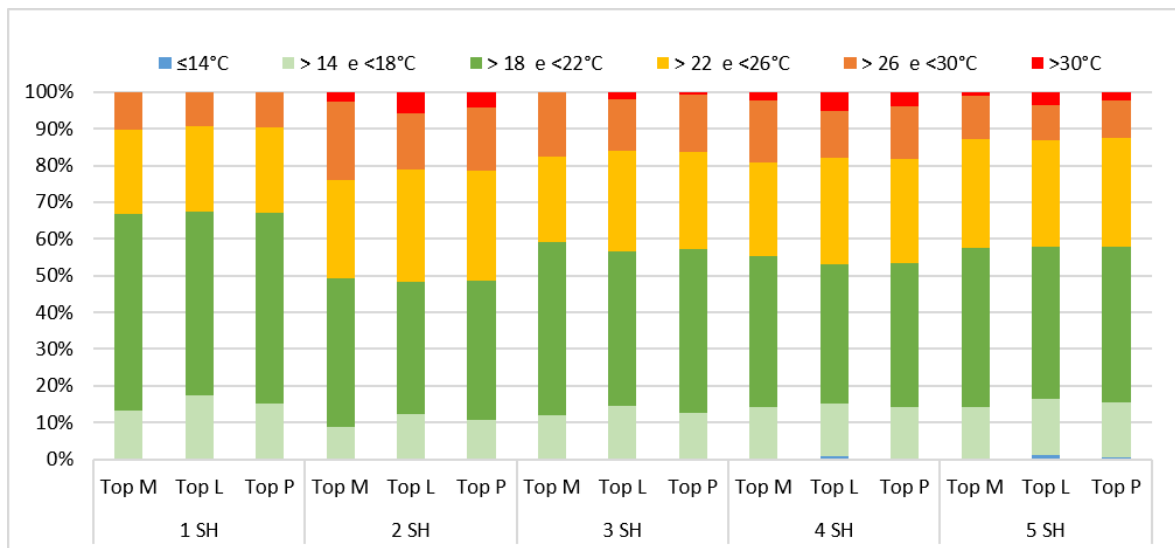


Figura 23 Analisi in frequenza delle temperature operative. Profilo Day Work

Per quanto riguarda il periodo invernale, la parete massiva riduce sistematicamente la permanenza nelle classi di temperatura più basse. Nello Scenario 2, ad esempio, le ore comprese tra 14 e 18°C diminuiscono da 1076 della parete leggera a 775 della parete massiva, con una riduzione di circa il 28%, mentre le ore inferiori a 14°C vengono completamente eliminate (0 contro 10 ore). Contestualmente, la permanenza nella fascia 18–22°C aumenta da 3142 a 3545 ore (+13%). Analoghi risultati si osservano anche negli Scenari 3, 4 e 5, nei quali la parete massiva presenta sempre un numero inferiore di ore nelle classi più fredde rispetto alla parete leggera, mentre la parete in paglia assume generalmente un comportamento intermedio. Ciò evidenzia come l'energia immagazzinata durante il periodo di funzionamento dell'impianto venga progressivamente restituita nelle ore successive, rallentando il raffreddamento dell'ambiente e limitando gli episodi di discomfort da freddo.

Un comportamento analogo si osserva anche nel periodo estivo. Se si considera esclusivamente il numero complessivo di ore con temperatura operativa superiore a 26°C, le differenze tra le tre tecnologie appaiono relativamente contenute e, in alcuni scenari, la parete massiva presenta addirittura una permanenza maggiore nell'intervallo 26–30°C. Nello Scenario 2, ad esempio, essa registra 1864 ore comprese tra 26 e 30°C, contro 1360 ore della parete leggera e 1509 ore della parete in paglia. Tuttavia, questa osservazione non rappresenta un peggioramento delle prestazioni estive, ma evidenzia una diversa redistribuzione delle temperature operative.

L'effetto dell'inerzia emerge infatti analizzando gli episodi di surriscaldamento severo. Nello Scenario 2, la parete massiva riduce le ore con temperatura operativa superiore a 30°C da 498 della parete leggera a 238, corrispondenti a una riduzione di circa il 52%, mentre la parete in paglia registra 355 ore. Lo stesso comportamento si osserva negli scenari successivi: nello Scenario 3 la parete massiva elimina completamente le ore oltre i 30°C, mentre la parete leggera ne registra 176 e la parete in paglia 73; nello Scenario 4 le ore superiori a 30°C diminuiscono da 443 a 208 (–53%), mentre nello Scenario 5 si riducono da 300 a 92 (–69%). La parete in paglia mantiene anche in questo caso un comportamento intermedio, confermando una capacità di attenuazione superiore rispetto alla parete leggera ma inferiore rispetto alla soluzione massiva.

Questi risultati dimostrano come il principale beneficio dell'elevata inerzia termica non consista nella semplice riduzione del numero complessivo di ore al di fuori della fascia di comfort, bensì nella mitigazione degli eventi di discomfort più severo. La parete massiva non elimina infatti le ore comprese tra 26 e 30°C, ma riduce in maniera significativa la probabilità che tali condizioni evolvano verso temperature operative superiori ai 30°C. Analogamente, durante il periodo invernale, limita gli episodi di sottoriscaldamento trasferendo una parte delle ore appartenenti alle classi più fredde verso l'intervallo 18–22°C. L'effetto complessivo consiste quindi in una redistribuzione delle temperature operative verso le classi intermedie e in una sensibile riduzione delle condizioni di discomfort più intenso.

