

ARTICLE INFO

Received 15 September 2025
Revised 21 October 2025
Accepted 22 October 2025
Published 30 December 2025

MURO TROMBE E LABIRINTO TERMICO

Strategie bioclimatiche per il clima mediterraneo

TROMBE WALL AND THERMAL LABYRINTH

Bioclimatic strategies for the Mediterranean climate

Fabrizio Tucci, Kristina Mitrik, Lavinia Montagner

ABSTRACT

La ricerca indaga l'integrazione di Trombe Wall System (TWS) e Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) come strategie bioclimatiche per i climi mediterranei. Lo studio unisce analisi teorica, casi studio, indagini di mercato e database di componenti con Analisi Multicriteriale e simulazioni parametriche. I risultati confermano la presenza sul mercato di elementi, componenti e materiali, idonei all'integrazione dei due sistemi ed evidenziano come un TWS con massa termica di 20 cm riduca i fabbisogni di riscaldamento fino al 50%, mentre il TLVS garantisce un raffrescamento di 6-8 °C in quanto le superfici sagomate incrementano del 15% lo scambio termico e l'omogeneità dei flussi. La ricerca ha dimostrato che l'integrazione dei due sistemi produce benefici sinergici in termini di risparmio energetico e comfort indoor, offrendo al contempo linee guida replicabili.

The research investigates the integration of the Trombe Wall System (TWS) and the Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) as bioclimatic strategies for Mediterranean climates. The study combines theoretical analysis, case studies, market research, and a component database with multi-criteria Analysis and parametric simulations. The results confirm the availability on the market of elements, components, and materials suitable for integrating the two systems, and highlight that a TWS with a 20 cm thermal mass can reduce heating demand by up to 50%. At the same time, the TLVS ensures a cooling of 6-8 °C, with shaped surfaces that increase heat exchange and flow uniformity by 15%. The research has demonstrated that integrating the two systems yields synergistic benefits in energy savings and indoor comfort, while also providing replicable guidelines.

KEYWORDS

sistemi bioclimatici, analisi decisionale multicriteriale, soluzioni standardizzate, efficienza energetica, simulazione energetica

bioclimatic systems, multi-criteria decision analysis, standardised solutions, energy efficiency, energy simulation

Fabrizio Tucci, Architect and PhD, is a Full Professor of Environmental Design at the 'Sapienza' University of Rome (Italy), where he is Scientific Director of the PNRR Flagship Project 2 'Energy and Digital Transition' of the Rome Technopole. Former Director of the PDTA Department, since October 2024, he has served as Director of the Environmental Design and Design Quality Area and Coordinator of the Design Quality Committee at the State Property Agency. For 30 years, he has been the Scientific Director of national and international projects and research focused on the quality of the project and environmental design, on the relationship between design and technological innovation, and on environmental and social sustainability in the processes of architectural and urban regeneration. E-mail: fabrizio.tucci@uniroma1.it

Kristina Mitrik, Architect, is a PhD Candidate in Environmental Technological Design at the PDTA Department, 'Sapienza' University of Rome (Italy). Her research focuses on passive systems and sustainable strategies within the framework of the Rome Technopole project, funded by the Italian NRRP. E-mail: kristina.mitrik@uniroma1.it

Lavinia Montagner, Architect, is a PhD Candidate in Environmental Technological Design at the PDTA Department, 'Sapienza' University of Rome (Italy). Her research focuses on bioclimatic envelope systems for tertiary buildings in Mediterranean climates, within the Rome Technopole project. E-mail: lavinia.montagner@uniroma1.it



Il settore edilizio rappresenta uno dei principali responsabili del consumo energetico e delle emissioni climateranti a livello globale, contribuendo al 40% del consumo finale di energia nell'Unione Europea, di cui il 27% da edifici non-residenziali, e al 36% delle emissioni di gas a effetto serra (IEA, 2023; European Parliament and Council of the European Union, 2024). Questi dati confermano il ruolo strategico del settore edilizio nella transizione energetica da non considerare mai come svincolata dal più ampio obiettivo della transizione ecologica e climatica (Tucci, 2018). L'Unione Europea ha infatti fissato obiettivi vincolanti di riduzione delle emissioni nette del 55% (European Commission, 2021) entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, con il traguardo della neutralità climatica entro il 2050 (European Parliament and Council of the European Union, 2021). Parallelamente l'IPCC individua nel settore edilizio un ambito chiave di mitigazione, dove interventi sull'involucro e sui servizi energetici risultano fondamentali per la decarbonizzazione e per limitare l'aumento della temperatura globale entro 1,5 °C (Cabeza et alii, 2023).

La domanda di raffrescamento negli edifici è in rapida crescita e si prevede possa triplicare entro il 2050, spinta dall'aumento delle temperature e dallo sviluppo socio-economico (IEA, 2018). I sistemi di climatizzazione e ventilazione rappresentano circa il 20% dei consumi elettrici globali del settore edilizio e nel 2022 hanno assorbito circa 2.100 TWh, confermandosi tra gli usi finali più energivori e in rapida diffusione (Ritchie, 2024). Ciò porterà le emissioni derivanti dal raffrescamento a salire a 6,1 miliardi di CO_{2eq} nel 2050, pari a oltre il 10% delle emissioni globali previste per quell'anno (UNEP, 2023).

Al contempo non va sottovalutata la quota dei consumi energetici per il riscaldamento: a livello globale, quasi la metà del fabbisogno energetico complessivo è assorbita da riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria, con una copertura da combustibili fossili¹ che supera il 60%.

In Europa il comparto non residenziale riveste un ruolo rilevante, pari al 22% del totale (Volkova, 2024), includendo edifici con diverse destinazioni d'uso e rappresentando il 30% della superficie edilizia e il 34% della domanda finale di energia per riscaldamento (der Wieden et alii, 2023), con valori medi pari a 161 kWh/m² per anno (Di Turi, Ronchetti and Sannino, 2023).

In Italia il patrimonio edilizio è composto da circa 14 milioni di edifici, di cui circa 1,7 milioni adibiti a uso non residenziale, pari a circa il 12% del totale (Caffari et alii, 2024); per il solo settore terziario i dati riportano un consumo medio di circa 197 kWh/m² per anno, di cui 130 imputabili al fabbisogno termico e 67 a quello elettrico (Ministero della Transizione Ecologica, 2021).

La necessità di intervenire sul Patrimonio edilizio è confermata dal quadro normativo europeo e nazionale. A livello sovranazionale, la Direttiva (UE) 2024/1275 sulla prestazione energetica nell'edilizia (European Parliament and Council of the European Union, 2024) ha introdotto obiettivi vincolanti: a partire dal 2028 tutti i nuovi edifici pubblici dovranno essere a emissioni zero, mentre dal 2030 il requisito si estenderà a tutte le nuove costruzioni. Accanto alle direttive europee standard internazionali come la UNI EN ISO 13790:2008 e la UNI EN ISO 15265:2005, che definiscono metodologie di calcolo per i consumi energetici legati al riscaldamento e al raffrescamento, la UNI EN 16798-1:2019 definisce i pa-

rametri relativi alla ventilazione degli ambienti interni, la qualità dell'aria delle condizioni termo-igrometriche, dell'illuminazione e dell'acustica, mentre la normativa italiana stabilisce parametri climatici, requisiti prestazionali e limiti di trasmittanza per gli edifici (Ministro dello Sviluppo Economico, 2015).

Alla luce di tali premesse il presente contributo intende analizzare le potenzialità di integrazione del Trombe Wall System (TWS) e del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS), al fine di migliorare l'efficienza energetica degli edifici non residenziali in clima mediterraneo. L'obiettivo è valutare le prestazioni termo-energetiche e ambientali di tali sistemi, evidenziandone il contributo alla riduzione dei consumi e delle emissioni. Il lavoro si articola in una rassegna e sistematizzazione, dettata dalla UNI 8289: 1981, delle principali componenti tecnologiche e materiche, classificate secondo la UNI 8290-1:1981+A122:1983; nello svolgimento di attività simulativo-energetiche per l'ottimizzazione delle due tecnologie e nella discussione dei risultati ottenuti. Il contributo mira a fornire una metodologia valutativo-comparativa e strumenti simulativi utili alla comunità scientifica e ai progettisti, promuovendo l'integrazione e l'ottimizzazione di sistemi per la transizione energetica del costruito.