Dal punto di vista fisico, tale comportamento è riconducibile all'effetto combinato dell'elevata capacità termica periodica interna (k_1) e del ridottissimo fattore di attenuazione ($f_a = 0.004$) della parete massiva. Durante le ore di maggiore carico termico la struttura assorbe una quota significativa dell'energia incidente, limitando la rapidità con cui la temperatura interna aumenta; nelle ore successive, l'energia accumulata viene rilasciata gradualmente, rallentando sia il raffreddamento sia il successivo riscaldamento dell'ambiente. Il risultato non è una modifica della temperatura media interna, bensì una riduzione della velocità con cui essa varia nel tempo. Questo fenomeno, comunemente definito in letteratura come *thermal damping effect*, rappresenta uno dei principali benefici delle strutture ad elevata inerzia termica nei climi caratterizzati da elevate escursioni termiche giornaliere.

Nel complesso, il confronto tra i due profili di utilizzo evidenzia come l'efficacia dell'inerzia termica dipenda fortemente dalla strategia di gestione dell'impianto HVAC. Con funzionamento continuo (**Stay Home**), il controllo attivo dell'impianto mantiene la temperatura operativa prossima al set-point e tende a mascherare gli effetti dell'involucro, facendo emergere i benefici della massa termica principalmente in termini di consumi energetici e riduzione delle potenze di picco. Al contrario, con funzionamento intermittente (**Day Work**), l'involucro assume un ruolo predominante nel mantenimento delle condizioni termoigrometriche interne e l'elevata inerzia della parete massiva si traduce in una significativa attenuazione sia del sottoriscaldamento sia del surriscaldamento severo, attraverso una redistribuzione delle temperature operative verso le classi termiche

intermedie. Tali risultati evidenziano come la valutazione delle prestazioni dinamiche dell'involucro non possa basarsi esclusivamente sugli indicatori energetici o sul numero complessivo di ore di surriscaldamento, ma debba necessariamente considerare anche la distribuzione temporale delle temperature operative e la modalità di gestione dell'impianto di climatizzazione.

4.3.3 Ruolo della ventilazione notturna

Lo **Scenario 5**, caratterizzato dall'introduzione della ventilazione notturna, evidenzia il ruolo determinante delle strategie passive nel migliorare il comportamento dinamico dell'involucro edilizio. Diversamente dagli scenari precedenti, nei quali l'inerzia termica agisce principalmente redistribuendo le temperature operative tra le diverse classi, la ventilazione notturna consente di sfruttare pienamente la capacità di accumulo della parete massiva, favorendo la dissipazione del calore immagazzinato durante il giorno e rigenerando la massa termica per il ciclo successivo.

L'analisi della distribuzione delle temperature operative conferma che il free-cooling notturno riduce sensibilmente gli episodi di surriscaldamento per tutte le tecnologie costruttive, ma con effetti differenti a seconda dell'inerzia dell'involucro. Nel profilo **Stay Home**, ad esempio, la ventilazione determina uno spostamento delle ore annuali dalla classe 26–27°C verso l'intervallo 23–26°C, mantenendo sostanzialmente inalterate le classi inferiori. La parete massiva registra infatti 2915 ore comprese tra 23 e 26°C, contro 2882 ore della parete in paglia e 2842 ore della parete leggera, confermando la maggiore capacità di mantenere la temperatura operativa nelle condizioni più favorevoli. Parallelamente, le ore oltre i 26°C risultano contenute per tutte le soluzioni, con differenze limitate tra le tre pareti, a testimonianza dell'efficacia della ventilazione nel limitare il surriscaldamento anche negli involucri meno massivi.

Nel profilo **Day Work** l'effetto risulta ancora più evidente. La ventilazione notturna riduce gli episodi di surriscaldamento severo, contribuendo a concentrare una quota maggiore di ore nelle classi intermedie. La parete massiva continua a presentare il minor numero di ore con temperatura operativa superiore ai 30°C (92 ore), rispetto alle 203 ore della parete in paglia e alle 300 ore della parete leggera. Contestualmente, essa mantiene una permanenza

maggiore nelle classi comprese tra 18 e 30°C, confermando come la ventilazione notturna permetta di sfruttare pienamente la capacità di accumulo della massa termica, limitando sia gli incrementi sia le successive diminuzioni della temperatura operativa.

Dal punto di vista fisico, la ventilazione notturna aumenta l'efficacia dell'inerzia termica poiché favorisce lo scarico dell'energia accumulata all'interno della parete durante il periodo diurno. In assenza di tale processo, una parte del calore immagazzinato permane nella struttura, riducendo la capacità di assorbire nuovi apporti termici nel ciclo successivo. Il raffrescamento notturno consente invece di "rigenerare" la massa termica, massimizzandone la capacità di attenuare le oscillazioni della temperatura interna e di limitare i picchi di surriscaldamento.