Approccio e obiettivi della ricerca | In questo contesto si colloca il progetto della nuova sede del Rome Technopole, connotato quale progetto pilota nell'ambito della più ampia operazione di rigenerazione urbana dell'area di Pietralata oggetto della ricerca su scala nazionale, finanziata dal PNRR 'Energy transition and digital transition in urban regeneration and construction'² (Rome Technopole, 2024). Il progetto pilota, frutto di ricerca applicata avanzata, presenta un edificio a energia zero e a emissioni zero che si offre da un lato come esempio sperimentale delle potenzialità rivestite da un'integrazione – fondata scientificamente su simulazioni e modellazioni dei risultati attesi – di tecnologie innovative a bassa impronta carbonica, ecologica ed energetica, dall'altro come modello di buona pratica per il settore terziario.

La valenza della ricerca e della sua applicazione progettuale di tipo sperimentale e dimostrativo risiede nell'integrazione sinergica di sistemi passivi, da sempre utilizzati per il controllo del microclima e per affrontare le condizioni climatiche estreme attraverso la replicazione di meccanismi naturali (Buono, 1998; Tucci, 2009; Ferrucci and Peron, 2018; Grosjean et alii, 2025), in linea con la necessità di ridurre consumi ed emissioni per contrastare i cambiamenti climatici e la dipendenza energetica (Simões, Manaia and Simões, 2021; Mo et alii, 2024).

Tra i sistemi bioclimatici passivi il TWS è capace di accumulare calore solare in facciata e di rilasciarlo gradualmente, risultando efficace durante il periodo invernale nei climi mediterranei, grazie all'elevata disponibilità solare, per comfort e riduzione delle emissioni (Simões, Manaia and Simões, 2021; Tucci, 2021; Briga-Sá et alii, 2021; Matos, Delgado and Guimarães, 2022; Hernandez-Perez et alii, 2025). Il TLVS sfrutta invece la massa del calcestruzzo ipogeo e la temperatura costante del terreno per trattare l'aria di ventilazione, con effetti di raffrescamento estivo, ma anche di riscaldamento invernale (Marmion et alii, 2012; Song, Song and Lim, 2014; Annan and Nehme, 2016; Rim, Sung and Kim, 2018; Tucci, 2020a; Mihalakakou et alii, 2022).

Obiettivo principale è dimostrare la validità e le potenzialità dell'adozione di TWS e TLVS in edifici

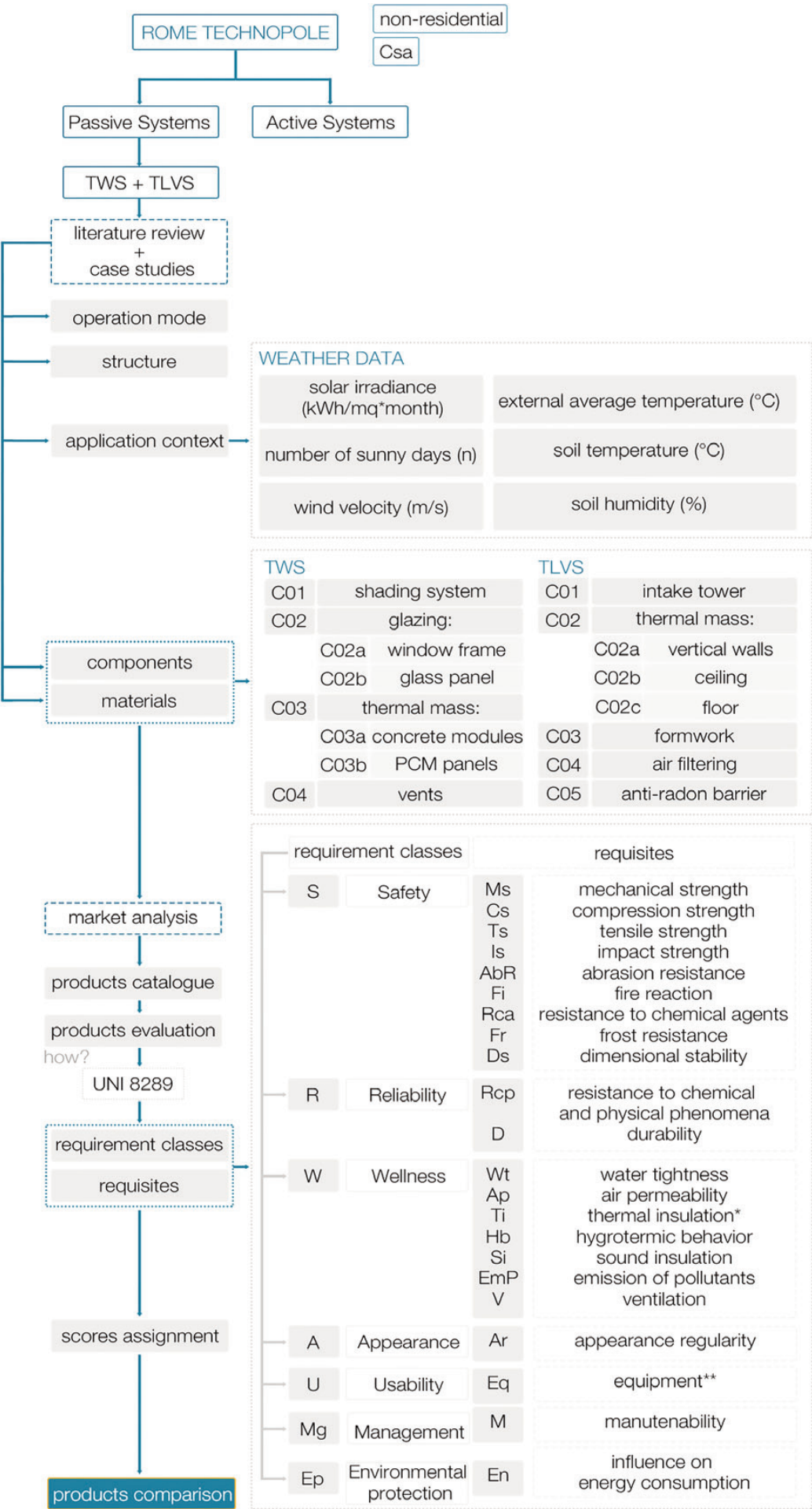
non residenziali nel clima mediterraneo, fornendo un riferimento e una linea guida sia a livello pratico, volta alla standardizzazione e diffusione su larga scala dei due sistemi, che teorico, dimostrandone l'efficienza e impostando un metodo per il loro processo di ottimizzazione, tramite l'uso delle simulazioni energetiche.

Contributo agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs) | L'ottimizzazione e la validazione di sistemi bioclimatici mira a incentivare la loro diffusione, al fine di aumentare l'indipendenza dalle fonti energetiche tradizionali (SDG 7) e promuovere l'adozione di tecnologie non impattanti (SDG 13). La loro diffusione su larga scala comporterebbe la creazione di settori innovativi all'interno dell'industria (SDG 9) e nuovi posti di lavoro (SDG 2, 8), che necessitano però di politiche di incentivazione adeguate per evitare eventuali compromessi dovuti a costi iniziali, sperimentazioni e investimenti (SDG 1, 10).

Nello specifico l'uso di TWS e TLVS può contribuire al miglioramento delle condizioni termo-igrometriche e della qualità dell'aria interna (SDG 3) e alla resilienza e mitigazione delle isole di calore (SDG 11); inoltre promuove parità di accesso e inclusione professionale nei programmi di ricerca e formazione grazie a corsi e seminari organizzati dall'associazione Rome Technopole (SDG 4, 5), incoraggiando pratiche di produzione e consumo responsabili (SDG 12) e il rispetto degli ecosistemi terrestri e marini grazie alla riduzione delle pressioni ambientali (SDG 6, 14, 15). Infine il progetto si fonda su reti di collaborazione tra Enti di ricerca, Istituzioni e industria (SDG 16, 17), rafforzando partenariati e governance per una transizione ecologica equa e condivisa.

Trombe Wall System: storia, funzionamento e letteratura | Il TWS, brevettato da Morse nel 1881 e applicato a Odeillo da Trombe e Michel per la prima volta nel 1967, sfrutta i principi dell'effetto camino solare e del trasferimento di calore, secondo una modalità – basata su processi totalmente naturali – che vede la radiazione incidente prima assorbita dalla parete massiva e accumulata grazie alla capacità termica, dopo trasferita all'interno dell'ambiente confinato per convezione e irraggiamento. In inverno funziona come accumulatore e barriera isolante, mentre in estate limita i guadagni termici e contribuisce al raffrescamento; le configurazioni variano in base al clima e alla latitudine (Hu et alii, 2017; Tucci, 2020b; Wang et alii, 2020; El-said et alii, 2023; Gu et alii, 2023; Somek et alii, 2023; Xiao et alii, 2024).

Diversi studi hanno valutato come le singole componenti influenzino le prestazioni dei TWS in funzione del clima, ad esempio il tipo di vetro (Pourghorban and Asoodeh, 2022) – quello doppio può ridurre i consumi di energia primaria fino al 40% (Somek et alii, 2023) – lo spessore e il materiale della massa termica, le dimensioni e il posizionamento e la gestione delle bocchette di ventilazione (Briga-Sá et alii, 2021). Oltre una certa soglia aumentare lo spessore della parete non porta benefici energetici ed è poco conveniente (Abbassi, Naili and Dehmani, 2022), mentre l'adozione di sistemi di ombreggiamento riduce la dispersione di calore durante le ore notturne e limita il rischio di surriscaldamento in quelle diurne (Briga-Sá et alii, 2017); anche il rapporto tra superficie del TWS e facciata risulta determinante (A'-zamovich, 2022). La letteratura esamina inoltre le interazioni tra componenti e le strategie operative



* Thermal insulation is defined by four main indicators: thermal transmittance, thermal conductivity, density, and specific heat capacity
** Equipment is defined by three main indicators: workability, dimensions, and weight

Fig. 1 | Workflow for identifying TWS and TLVS components and product analysis (credit: the Authors, 2025).

Next page

Fig. 2 | Blue Ridge Parkway Destination Centre (2007) in Asheville (North Carolina, USA), designed by Lord Aeck Sargent Architects (source: timelessmoon.getarchive.net, 2008).

Fig. 3 | Oregon Health and Science University Centre for Health and Healing (2006) in Portland (Oregon, USA), designed by GBD Architects (source: hpb magazine.org, 2009).

Fig. 4 | The Recreation and Wellness Centre – RAW (2011) in San Francisco (California, USA), designed by LPA Design Studios (source: lpadesignstudios.com, 2025).

ottimali, ad esempio tra bocchette e materiale della massa termica (Asdaghi and Fayaz, 2023): ridurre la sezione delle bocchette attenua le oscillazioni termiche interne e aumenta la differenza di temperatura con l'esterno (Laribi et alii, 2025). Tra le principali innovazioni del sistema vi è l'impiego di materiali a cambiamento di fase, che consente di ridurre spessore e peso del sistema, migliorarne le prestazioni energetiche e incrementare il comfort indoor (Leang et alii, 2020; Samiev and Halimov, 2022; El-said et alii, 2023; Zhou et alii, 2024; Zhang et alii, 2025). L'applicazione dei TWS in edifici multipiano non residenziali risulta invece ancora poco esplorata (Gu et alii, 2023; Abdelsamea et alii, 2025). Tra le diverse configurazioni, il TWS composito, caratterizzato da vetratura singola o doppia, intercapedine d'aria, massa termica e aperture di ventilazione, risulta quella più studiata e diffusa nei climi mediterranei (Briga-Sá et alii, 2021; Abbassi, Naili and Dehmani, 2022; Hernandez-Perez et alii, 2025).

Thermal Labyrinth Ventilation System: storia, funzionamento, letteratura

Le tecniche di raffrescamento ipogeo costituiscono una delle forme più antiche di climatizzazione passiva. Esempi storici di questo principio si ritrovano nei 'qanat' persiani³ (Montero-Gutiérrez et alii, 2025) equiparabili a quelli dei moderni labirinti termici, dove l'aria calda veniva incanalata in gallerie sotterranee ventilate da torri del vento ('badghir' in persiano, 'barjeel' in arabo; Hejazi and Hejazi, 2013), per poi essere convogliata verso le abitazioni dopo essersi raffreddata grazie all'umidità del terreno (Lechner, 2008; Ghandi and Leone, 2024). Le abitazioni vernacolari dell'Italia meridionale, come nel Borgo della Corricella a Procida o nel Centro Storico di Forio d'Ischia, mostrano come l'uso del tufo, i vani ipogei e i condotti d'aria scavati nella roccia abbiano garantito fin dall'antichità, e nel corso dei secoli, condizioni di comfort anche nei mesi più caldi (Buono, 1998).

In questi casi il raffrescamento non è solo frutto della massa termica ma anche di una strategia urbana più ampia, in cui il posizionamento degli edifici e la ventilazione canalizzata svolgono un ruolo chiave nel controllo microclimatico (Bori, 2006). Givoni (1994), seppur con un approccio pionieristico, aveva già sottolineato come gli edifici ipogei, per la loro configurazione morfologica e il contatto con il terreno, potessero offrire una risposta efficace al calore estivo, soprattutto se combinati con tecniche come la ventilazione notturna e il raffrescamento evaporativo indiretto.

Dispositivi moderni come i labirinti termici e i tubi interrati sono evoluzioni dirette di queste solu-



zioni antiche, da cui riprendono lo stesso principio di funzionamento, ma con maggiore attenzione alla scelta di materiali ad alta capacità termica e agli elementi necessari per la loro realizzazione. Numerosi studi recenti dimostrano come questi sistemi possano ridurre la temperatura dell'aria anche di 6-8 °C rispetto all'esterno, migliorando significativamente l'efficienza energetica degli edifici (Marmion et alii, 2012; Song, Song and Lim, 2014; Annan and Nehme, 2016; Xiong et alii, 2019).

L'originalità della ricerca risiede nello sviluppo di un metodo integrato di analisi e simulazione, volto alla sistematizzazione e alla valutazione dei componenti impiegati nei sistemi bioclimatici di riferimento. L'algoritmo proposto consente di modellare e confrontare le prestazioni termo-energetiche di TWS e TLVS in condizioni climatiche mediterranee, ancora poco indagate, definendo criteri di adattabilità per edifici non residenziali multipiano. I risultati offrono

nuove evidenze a supporto della ricerca applicata e della progettazione di soluzioni passive a basso impatto ambientale.

Metodologia e fasi della ricerca | Lo studio sviluppa una raccolta di componenti per la realizzazione dei sistemi di TWS e di TLVS, insieme a un metodo di valutazione per confrontare le opzioni disponibili sul mercato e un flusso di lavoro per la modellazione parametrica e le simulazioni energetiche, finalizzato a individuare le configurazioni ottimali dei due sistemi in un impiego integrato. La metodologia sviluppata si articola in sei fasi strutturate come di seguito riportato.

La fase 1) 'Analisi teorica e contestuale' ha previsto revisione della letteratura scientifica, sperimentazioni e casi studio, specificando il tipo di clima secondo la classificazione Köppen-Geiger⁴, che coinvolgono i due sistemi, per comprenderne origini, svi-

luppi, caratteristiche costruttive e prestazionali. Sono state individuate le principali componenti tecnologiche, che sono poi state oggetto delle successive fasi di analisi comparativa, e i parametri climatici rilevanti, con attenzione al clima mediterraneo. Dallo studio emerge che il TWS è vantaggioso tra i 55° ed i 40° di latitudine, sebbene le prestazioni dipendano da radiazione solare e nuvolosità (Kostikov, Grinkrug and Yiqiang, 2020; Licholai et alii, 2021; Lohmann and Santos, 2020; Hernandez-Perez et alii, 2025), mentre per il TLVS risultano centrali temperatura e umidità del sottosuolo. Altri fattori, come temperatura massima esterna e velocità del vento, influiscono su entrambi, con particolare importanza per il TLVS in caso di ventilazione naturale o ibrida.

La fase 2) 'Indagine di mercato' si è basata sulla ricerca dei prodotti delle principali componenti tecnologiche e materiche, con l'obiettivo di valutarne disponibilità, prestazioni, scalabilità e possibilità di commercializzazione. In particolare per il TWS sono stati considerati sistemi di ombreggiamento, infissi e tipologie di vetro, pannelli in PCM, blocchi in calcestruzzo per la massa termica e bocchette di ventilazione. Mentre per il TLVS sono stati catalogati i prodotti relativi a torri di aspirazione, massa termica, matrice-forma, filtraggio dell'aria e barriera antiradon.