4.4 Valutazione ambientale e confronto con la letteratura

L'analisi svolta evidenzia come la valutazione delle prestazioni dell'involucro edilizio non possa essere limitata ai soli consumi energetici in fase d'uso. Se da un lato le simulazioni dinamiche hanno mostrato che la parete massiva rappresenta la soluzione energeticamente più efficiente, con riduzioni del fabbisogno annuo fino al **9%** rispetto alla parete leggera e circa **5%** rispetto alla parete in paglia nel profilo Stay Home, dall'altro l'analisi del ciclo di vita restituisce un quadro differente, nel quale assumono un ruolo determinante gli impatti ambientali associati alla produzione dei materiali.

Questa considerazione è oggi particolarmente rilevante alla luce della revisione della Energy Performance of Buildings Directive (EPBD 2024), che introduce progressivamente il concetto di Whole Life Carbon, promuovendo una valutazione integrata degli impatti ambientali dell'edificio lungo l'intero ciclo di vita. In tale contesto, la riduzione dei consumi energetici operativi rappresenta soltanto uno degli elementi della progettazione sostenibile, che deve essere necessariamente affiancato dalla minimizzazione del carbonio incorporato (*embodied carbon*) e dell'energia primaria richiesta per la produzione dei materiali.

L'analisi LCA conferma come la **parete massiva**, pur garantendo le migliori prestazioni energetiche, presenti anche gli impatti iniziali più elevati. Il contributo delle fasi A1–A3 (approvvigionamento delle materie prime, trasporto e produzione dei materiali) risulta infatti pari a circa 104 kgCO₂eq/m² per il Global Warming Potential e 258 kWh/m² di energia

primaria non rinnovabile, valori significativamente superiori rispetto alle altre due soluzioni. Tali impatti sono principalmente attribuibili alla produzione degli elementi in laterizio, ai processi di cottura in fornace e alla maggiore quantità di materiale impiegata.

La **parete leggera** mostra invece un comportamento opposto. Gli impatti iniziali risultano decisamente inferiori ($13 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ e 118 kWh/m^2), grazie alla riduzione della massa dei materiali utilizzati. Tuttavia, le simulazioni dinamiche hanno evidenziato come questa soluzione presenti i maggiori consumi energetici operativi e le prestazioni dinamiche meno favorevoli, con picchi di potenza più elevati e una maggiore dispersione delle temperature operative. Di conseguenza, il vantaggio ambientale iniziale tende progressivamente a ridursi durante la fase di esercizio dell'edificio.

Il comportamento della **parete in paglia** risulta invece particolarmente interessante. Pur non raggiungendo le prestazioni energetiche della parete massiva, essa mantiene consumi operativi solo leggermente superiori, mostrando al contempo gli impatti ambientali più contenuti. Il Global Warming Potential iniziale assume addirittura un valore negativo ($-31 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$), grazie al carbonio biogenico immagazzinato nella biomassa durante la crescita della pianta. Analogamente, l'energia primaria incorporata risulta estremamente ridotta (7.7 kWh/m^2), evidenziando il limitato impiego di risorse non rinnovabili nella produzione del materiale.

L'aspetto più significativo emerge tuttavia considerando l'intero periodo di riferimento di 50 anni. Sebbene gli impatti operativi aumentino progressivamente nel tempo, la parete in paglia continua a presentare il miglior bilancio ambientale complessivo, con un GWP pari a $56.5 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$, rispetto ai $98 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ della parete leggera e ai $186.5 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ della parete massiva. Lo stesso comportamento si osserva per l'energia primaria cumulata, che raggiunge 335.6 kWh/m^2 nella parete in paglia, contro 436.8 kWh/m^2 della parete leggera e 585.5 kWh/m^2 della soluzione massiva. Ciò dimostra come il lieve incremento dei consumi energetici osservato durante la fase d'uso venga ampiamente compensato dalla drastica riduzione degli impatti ambientali incorporati.

Questi risultati evidenziano un aspetto fondamentale: la soluzione energeticamente più efficiente non coincide necessariamente con quella ambientalmente più sostenibile. Nel caso in esame, la parete massiva ottimizza le prestazioni energetiche, il comfort dinamico e la

riduzione dei picchi di potenza, ma tali benefici sono ottenuti a fronte di un significativo incremento del carbonio incorporato. La parete in paglia, al contrario, presenta prestazioni energetiche solo leggermente inferiori, ma offre un vantaggio ambientale sostanziale grazie all'impiego di un materiale rinnovabile, caratterizzato da basse emissioni incorporate e dalla capacità di sequestrare carbonio atmosferico.

Il confronto con la letteratura conferma tale tendenza. Numerosi studi hanno evidenziato come gli involucri ad elevata inerzia termica siano particolarmente efficaci nel ridurre i consumi energetici e migliorare il comfort nei climi mediterranei, soprattutto in presenza di adeguate strategie di ventilazione notturna e gestione dinamica degli impianti. Parallelamente, la crescente diffusione dei materiali bio-based ha dimostrato come prodotti naturali quali paglia, fibra di legno, canapa e cellulosa possano ridurre significativamente il carbonio incorporato mantenendo prestazioni termo-fisiche competitive. I risultati ottenuti nel presente lavoro si collocano pertanto nel punto di incontro tra questi due filoni di ricerca, mostrando che la soluzione ottimale non coincide necessariamente con la parete a maggiore massa, ma con quella capace di raggiungere il miglior equilibrio tra comportamento dinamico, efficienza energetica e impatto ambientale.