Nella fase 3) 'Costruzione di database tematici' i dati raccolti sono stati organizzati in due file Excel, uno per ciascun sistema, applicando un primo filtro sulla distanza dei siti di produzione per ridurre l'impatto del trasporto. In conformità alla norma UNI 8289:1981 sono state selezionate alcune classi di esigenze di interesse in funzione delle specifiche necessità dello studio: sicurezza (S), affidabilità (R), benessere (W), aspetto (A), fruibilità (U), gestione (Mg) e salvaguardia dell'ambiente (Ep) e, ciascuna delle quali comprende i diversi requisiti, determinati a loro volta dalla UNI 8290-1:1981+ A122:1983 (Fig. 1).

Nella fase 4) 'Analisi multicriteriale' classi e requisiti sono stati tradotti in criteri e parametri di valutazione con punteggio da 0 a 5 in funzione dell'efficacia sul comportamento del prodotto e del sistema. Per ciascun prodotto sono state elaborate schede di valutazione qualitative per il confronto tra alternative, individuando anche le componenti più idonee all'integrazione dei sistemi nel progetto pilota del Rome Technopole.

La fase 5) 'Simulazioni energetiche' ha previsto l'analisi di alcuni fattori individuati nelle fasi precedenti, da analizzare mediante un modello parametrico sviluppato in Grasshopper e simulato sia con Ladybug Tools⁵ (Honeybee e Butterfly) che con i motori EnergyPlus, OpenStudio (OS) e OpenFOAM. Per il TWS sono stati considerati lo spessore della camera d'aria tra vetro e muro massivo, lo spessore della massa termica, la posizione e modalità di funzionamento dei sistemi ombreggianti e la dimensione e la configurazione delle bocchette di ventilazione. Per il TLVS sono stati invece analizzati lo spessore e la forma della massa termica, la distanza tra le pareti e la velocità del flusso d'aria d'entrata.

Nella fase 6) 'Determinazione delle configurazioni ottimali' i risultati hanno consentito di definire le soluzioni più efficaci per l'applicazione dei due sistemi al progetto pilota del Rome Technopole.

TWS e TLVS: casi studio e buone pratiche internazionali | Sei buone pratiche internazionali sono state selezionate da una raccolta più ampia e in questo contributo vengono riportati i casi realizzati in climi analoghi a quello di riferimento, per comprendere

le possibili modalità di adozione e integrazione del sistema. Si tratta di progetti non residenziali multipiano o caratterizzati da ampi spazi e disponibilità di integrazione in facciata o possibilità di spazi ipogei, con caratteristiche analoghe a quelle dell'edificio Rome Technopole, nel quale verranno appunto integrati i sistemi oggetto di questo studio. Il TWS assume diverse conformazioni, accomunate dalla modularità degli elementi, che fanno dedurre una possibilità verso la standardizzazione del sistema.

Il Blue Ridge Parkway Destination Center (Asheville, NC, 2008; Cfa⁶) adotta un sistema di tredici pareti solari massive esposte a sud con una particolare conformazione 'a dente di sega' che consente di alternare i muri di accumulo all'ingresso della luce, il cui comportamento è stato studiato tramite un modello computazionale di fluidodinamica, riferimento utile per la validazione tramite attività simulate (Fig. 2). L'Oregon Health and Science University Center for Health and Healing (Portland, OR, 2006; Csb⁷) è un edificio multipiano che impiega un sistema su due livelli con doppi vetri e sistemi di riscaldamento di acqua e aria, una doppia funzionalità che potrebbe essere esplorata anche nel caso del Rome Technopole (Fig. 3). Infine il Recreation and Wellness Center (Hayward, CA, 2011; Csb) utilizza un sistema ventilato con un'estesa massa termica in cemento che ne caratterizza la facciata esposta a ovest, garantendo temperature costanti e confortevoli in ambienti molto ampi (Fig. 4).

Nei casi studio del TLVS la metodologia adottata combina revisione critica della letteratura e confron-

to comparativo delle prestazioni termo-energetiche, al fine di valutarne la trasferibilità e versatilità in diversi contesti architettonici e climatici.

Nella Great Hall del Kent College (Canterbury, UK, 2019; Cfb⁸) il TLVS si articola in cinque camere ipogee in calcestruzzo, una soluzione costruttiva semplice e a bassa manutenzione, che assicura ventilazione naturale e stabilità termica in un edificio caratterizzato da comfort in spazi ad alta densità d'uso, sebbene le prestazioni possano risentire dell'umidità del suolo o di escursioni termiche ridotte (Fig. 5).

Nell'Ewha Womans University Campus Complex (Seoul, Corea del Sud, 2008; Dwa⁹) il sistema assume la forma di un labirinto verticale scavato nel terreno e capace di ridurre fino a 7 °C la temperatura estiva e di preriscaldare l'aria in inverno di 10 °C. La scala urbana e l'integrazione paesaggistica lo rendono un riferimento emblematico per progetti complessi, assimilabile per concezione al Rome Technopole nell'area di Pietralata (Fig. 6). La sua forza risiede nella capacità di regolare il microclima e di mantenere elevati livelli di comfort con consumi ridotti, mentre le criticità principali riguardano la complessità realizzativa e i costi di manutenzione legati alla grande scala dell'intervento.

Nel Big Data Institute (Oxford, UK, 2017; Cfb) si propone una declinazione tecnologicamente evoluta del sistema, integrando il labirinto di 600 metri quadri con cogenerazione e fotovoltaico. Le simulazioni di fluidodinamica computazionale (CFD) hanno permesso di ottimizzare i flussi e il bilancio termico, dimostrando da un lato che l'unione di strategie passive e attive richiede un elevato livello di con-

trollo e gestione, dall'altro che è possibile trasferire il TLVS anche a edifici di ricerca e direzionali, in contesti caratterizzati da forte innovazione tecnologica (Fig. 7).

Nel complesso questi esempi mostrano come il sistema TLVS possa declinarsi tanto come dispositivo naturale e architettonico (nel caso di edifici con forte componente paesaggistica tramite interramento e integrazione con il contesto) quanto come componente tecnologicamente avanzata (se integrato con altre strategie passive, sistemi impiantistici di alta efficienza, simulazioni CFD ottimizzate).

Componenti e prodotti: un campionario per la realizzazione di TWS e TLVS

La prima fase della metodologia ha permesso di individuare le principali componenti tecnologiche e materiche di TWS e TLVS, accomunate dal tipo di massa termica, qui analizzata in chiave comparativa, seguendo le successive fasi 2, 3 e 4.

Per i blocchi prefabbricati in calcestruzzo sono stati raccolti dati dimensionali e fisici, come spessore, altezza, lunghezza, peso unitario, conducibilità termica con un range di circa 1,6-2,0 W/(m²K), trasmittanza variabile con lo spessore, densità di circa 2.400 kg/m³ e calore specifico di circa 850 J/K·kg, oltre a prestazioni funzionali e di durabilità, come resistenza a compressione, a fuoco, a gelo e ad agenti chimici, stabilità dimensionale, durata, tenuta all'acqua e permeabilità all'aria. Sono stati considerati anche parametri legati al comfort e alla qualità ambientale, quali isolamento termico e acustico, comportamento igrometrico, emissioni nocive, capacità di contribuire alla ventilazione e al benessere indoor. La valutazione si è estesa ad aspetti estetici e gestionali (regolarità di aspetto, attrezzabilità e manutenibilità) fino all'impatto sui consumi energetici complessivi.

I dati raccolti da schede tecniche e normative sono stati organizzati in una griglia comparativa che restituisce un quadro coerente delle prestazioni; a ciascun parametro è attribuito un punteggio da 0 (dato assente) a 5 (dato ottimale), la cui somma fornisce una valutazione qualitativa fondata su dati quantitativi, sia per le singole classi di esigenze, sia in termini globali.

Parametrizzazione e ottimizzazione: configurazioni ideali per l'applicazione dei due sistemi

Per approfondire il ruolo della massa termica sono state condotte simulazioni energetiche parametriche, come definito precedentemente nelle fasi 5 e 6 della metodologia, variando progressivamente spessore e configurazione, al fine di valutarne l'impatto sulle prestazioni del TWS e del TLVS.

Per il primo tramite il plugin di programmazione Grasshopper sono stati sviluppati due modelli geometrici parametrici: una stanza baseline (4 x 5 x 3 metri) e un'identica dotata di TWS (Fig. 8). Entram-

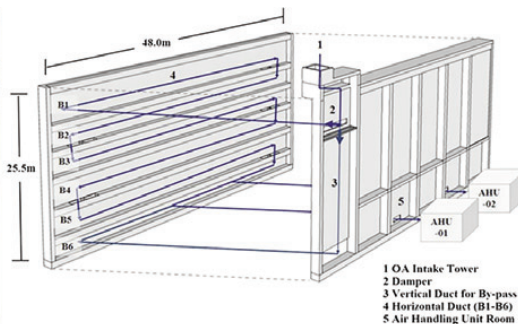


Fig. 5 | Great Hall, Kent College (Canterbury, UK, 2019), designed by Hazle McCormack Young LLP (source: rcinews.it, 2022).