È opportuno evidenziare, infine, alcune limitazioni della valutazione ambientale effettuata. L'analisi LCA è stata sviluppata secondo un approccio cradle-to-gate e si basa sulle metodologie implementate nel software Ubakus, che stimano i consumi energetici della fase d'uso mediante un modello semplificato fondato prevalentemente sulla trasmittanza termica dell'involucro, in accordo con la UNI EN ISO 6946, assumendo inoltre condizioni standardizzate di guadagni interni, apporti solari e sistema impiantistico. Tale approccio non è quindi in grado di rappresentare il comportamento termico dinamico dell'involucro, trascurando gli effetti dell'inerzia termica, della posizione della massa, della capacità termica periodica interna, dell'attenuazione e dello sfasamento dell'onda termica, che nel presente lavoro hanno dimostrato di influenzare in maniera significativa sia i consumi energetici sia il comfort termico.

Un'ulteriore limitazione riguarda il perimetro della valutazione ambientale, che considera gli impatti della fase di produzione (A1–A3) e una stima semplificata della fase operativa (B6) basata sul fabbisogno di riscaldamento, senza includere le fasi di trasporto e costruzione (A4–A5), gli interventi di manutenzione e sostituzione (B2–B5), il fine vita (C1–C4) e gli

eventuali benefici derivanti dal recupero o riciclo dei materiali (Modulo D). Di conseguenza, i risultati ottenuti devono essere interpretati come un confronto preliminare tra le tre soluzioni costruttive piuttosto che come una valutazione completa del loro ciclo di vita.

In quest'ottica, un importante sviluppo futuro consiste nell'integrare i risultati delle simulazioni energetiche dinamiche con metodologie di Dynamic Life Cycle Assessment (Dynamic LCA). Tale approccio consentirebbe di sostituire le stime semplificate del fabbisogno energetico con i flussi termici realmente ottenuti dalle simulazioni dinamiche, includendo gli effetti dell'inerzia termica e delle diverse strategie di gestione impiantistica. Ciò permetterebbe di quantificare con maggiore accuratezza il contributo delle prestazioni dinamiche dell'involucro agli impatti ambientali complessivi e di valutare in maniera più rappresentativa il reale equilibrio tra energia operativa, energia incorporata e comfort nel corso dell'intera vita utile dell'edificio.

4.5 Confronto con la letteratura scientifica

I risultati ottenuti risultano ampiamente coerenti con la letteratura internazionale riguardante il comportamento dinamico degli involucri edilizi. Diversi studi hanno infatti evidenziato come l'inerzia termica rappresenti uno dei principali fattori in grado di migliorare le prestazioni energetiche e il comfort negli edifici ubicati in climi caratterizzati da elevate escursioni termiche giornaliere [31], [33].

In particolare, Asan (2006) ha dimostrato che la distribuzione della massa e la posizione dell'isolamento influenzano significativamente lo sfasamento e l'attenuazione dell'onda termica, con effetti diretti sulla riduzione delle oscillazioni della temperatura interna e del fabbisogno energetico [31]. Analogamente, gli studi sperimentali condotti da Evola e Marletta e, più recentemente, da Tribuiani et al. hanno evidenziato come l'elevata inerzia termica consenta soprattutto di attenuare i picchi termici e di migliorare la stabilità delle condizioni interne, in particolare nei climi mediterranei e in presenza di strategie di ventilazione notturna [32], [34]. I risultati ottenuti nel presente lavoro confermano pienamente tali evidenze, mostrando riduzioni dei picchi di potenza fino al 30–32% rispetto alla parete leggera, mentre le differenze nei consumi energetici annuali risultano più contenute.

Particolarmente significativa risulta la coerenza con gli studi di Stazi, che individuano nella capacità termica periodica interna (k_1) uno dei parametri più rappresentativi del comportamento dinamico dell'involucro, poiché sintetizza la reale capacità della struttura di accumulare e rilasciare energia termica nel corso del ciclo giornaliero [33]. I risultati della presente ricerca rafforzano tale interpretazione: la graduatoria delle prestazioni energetiche osservata nelle simulazioni coincide infatti con l'ordine dei valori di capacità termica periodica interna ($45.43 > 37.04 > 27.25 \text{ kJ/m}^2\text{K}$), mentre non emerge una correlazione altrettanto evidente né con la sola massa superficiale né con il solo valore dello sfasamento. Questo suggerisce che k_1 rappresenti un indicatore più efficace delle prestazioni dinamiche dell'involucro rispetto ai tradizionali parametri comunemente impiegati nella pratica progettuale.

Un ulteriore elemento di interesse riguarda proprio il ruolo dello sfasamento. Sebbene esso venga frequentemente utilizzato come principale indicatore delle prestazioni estive delle pareti, i risultati ottenuti dimostrano come tale parametro, se considerato isolatamente, non sia sufficiente a descrivere il comportamento dinamico dell'involucro. La parete massiva presenta infatti uno sfasamento reale superiore alle 31 ore, mentre la parete in paglia e quella leggera mostrano valori prossimi alle 7 ore; tuttavia, le differenze nei consumi energetici e nelle temperature operative risultano decisamente più contenute rispetto a quanto il solo sfasamento potrebbe far prevedere. Tale comportamento conferma quanto discusso in letteratura, ovvero che la risposta dinamica dell'involucro dipende dall'azione combinata di capacità termica periodica interna, fattore di attenuazione, distribuzione della massa e condizioni di esercizio, piuttosto che da un singolo parametro [31].

Anche il comportamento della parete in paglia risulta in accordo con le più recenti ricerche sui materiali bio-based. Diverse review hanno infatti evidenziato come materiali naturali quali paglia, canapa, fibra di legno e altre fibre vegetali siano in grado di garantire buone prestazioni termo-dinamiche pur mantenendo masse superficiali significativamente inferiori rispetto alle strutture massive tradizionali, grazie a valori elevati di capacità termica specifica e a favorevoli proprietà igrotermiche [35], [36]. I risultati ottenuti confermano tale tendenza, dimostrando che la parete in paglia riesce ad avvicinare le prestazioni energetiche e di comfort della soluzione massiva pur riducendo la massa superficiale di circa l'85%,

configurandosi come un efficace compromesso tra comportamento dinamico, efficienza energetica e sostenibilità ambientale.

4.6 Implicazioni progettuali

I risultati ottenuti evidenziano come la progettazione dell'involucro edilizio richieda un approccio prestazionale più ampio rispetto alla tradizionale verifica della sola trasmittanza termica. Le tre stratigrafie analizzate presentano infatti valori pressoché identici di trasmittanza termica (circa $0.19 \text{ W/m}^2\text{K}$), ma mostrano differenze significative in termini di consumi energetici, risposta dinamica, comfort termo-fisico e impatti ambientali. Ciò conferma che il rispetto dei requisiti prescrittivi relativi alla trasmittanza non è sufficiente a descrivere il comportamento reale dell'involucro e che la progettazione dovrebbe integrare anche parametri dinamici, quali la capacità termica periodica interna e il fattore di attenuazione.

Un secondo aspetto di particolare interesse riguarda il ruolo della massa termica. I risultati ottenuti dimostrano che la massa superficiale non costituisce, di per sé, un indicatore affidabile delle prestazioni dinamiche. La parete in paglia presenta infatti una massa superficiale complessiva di soli 65.4 kg/m^2 , pari a circa il 15% di quella della parete massiva, ma raggiunge una capacità termica periodica interna ($37.04 \text{ kJ/m}^2\text{K}$) significativamente superiore a quella della parete leggera ($27.25 \text{ kJ/m}^2\text{K}$) e relativamente prossima alla soluzione massiva ($45.43 \text{ kJ/m}^2\text{K}$). Questo risultato evidenzia come il comportamento dinamico dipenda non soltanto dalla quantità di massa presente, ma soprattutto dalla sua distribuzione all'interno della stratigrafia e dalle proprietà termofisiche dei materiali.

In questo contesto, assume particolare rilevanza la presenza dello strato interno in KARTONSAN, che rappresenta circa il 49% della massa superficiale complessiva della parete in paglia. Sebbene il pannello in paglia costituisca l'elemento principale responsabile dell'isolamento termico, è proprio lo strato interno più denso a fornire una significativa capacità di accumulo lato ambiente, contribuendo ad incrementare la capacità termica periodica interna e a stabilizzare la temperatura operativa. È quindi ragionevole affermare che le buone prestazioni dinamiche osservate non siano attribuibili esclusivamente al

materiale bio-based, ma alla progettazione della stratigrafia nel suo complesso, che combina un materiale altamente isolante con una massa opportunamente collocata sul lato interno.

Questa osservazione suggerisce un'importante indicazione progettuale. Nella progettazione di involucri bio-based, l'obiettivo non dovrebbe essere quello di incrementare indiscriminatamente la massa della parete, bensì di collocare una quota limitata di massa in posizione strategica, dove possa interagire direttamente con l'ambiente interno. L'accoppiamento tra uno strato isolante naturale e un rivestimento interno caratterizzato da elevata densità e capacità termica rappresenta quindi una soluzione efficace per migliorare il comportamento dinamico dell'involucro senza compromettere i vantaggi ambientali dei materiali bio-based.

Un ulteriore risultato emerso dalla ricerca riguarda la stretta relazione tra involucro edilizio e gestione impiantistica. Il confronto tra i profili Stay Home e Day Work ha evidenziato come l'efficacia dell'inerzia termica dipenda fortemente dalle modalità di funzionamento dell'impianto HVAC. In presenza di climatizzazione continua, il controllo attivo tende a ridurre le differenze tra le diverse stratigrafie in termini di temperatura operativa, mentre gli effetti della massa emergono principalmente attraverso la riduzione dei consumi energetici e dei picchi di potenza. Al contrario, con funzionamento intermittente e in presenza di ventilazione notturna, il comportamento dell'involucro assume un ruolo determinante nel limitare sia gli episodi di sottoriscaldamento sia quelli di surriscaldamento severo. Ne consegue che involucro e impianto dovrebbero essere progettati come un unico sistema integrato, nel quale le caratteristiche costruttive siano definite in funzione delle modalità di utilizzo dell'edificio.