Fig. 6 | Ewha Womans University Campus Complex (Seoul, South Korea, 2008), designed by Dominique Perrault Architecture studio (source: archidiap.com, 2015).

Fig. 7 | Big Data Institute (Oxford, UK, 2017), designed by Make Architects (source: makearchitects.com, 2025).

be presentano sulla parete sud una finestra di 1 x 2 metri, con doppio vetro chiaro, infissi in alluminio a taglio termico e schermatura esterna a rullo. Nel secondo modello è stato aggiunto il TWS, anch'esso di 1 x 2 metri, composto da doppio vetro basso emissivo (4-16-4 mm) riempito con argon, un assorbitore costituito da una lastra metallica con elevata conducibilità termica, intercapedine d'aria di 15 cm e massa in calcestruzzo variabile da 5 a 45 cm. Sono presenti quattro bocchette di ventilazione, due nella parte inferiore e due in quella superiore (35 x 10 cm), regolate in base alla stagionalità e all'alternanza tra ore diurne e notturne, e un doppio sistema di ombreggiamento (sia interno che esterno) regolato in base alla stagione.

L'uso di un modello di tipo parametrico è stato fondamentale per variare dimensioni e caratteristiche delle diverse componenti; le proprietà necessarie per le simulazioni energetiche sono state assegnate tramite la componente Honeybee (HB) del pacchetto Ladybug tools; i materiali, sia opachi che trasparenti, sono stati assegnati tramite 'HB construction material' ai diversi livelli. I due ambienti della 'stanza' e del TWS sono stati resi comunicanti tramite l'uso della 'HB solve adjacency'. In particolare alla 'stanza' è stato assegnato il programma 'small office', mentre il TWS viene trattato come plenum, ovvero come ambiente privo di carichi termici ed elettrici, ma con la sola funzione di scambiare il calore accumulato dall'esterno con l'ambiente interno della 'stanza'. Le due 'stanze' sono state poi convogliate nel modello HB a cui, una volta convertito in modello OpenStudio (OSM), sono stati assegnati i parametri per le simulazioni.

L'obiettivo è stato indagare l'influenza dello spessore della massa termica sulle prestazioni del TWS, confrontando i consumi specifici (kWh/m²) per riscaldamento, raffrescamento e fabbisogno totale su base mensile e annuale; i risultati sono stati raccolti in un foglio Excel al fine di ottenere una rappresentazione del loro quadro sinottico. Le proprietà geometriche sono state gestite in Grasshopper, quelle termofisiche in HoneyBee; le condizioni climatiche sono state definite in Ladybug tramite file 'epw' della Stazione di Roma Urbe; il modello è stato collegato a EnergyPlus e OpenStudio, da cui sono stati estratti i dati mensili necessari all'analisi (Fig. 9).

Per la modellazione CFD del sistema TLVS è stata sviluppata una geometria di riferimento mediante il software Rhinoceros (Rhino), con dimensioni complessive pari a 10 x 15 x 3 metri, successivamente implementata nel plugin Butterfly, integrato in Grasshopper e basato sul motore di calcolo OpenFOAM. Il processo di simulazione è stato strutturato in quattro fasi fondamentali: la definizione della geometria e delle condizioni al contorno (Geometry and Boundary Conditions), la generazione della mesh (Mesh Generation), l'impostazione e l'esecuzione del solutore (Solver Setup and Run) e, infine, l'elaborazione e l'analisi dei risultati (Post-Processing; Fig. 10).

Tale procedura è stata applicata a quattro diverse varianti geometriche del sistema, concepite per valutare l'influenza della conformazione delle superfici interne sui risultati fluidodinamici: la prima caratterizzata da pareti lisce, la seconda da pareti verticali configurate 'a zig-zag', la terza dall'estensione della stessa geometria anche al pavimento e la quarta da una configurazione completamente irregolare in cui l'andamento 'a zig-zag' interessa pareti, pavimento e soffitto. La scelta di simulare diverse con-

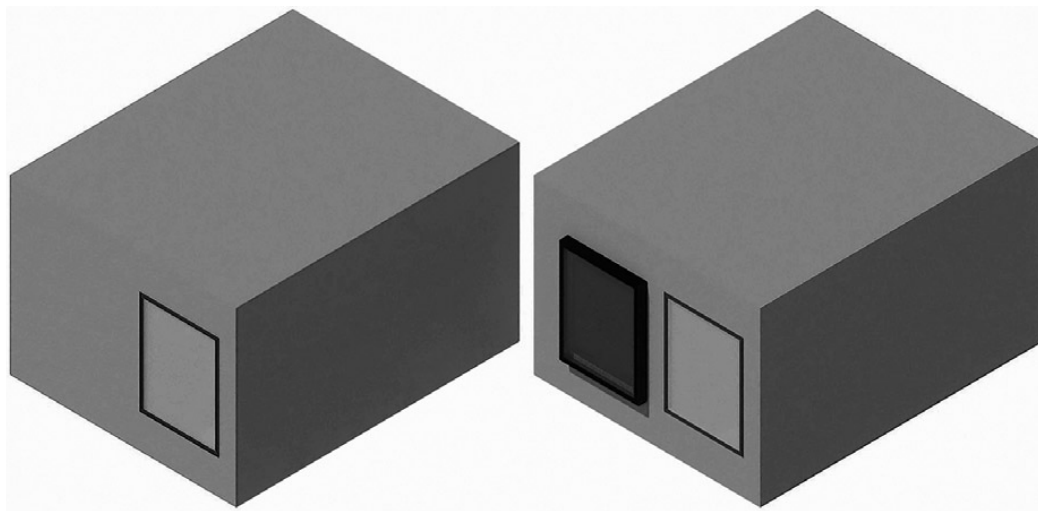


Fig. 8 | Parametric model baseline room and room with TWS (credit: the Authors, 2025).

figurazioni si ispira ai contributi di Rim, in cui superfici goffrate sul pavimento determinarono variazioni termiche elevate (Rim, Sung and Kim, 2018).

In particolare nella fase uno sono state impostate condizioni uniformi al contorno, con le pareti mantenute a una temperatura costante di 14 °C, valore scelto in quanto rappresentativo della temperatura media del terreno a una certa profondità, e l'aria in ingresso caratterizzata da una velocità di 0,3 m/s e da una temperatura di 20 °C, in linea con scenari tipici di ventilazione naturale. Questa configurazione iniziale ha permesso di definire un quadro di riferimento coerente per valutare il comportamento termofluidodinamico del sistema, assicurando la comparabilità tra le diverse varianti geometriche analizzate. Successivamente, durante la fase due, è stata costruita la griglia computazionale, elemento essenziale per la corretta discretizzazione del dominio di calcolo. La mesh è stata inizialmente generata con il comando blockMesh, che ha consentito di definire una struttura di base regolare e ben organizzata, per poi essere opportunamente raffinata nelle zone critiche mediante snappyHexMesh, così da garantire una rappresentazione accurata dei gradienti di velocità e temperatura nelle regioni prossime alle superfici solide.

Nella fase tre l'impiego del solutore buoyantSimpleFoam ha permesso di stimare le variazioni di velocità dell'aria (m/s) e di temperatura (ΔT) attraverso l'utilizzo di 'probes' collocati alle sezioni di ingresso e di uscita. L'impostazione dei parametri numerici – come i criteri di convergenza, il numero massimo di iterazioni e le tolleranze residue – ha garantito la stabilità del calcolo e la ripetibilità dei risultati.

Infine nella fase quattro sono stati analizzati in dettaglio i campi di velocità e di temperatura, estratti anch'essi mediante sonde virtuali, ovvero un punto o un insieme di punti nello spazio del dominio di calcolo, posizionati in corrispondenza delle sezioni iniziale e finale del labirinto, calcolando i valori medi della velocità dell'aria (m/s) e determinando i differenziali di temperatura (ΔT).

L'analisi dei dati ha messo in evidenza le variazioni spaziali dei parametri fluidodinamici, fornendo indicazioni utili per confrontare l'efficienza delle diverse configurazioni geometriche studiate e per valutare l'effettiva capacità del sistema TLVS di contribuire al raffrescamento passivo e alla stabilizzazione del microclima interno.