Infine, la valutazione congiunta delle prestazioni energetiche, del comfort termico e degli impatti ambientali evidenzia che la scelta della soluzione costruttiva non può essere basata su un singolo indicatore. La parete massiva rappresenta la soluzione più performante dal punto di vista energetico e dinamico, mentre la parete in paglia emerge come il miglior compromesso complessivo, poiché riesce ad avvicinare le prestazioni della soluzione massiva mantenendo un impatto ambientale decisamente inferiore. Ciò conferma che la progettazione degli edifici a energia quasi zero dovrebbe adottare un approccio multi-obiettivo, nel quale prestazioni operative, comfort termico e sostenibilità ambientale vengano valutati congiuntamente lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio.

Nel complesso, il presente lavoro suggerisce che lo sviluppo di futuri involucri ad alte prestazioni non debba orientarsi esclusivamente verso l'incremento della massa o dello spessore dell'isolamento, ma verso una progettazione integrata della stratigrafia, nella quale materiali bio-based e strati massivi opportunamente distribuiti collaborino per massimizzare contemporaneamente efficienza energetica, comfort interno e sostenibilità ambientale.

5. Conclusioni

Il presente lavoro ha analizzato il comportamento energetico, termo-fisico e ambientale di tre differenti tecnologie costruttive caratterizzate dalla medesima trasmittanza termica, con l'obiettivo di valutare il ruolo delle proprietà dinamiche dell'involucro nella progettazione di edifici ad elevate prestazioni energetiche. I principali risultati ottenuti possono essere sintetizzati nei seguenti punti.

1. La trasmittanza termica non è sufficiente a descrivere il comportamento reale dell'involucro.

Le simulazioni hanno evidenziato che pareti caratterizzate dallo stesso valore di trasmittanza possono presentare differenze significative in termini di consumi energetici, potenze di picco, distribuzione delle temperature operative e comfort termico. Ciò conferma che la valutazione delle prestazioni dell'involucro non può essere limitata ai soli parametri stazionari.

2. La capacità termica periodica interna emerge come il parametro maggiormente rappresentativo del comportamento dinamico.

Tra i parametri analizzati, la capacità termica periodica interna (k_i) è risultata quella più strettamente correlata alle prestazioni energetiche e di comfort osservate nelle simulazioni. Al contrario, né la massa superficiale né il solo sfasamento dell'onda termica sono risultati sufficienti a descrivere il comportamento dell'involucro quando considerati singolarmente.

3. L'efficacia dell'inerzia termica dipende anche dalle modalità di gestione dell'edificio.

Il confronto tra i profili di utilizzo ha mostrato che, con funzionamento continuo dell'impianto HVAC, gli effetti dell'inerzia termica risultano in parte attenuati dal controllo attivo della climatizzazione. Viceversa, nel funzionamento intermittente e in presenza di ventilazione notturna, il comportamento dinamico dell'involucro assume un ruolo determinante nel ridurre le oscillazioni della temperatura operativa, limitando sia gli episodi di sottoriscaldamento sia quelli di surriscaldamento severo.

4. Le prestazioni della parete bio-based dipendono dalla progettazione dell'intera stratigrafia.

Uno dei risultati più significativi della ricerca riguarda la parete in paglia, che, pur presentando una massa superficiale circa l'85% inferiore rispetto alla parete massiva,

raggiunge una capacità termica periodica interna inferiore di appena il 18%. Tale comportamento evidenzia che le elevate prestazioni dinamiche non sono attribuibili esclusivamente al materiale isolante naturale, ma derivano dalla combinazione tra lo strato isolante in paglia e la presenza di uno strato interno massivo in KARTONSAN, capace di incrementare la massa termicamente attiva sul lato ambiente.

5. La scelta della soluzione costruttiva dipende dagli obiettivi progettuali.

La parete massiva rappresenta la soluzione più performante dal punto di vista energetico, garantendo i minori consumi, la maggiore riduzione dei picchi di potenza e la migliore stabilità delle temperature operative. La parete in paglia costituisce invece il miglior compromesso tra efficienza energetica, comfort termo-fisico e sostenibilità ambientale, grazie ai ridotti impatti associati alla produzione dei materiali e al contributo del carbonio biogenico.

6. Implicazioni per la progettazione.

I risultati ottenuti suggeriscono la necessità di superare un approccio progettuale basato esclusivamente sulla trasmittanza termica, orientandosi verso metodologie che integrino indicatori dinamici, quali la capacità termica periodica interna, con valutazioni energetiche, di comfort e di sostenibilità ambientale. In particolare, i risultati mostrano come l'integrazione di materiali bio-based con opportuni strati interni ad elevata capacità di accumulo possa rappresentare una strategia efficace per sviluppare involucri edilizi ad alte prestazioni.

7. Sviluppi futuri.

Le attività future riguarderanno la validazione sperimentale delle configurazioni analizzate, l'estensione dello studio a differenti contesti climatici e tipologie edilizie e l'integrazione delle simulazioni energetiche dinamiche con metodologie di Dynamic Life Cycle Assessment, al fine di valutare gli impatti ambientali utilizzando i reali fabbisogni energetici dell'edificio. Ulteriori sviluppi potranno inoltre approfondire l'ottimizzazione della distribuzione della massa interna negli involucri bio-based, individuando configurazioni in grado di massimizzare contemporaneamente prestazioni energetiche, comfort e sostenibilità ambientale.

In conclusione, il principale contributo della presente ricerca consiste nell'aver dimostrato che il comportamento dinamico dell'involucro è governato principalmente dalla capacità termica periodica interna e dalla distribuzione della massa all'interno della stratigrafia, piuttosto che dalla sola massa superficiale o dal solo valore della trasmittanza termica. Tale risultato evidenzia come una progettazione integrata dell'involucro, basata sulla combinazione di materiali bio-based e di una massa interna opportunamente distribuita, possa rappresentare una strategia efficace per coniugare efficienza energetica, comfort termo-fisico e sostenibilità ambientale.

Categoria	Aspetto analizzato [u.m.]	Parete massiva (M)	Parete in paglia (P)	Parete leggera (L)	Principale evidenza
Proprietà termofisiche	Trasmittanza termica, U [W/m ² K]	0.192	0.192	0.191	Prestazioni stazionarie equivalenti.
	Massa superficiale [kg/m ²]	445.5	65.4 (-85%)	79.6 (-82%)	La massa superficiale non descrive da sola il comportamento dinamico.
	Capacità termica periodica interna, k_1 [kJ/m ² K]	45.43	37.04 (-18%)	27.25 (-40%)	Parametro maggiormente correlato alle prestazioni dinamiche.
	Fattore di attenuazione, f_a [-]	0.004	0.621	0.704	La parete massiva attenua quasi completamente l'onda termica incidente.
	Sfasamento reale [h]	31 h 05 min	7 h 06 min	6 h 39 min	Il valore di 7 h restituito da alcuni software corrisponde allo sfasamento modulo 24 h.
Prestazioni energetiche	Fabbisogno energetico – Stay Home [%]	Minore	Intermedio	Maggiore	-9% rispetto alla parete leggera e -5% rispetto alla parete in paglia.
	Fabbisogno energetico – Day Work [%]	Generalmente minore	Intermedio	Generalmente maggiore	Le differenze si riducono con il funzionamento intermittente dell'impianto.

Comfort termico	Picchi di potenza HVAC [%]	Minori	Intermedi	Maggiori	Riduzione fino al 30–32% dei picchi di raffrescamento rispetto alla parete leggera.
	Temperatura operativa massima [°C]	Più bassa	Intermedia	Più elevata	Differenze fino a circa 4°C nel profilo Day Work.
	Temperatura operativa minima [°C]	Più elevata	Intermedia	Più bassa	Oscillazioni termiche giornaliere ridotte.
	Ore di surriscaldamento (>26°C) [h]	Simili alle altre soluzioni	Intermedie	Simili alla massiva	Il numero totale di ore >26°C non rappresenta da solo il comfort estivo.
	Distribuzione delle temperature operative [-]	Maggiore permanenza nelle classi intermedie; minori eventi estremi	Comportamento intermedio	Distribuzione più dispersa	La parete massiva riduce il sottoriscaldamento e gli episodi di surriscaldamento severo (>30°C).
	Ventilazione notturna [-]	Massimo beneficio	Beneficio elevato	Beneficio limitato	Il raffrescamento notturno rigenera la capacità di accumulo della massa termica.
Sostenibilità ambientale	Global Warming Potential (GWP) [kg CO ₂ eq]	Maggiore	Minore	Intermedio	La paglia beneficia dell'immagazzinamento di carbonio biogenico.
	Energia primaria incorporata [MJ/m ²]	Maggiore	Minore	Intermedia	La produzione dei materiali bio-based richiede meno energia.
Valutazione complessiva	Sintesi delle prestazioni [-]	Migliori prestazioni termo-energetiche	Miglior compromesso tra energia, comfort e sostenibilità	Prestazioni complessivamente inferiori	La scelta ottimale dipende dagli obiettivi energetici e ambientali del progetto.

Tabella 48 Sintesi finale e confronto fra le tre diverse pareti

Riferimenti bibliografici

1. European Parliament and Council of the European Union, *Directive (EU) 2024/1275 on the Energy Performance of Buildings (Recast)*, Official Journal of the European Union, Brussels, Belgium, 2024.
2. International Energy Agency (IEA), *Buildings Global Status Report 2024*, Paris, France: IEA Publications, 2024.
3. United Nations Environment Programme (UNEP), *Global Status Report for Buildings and Construction 2024*, Nairobi, Kenya: UNEP, 2024.
4. S. Verbeke and A. Audenaert, “Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2300–2318, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.083.
5. F. Stazi, *Thermal Inertia in Energy Efficient Building Envelope*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2017.
6. C. Tribuiani, F. Stazi, M. Bassani and A. Tomassoni, “Thermal Performance of a Massive Wall in the Mediterranean Climate: Experimental and Analytical Research,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 13, Art. no. 4611, 2020, doi: 10.3390/app10134611.
7. Y. Cascone, G. Evola and L. Marletta, “Thermal performance of lightweight and massive building envelopes in cooling-dominated climates,” *Energy and Buildings*, vol. 203, Art. no. 109454, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109454.
8. L. F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez and A. Castell, “Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 394–416, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.037.
9. D. Yan, T. Hong, B. Dong, A. Mahdavi, S. D’Oca, I. Gaetani and X. Feng, “IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 156, pp. 258–270, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.08.084.
10. D. Mitra, M. Rabl and M. Fels, “Typical occupancy profiles and behaviors in residential buildings in the United States,” *Energy and Buildings*, vol. 235, Art. no. 110695, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110695.