Risultati | I risultati delle simulazioni mettono in evidenza la rilevanza dello spessore della massa termica sui fabbisogni energetici complessivi. L'adozione del TWS comporta una riduzione marcata dei consumi per il riscaldamento, pari a circa il 50% rispetto allo scenario di riferimento. Le prestazioni migliori si registrano con uno spessore di 20 cm, mentre oltre i 25 cm si osserva un'inversione di tendenza con un incremento dei fabbisogni. Per il raffrescamento si registra un leggero aumento dei consumi rispetto al baseline, trascurabile rispetto al beneficio complessivo ottenuto. Considerando il bilancio energetico annuale, i valori oscillano tra 40 e 35 kWh/m², con una variazione massima del 20% rispetto alla condizione iniziale (Fig. 11). Nel complesso lo spessore di 20 cm emerge come configurazione ottimale nel contesto climatico e nelle condizioni di esercizio considerate.

L'analisi CFD delle quattro configurazioni del TLVS ha messo in evidenza l'influenza determinante della geometria sulla distribuzione dei campi fluidodinamici e termici. Con pareti lisce (Test 1; Fig. 12) il flusso mantiene un andamento uniforme con velocità contenute (0,05-2,5 m/s) e un raffrescamento limitato, con $\Delta T \approx -1/-2$ °C. L'introduzione delle pareti 'a zig-zag' (Test 2; Fig. 13) incrementa le turbolenze e favorisce gradienti termici più marcati, con velocità locali fino a 5 m/s e una riduzione di circa -3/-4 °C.

L'estensione della geometria goffrata anche al pavimento (Test 3; Fig. 14) amplifica la miscelazione, portando ampie zone a 2,5-5 m/s e un ΔT medio compreso tra -4 e -8 °C. Infine, la configurazione completa con pareti, pavimento e soffitto 'a zig-zag' (Test 4; Fig. 15) risulta la più performante, con ventilazione interna stabile intorno a 4-5 m/s e una riduzione termica fino a -6/-8 °C. Nel complesso l'aumento della complessità geometrica comporta un miglior rimescolamento dell'aria e una significativa diminuzione della temperatura di uscita (Fig. 16).

Conclusioni | La ricerca ha confermato l'efficacia dell'impiego integrato in architettura tra Trombe Wall System (TWS) e Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) come strategie bioclimatiche complementari per il clima mediterraneo. Nella prima fase, oltre a validare l'utilità e il potenziale dell'applicazione dei due sistemi, sono state definite le principali componenti tecnologiche e materiche per la loro

realizzazione nel contesto climatico di riferimento: questa selezione è stata fondamentale per procedere all'impostazione e alla ricerca portata avanti con l'analisi di mercato (fase 2) e all'analisi dei prodotti secondo la struttura dettata dalla UNI 8289: 1981 (fase 3). Gli articoli scelti sono stati poi valutati e classificati tramite l'assegnazione di punteggi parziali e totali (fase 4) utilizzando un'analisi multicriteriale pesata. Le simulazioni parametriche (fase 5) hanno evidenziato l'influenza di specifici fattori sulla prestazione dei due sistemi: lo spessore e la geometria della massa termica rispettivamente per il TWS e il TLVS.

Per il primo, uno spessore compreso tra 15 e 20 cm rappresenta la configurazione ottimale, in grado di ridurre il fabbisogno di riscaldamento fino al 50% mantenendo al contempo carichi di raffreddamento

contenuti. Oltre tale soglia le prestazioni tendono a ridursi, rendendo superfluo l'uso di materiale aggiuntivo. Per il secondo, l'analisi CFD ha mostrato come la geometria incide fortemente sulla distribuzione del flusso d'aria e sui gradienti termici. Le pareti lisce garantiscono solo un raffreddamento limitato ($\Delta T \approx -1/-2^\circ\text{C}$), mentre le configurazioni 'a zig-zag' migliorano progressivamente la ventilazione e lo scambio termico. Il modello più complesso, con pareti, pavimento e soffitto corrugati, ha raggiunto velocità stabili intorno a 4-5 m/s e riduzioni termiche tra -6 e -8°C , dimostrando il potenziale della rugosità superficiale nell'amplificare i fenomeni convettivi e le relative capacità di trasferimento termico.

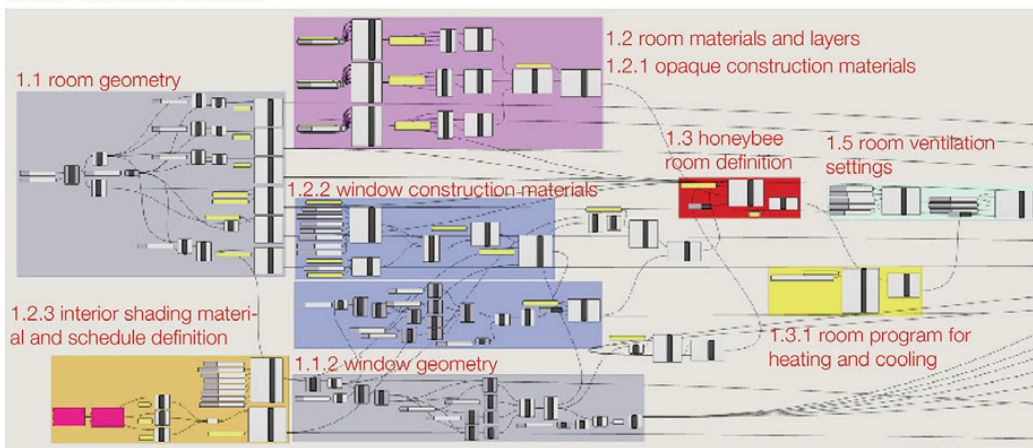
Nel complesso i risultati evidenziano come i due sistemi, se integrati, possano offrire benefici sinergici: il TWS assicura efficienza invernale, mentre il

TLVS garantisce raffreddamento estivo e regolazione dei flussi d'aria; insieme contribuiscono al risparmio energetico e al comfort ambientale fornendo una metodologia replicabile per la progettazione che miri a edifici resilienti e a basso impatto. Tali evidenze costituiscono una base solida per l'applicazione futura di soluzioni bioclimatiche passive integrate in progetti di architettura volta a conseguire un'elevata capacità di resilienza e di mitigazione climatica, come nel caso del progetto pilota per la nuova sede del Rome Technopole, delineando linee operative che uniscano conoscenze storiche e strumenti di simulazione avanzati.

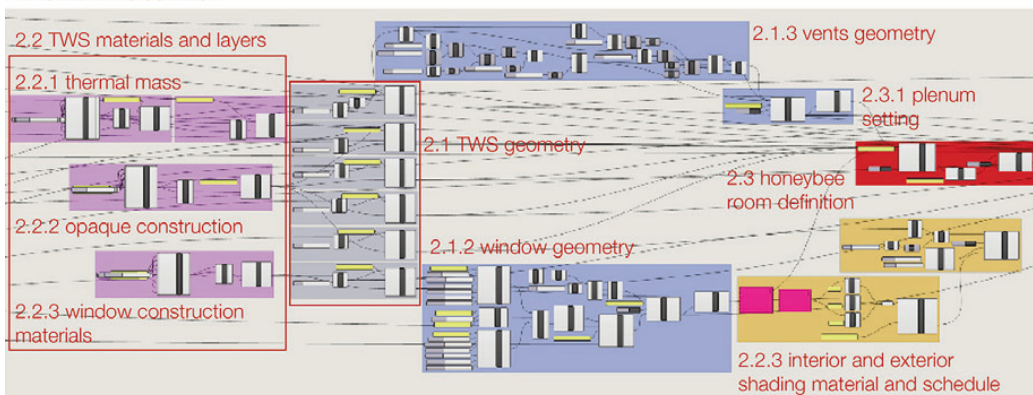
La diffusione dell'approccio è ostacolata da diverse barriere documentate in letteratura. Tra le barriere culturali, la scarsa consapevolezza dei benefici e la limitata informazione tecnica frenano l'adozione di soluzioni bioclimatiche (Furszyfer Del Rio, Sovacool and Griffiths, 2021; Obuseh et alii, 2025). Le barriere economiche e sociali derivano da costi iniziali elevati, carenza di incentivi e disuguaglianze di accesso che ne confinano l'applicazione a contesti sperimentali (Vassiliades et alii, 2023). Infine la mancanza di una legislazione rigorosa, di finanziamenti e investimenti per l'incentivazione di soluzioni low-carbon, nonché le lacune a livello politico e normativo, limitano ulteriormente l'adozione sistematica di tecnologie bioclimatiche (United Nations Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction, 2025; Balali and Yunusa-Kaltungo, 2025).

Possibili sviluppi del presente studio potrebbero includere la verifica dei risultati ottenuti tramite l'applicazione simultanea dei due sistemi ad un unico modello simulativo dell'intero edificio Rome Technopole, in modo da ottenere dati specifici per il progetto. Bisogna inoltre sottolineare come l'analisi di mercato sia stata svolta sul solo territorio nazionale, quindi su una scala limitata rispetto al clima di riferimento, mentre le simulazioni energetiche hanno preso in considerazione solo alcuni parametri rispetto a quelli effettivamente indagabili per ottimizzare la configurazione dei due sistemi. I dati ottenuti potrebbero essere integrati svolgendo ulteriori attività simulate per analizzare l'impatto delle altre variabili individuate nella fase 5 della metodologia.

PHASE 1: test room definition



PHASE 2: TWS definition



PHASE 3: output

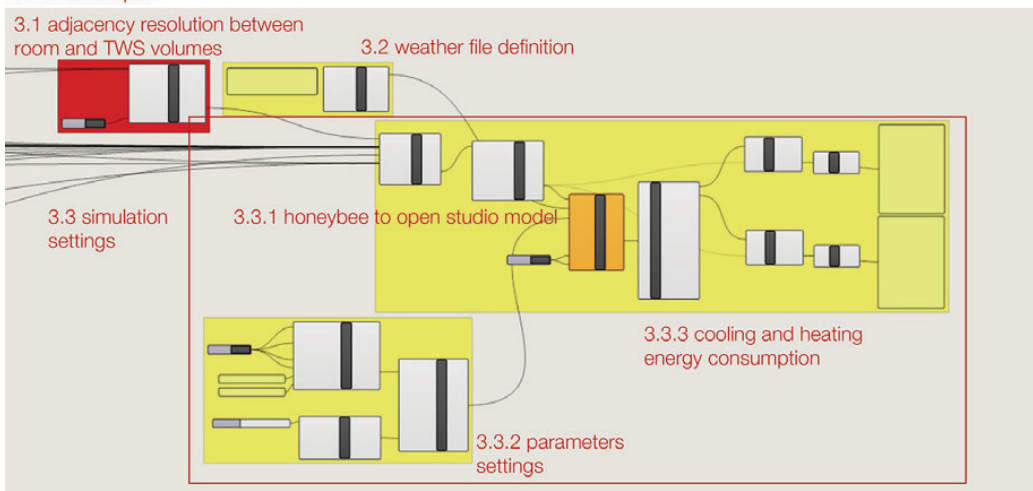


Fig. 9 | Grasshopper script used for room simulation: baseline model and TWS-integrated configuration (credit: the Authors, 2025).

The building sector represents one of the main contributors to global energy consumption and climate-altering emissions, accounting for 40% of final energy consumption in the European Union, 27% of which derives from non-residential buildings, and 36% of greenhouse gas emissions (IEA, 2023; European Parliament and Council of the European Union, 2024). These figures confirm the strategic role of the construction sector in the energy transition, which must never be regarded as separate from the broader objective of ecological and climate transition (Tucci, 2018). The European Union has, in fact, established binding targets to reduce net emissions by 55% by 2030 compared to 1990 levels (European Commission, 2021), aiming for climate neutrality by 2050 (European Parliament and Council of the European Union, 2021). At the same time, the IPCC identifies the building sector as a key field for mitigation, where interventions on the building envelope and energy systems are fundamental for decarbonisation and for limiting the rise in global temperature to within 1.5°C (Cabeza et alii, 2023).

The demand for cooling in buildings is rapidly increasing and is expected to triple by 2050, driven by rising temperatures and socio-economic development (IEA, 2018). Air conditioning and ventilation systems account for about 20% of global electricity consumption in the building sector, absorbing approximately 2,100 TWh in 2022, confirming their position among the most energy-intensive and fast-growing end uses (Ritchie, 2024). This trend will raise cooling-related emissions to 6.1 billion t CO_{2eq} by 2050, corresponding to over 10% of total projected global emissions that year (UNEP, 2023).

At the same time, the share of energy consumption for heating must not be underestimated. Globally, almost half of total energy demand is absorbed by heating and domestic hot water production, with over 60% still supplied by fossil fuels.¹

In Europe, the non-residential sector plays a significant role, accounting for 22% of total energy consumption (Volkova, 2024), including buildings with different uses and representing 30% of building floor area and 34% of final energy demand for heating (der Wieden et alii, 2023), with average values around 161 kWh/m² per year (Di Turi, Ronchetti and Sannino, 2023).

In Italy, the building stock comprises approximately 14 million buildings, of which about 1.7 million are non-residential, roughly 12% of the total (Caffari et alii, 2024). Within the tertiary sector alone, the data show an average annual consumption of around 197 kWh/m², with 130 kWh/m² attributed to thermal demand and 67 kWh/m² to electrical demand (Ministero della Transizione Ecologica, 2021).

Both European and national regulatory frameworks confirm the need for intervention on the existing building stock. At the supranational level, Directive (EU) 2024/1275 on the energy performance of buildings (European Parliament and Council of the European Union, 2024) introduced binding targets: starting in 2028, all new public buildings must be zero-emission, while from 2030, this requirement will extend to all new constructions. Alongside the European directives, international standards such as UNI EN ISO 13790:2008 and UNI EN ISO 15265:2005 define methodologies for calculating energy consumption related to heating and cooling; UNI EN 16798-1:2019 specifies parameters concerning indoor air ventilation, air quality, thermo-hygrometric comfort, lighting, and acoustics; whereas Italian national legislation establishes climatic parameters, performance requirements, and transmittance limits for buildings (Ministro dello Sviluppo Economico, 2015).

In light of these premises, this paper aims to analyse the potential for integrating the Trombe Wall System (TWS) and the Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) to improve the energy efficiency of non-residential buildings in Mediterranean climates. The objective is to evaluate the thermal, energy, and environmental performance of these systems, highlighting their contribution to reducing consumption and emissions. The work is structured around: a review and systematisation, following UNI 8289:1981, of the main technological and material components, classified according to UNI 8290-1:1981+A122:1983; simulation-based energy analyses to optimise both technologies; and a discussion of the results. This paper aims to provide a comparative evaluation methodology and simulation tools applicable to the scientific community and design professionals, fostering the integration and optimisation of systems for the energy transition of the built environment.

Research approach and objectives | Within this context lies the project for the new headquarters of the Rome Technopole, conceived as a pilot project within the broader urban regeneration operation of the Pietralata area, which is the subject of national-scale research funded by the PNRR 'Energy Transition and Digital Transition in Urban Regeneration and Construction'² (Rome Technopole, 2024). This pilot project, the result of advanced applied research, presents a zero-energy, zero-emission building that serves, on one hand, as an experimental example of the potential offered by the scientifically grounded integration, based on simulations and modelling of expected results, of innovative technologies with low carbon, ecological, and energy footprints, and on the other hand, as a best-practice model for the tertiary sector.

The significance of the research and its experimental and demonstrative design application lies in the synergistic integration of passive systems, which have always been used to control the microclimate and to address extreme climatic conditions through the replication of natural mechanisms (Buono, 1998; Tucci, 2009; Ferrucci and Peron, 2018; Grosjean et alii, 2025). This is consistent with the need to reduce consumption and emissions in order to counter climate change and decrease energy dependence (Simões, Manaia and Simões, 2021; Mo et alii, 2024).