11. R. Rugani et al., “Impact of occupancy profiles on dynamic building energy simulation results,” *Energy and Buildings*, vol. 314, Art. no. 114114, 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114114.
12. A. Asdrubali, F. D’Alessandro and S. Schiavoni, “A review of unconventional sustainable building insulation materials,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 4, pp. 1–17, 2015, doi: 10.1016/j.susmat.2015.05.002.
13. F. Pomponi and A. Moncaster, “Scrutinising embodied carbon in buildings: The next performance gap made manifest,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2431–2442, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.049.
14. T. Ashour, H. Georg and F. Wu, “Performance of straw bale wall: A case of study,” *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 8, pp. 1960–1967, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.04.001.
15. G. Tlaji, A. Kraniotis and K. Kassab, “A Mini-Review on Straw Bale Construction as a Sustainable Building Material,” *Energies*, vol. 15, no. 21, Art. no. 7859, 2022, doi: 10.3390/en15217859.
16. Y. Zhou, Y. Li, X. Wang and Y. Zhang, “A review on thermal performance of straw-based building materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 344, Art. no. 128142, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128142.
17. R. Vaňová, J. Vejmelková and R. Černý, “Life Cycle Impact Assessment of Load-Bearing Straw Bale Residential Building,” *Materials*, vol. 14, no. 11, Art. no. 3064, 2021, doi: 10.3390/ma14113064.
18. H. Li, Y. Chen, X. Zhang and J. Wu, “Assessing the embodied carbon reduction potential of straw bale rural houses by hybrid life cycle assessment,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 301, Art. no. 126979, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126979.
19. UNI EN ISO 52016-1:2018, *Prestazione energetica degli edifici – Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti – Parte 1: Procedure di calcolo*.
20. ASHRAE, *ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2014.

21. ISO 14040:2006, *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
22. ISO 14044:2006, *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
23. Yan D., Hong T., Dong B., Mahdavi A., D'Oca S., Gaetani I., Feng X. (2017). *IEA EBC Annex 66: Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings*. Energy and Buildings, 156, 258–270.
24. De Simone M., Fabi V., Corgnati S.P. et al. (2018). *Reference Procedures for Obtaining Occupancy Profiles in Residential Buildings*. IEA EBC Annex 66.
25. Mitra D., Rabl A., Fels M. (2020). *Typical Occupancy Profiles and Behaviors in Residential Buildings in the United States*.
26. Palladino D., Nardi I., Buratti C. (2021). *Energy and Environmental Effects of Human Habits in Residential Buildings Due to COVID-19 Outbreak Scenarios in a Dwelling near Rome*. Energies, 14(21), 7408.
27. Rugani R. et al. (2024). *Occupancy Profile Impact on Building Energy Simulation Results*. Energy and Buildings.
28. UNI EN ISO 52016-1:2018. *Prestazione energetica degli edifici – Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti*.
29. E. Solgi, Z. Hamedani, R. Fernando, H. Skates, N.E. Orji, A literature review of night ventilation strategies in buildings, Energy Build. 173 (2018) 337–352. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.052>.
30. T.S. Larsen, C. Plesner, V. Leprince, F.R. Carrié, A.K. Bejder, Calculation methods for single-sided natural ventilation: Now and ahead, Energy Build. 177 (2018) 279–289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.047>.
31. Asan, H. (2006). *Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor*. Energy and Buildings, 38(4), 354–362.
32. Evola, G., Marletta, L., Natarajan, S., & Patanè, E. M. (2017). *Thermal inertia of heavyweight traditional buildings: experimental measurements and simulated scenarios*. Energy Procedia, 133, 42–52.

33. Stazi, F. (2021). *Thermal Inertia in Energy Efficient Building Envelopes*. Elsevier.
34. Tribuiani, C., D'Orazio, M., Di Perna, C., & Stazi, F. (2020). *Thermal Performance of a Massive Wall in the Mediterranean Climate: Experimental and Analytical Research*. Applied Sciences, 10, 4611.
35. Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). *A review of unconventional sustainable building insulation materials*. Sustainable Materials and Technologies, 4, 1–17.
36. Palumbo, M., Lacasta, A. M., Giraldo, M. P., Haurie, L., & Correal, E. (2016). *Bio-based insulation materials and their hygrothermal performance: A review*. Building and Environment.
37. Ubakus <https://www.ubakus.de/en/u-wert-rechner/>
38. S. Summa, G. Remia, C. Di Perna, F. Stazi, Experimental and numerical study on a new thermal masonry block by comparison with traditional walls, Energy and Buildings, Volume 292, 2023, 113125, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113125>.