Among passive bioclimatic systems, the Trombe Wall System (TWS) is capable of absorbing solar heat on the façade and gradually releasing it, proving highly effective during the winter period in Mediterranean climates thanks to the abundant solar availability, improving comfort and reducing emissions

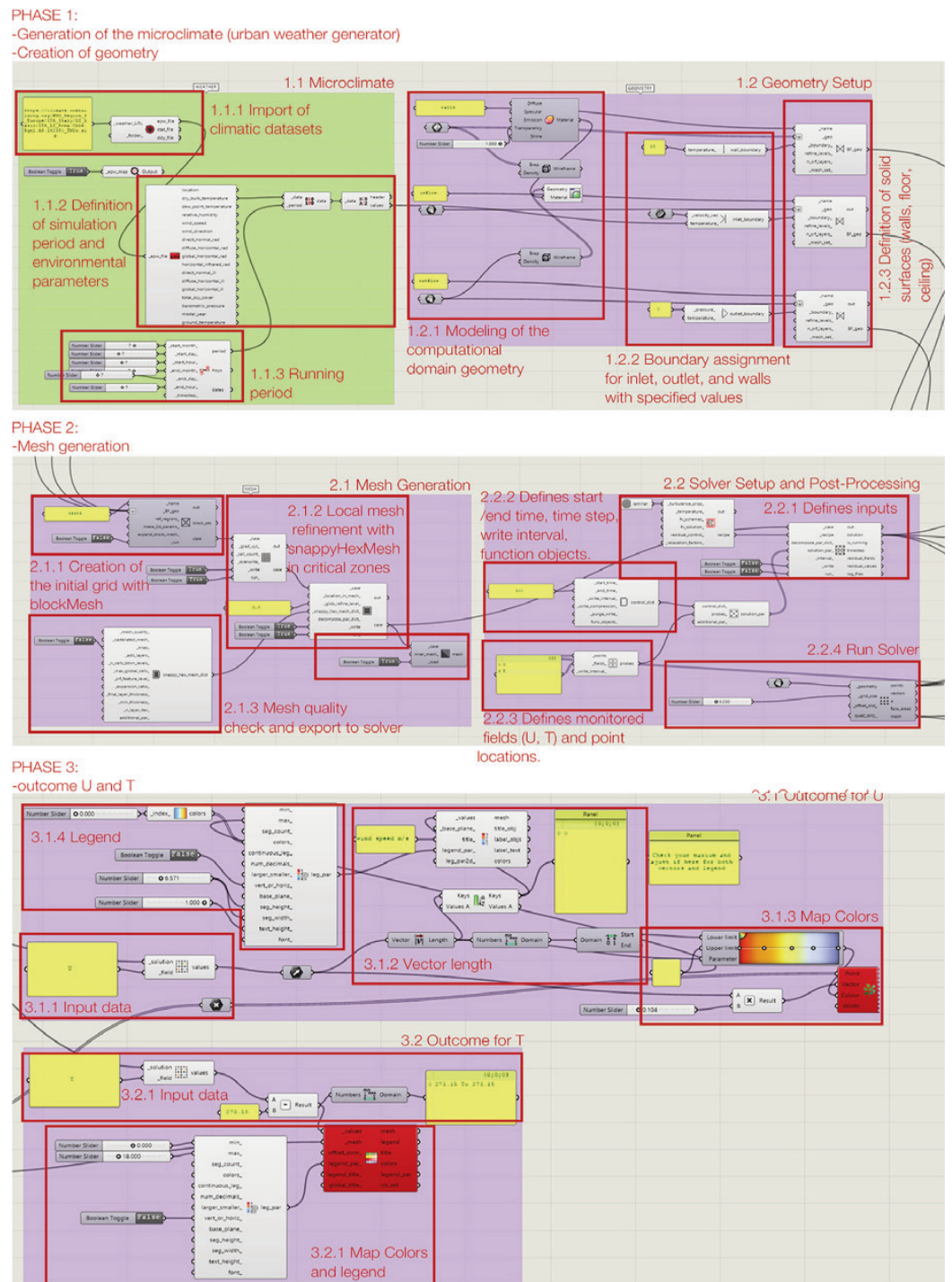


Fig. 10 | Grasshopper script for the TLVS simulation (credit: the Authors, 2025).

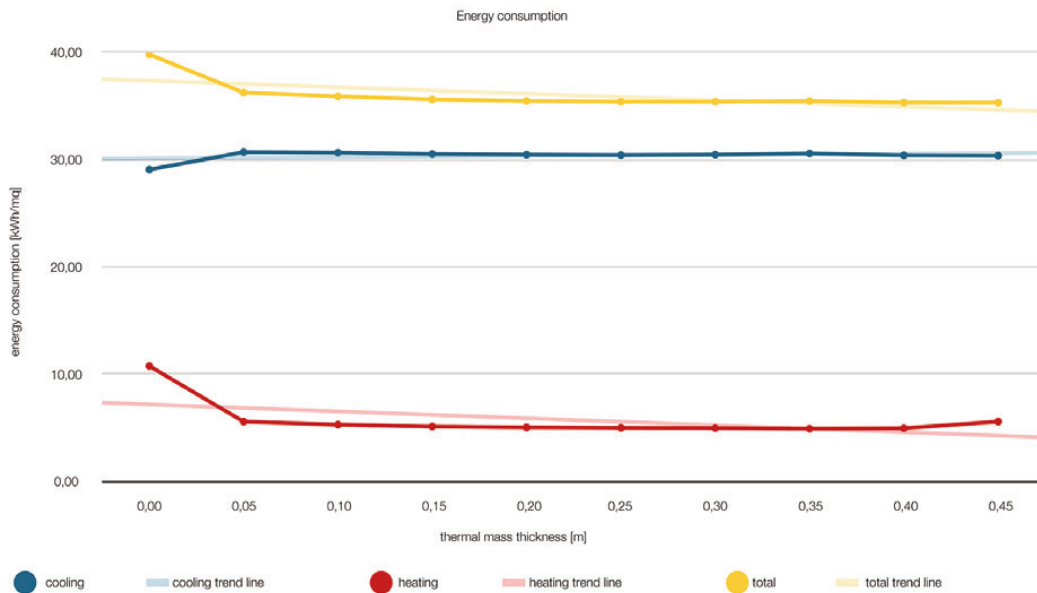


Fig. 11 | Annual energy consumption for heating, cooling and total: comparison between baseline model and TWS model with different thermal mass thicknesses (credit: the Authors, 2025).

(Simões, Manaia and Simões, 2021; Tucci, 2021; Briga-Sá et alii, 2021; Matos, Delgado and Guimarães, 2022; Hernandez-Perez et alii, 2025). Conversely, the Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) exploits the mass of underground concrete and the constant temperature of the soil to condition ventilation air, producing cooling effects in summer and heating in winter (Marmion et alii, 2012; Song, Song and Lim, 2014; Annan and Nehme, 2016; Rim, Sung and Kim, 2018; Tucci, 2020a; Mihalakakou et alii, 2022). The main objective is to demonstrate the validity and potential of adopting TWS and TLVS in non-residential buildings in Mediterranean climates, providing both a practical reference and guideline, oriented toward standardisation and large-scale dissemination of the two systems, and a theoretical framework, demonstrating their efficiency and establishing a method for their optimisation process through the use of energy simulations.

Contribution to the Sustainable Development Goals (SDGs) | The optimisation and validation of bioclimatic systems aim to encourage their widespread adoption, increase independence from traditional energy sources (SDG 7), and promote the use of low-impact technologies (SDG 13). Their large-scale diffusion would create innovative industrial sectors (SDG 9) and new employment opportunities (SDGs 2 and 8). However, these would require adequate incentive policies to mitigate potential drawbacks associated with initial costs, experimental phases, and investment needs (SDGs 1 and 10).

Specifically, the use of TWS and TLVS can improve thermo-hygrometric conditions and indoor air quality (SDG 3), as well as enhance resilience and mitigate urban heat islands (SDG 11). Moreover, it promotes equal access and professional inclusion in research and training programs through courses and seminars organised by the Rome Technopole Association (SDGs 4 and 5), fostering responsible production and consumption practices (SDG 12) and respect for terrestrial and marine ecosystems through the reduction of environmental pressures (SDGs 6, 14, and 15). Finally, the project is founded on networks of collaboration among research institutions, public bodies, and industry (SDGs 16 and 17), strengthening partnerships and governance for a fair and shared ecological transition.

Trombe Wall System: history, operation, and literature | The Trombe Wall System (TWS), patented by Morse in 1881 and first applied at Odeillo by Trombe and Michel in 1967, exploits the principles of the solar chimney effect and heat transfer through a process, based entirely on natural mechanisms, in which the incident solar radiation is first absorbed by the massive wall and stored thanks to its thermal capacity, and subsequently transferred indoors by means of convection and radiation. In winter, it functions as both a thermal storage system and an insulating barrier, while in summer, it limits thermal gains and contributes to cooling. The system configurations vary depending on climate and latitude (Hu et alii, 2017; Tucci, 2020b; Wang et alii, 2020; Elsaid et alii, 2023; Gu et alii, 2023; Somek et alii, 2023; Xiao et alii, 2024).

Several studies have examined how individual components affect TWS performance under different climatic conditions. For instance, the type of glazing (Pourghorban and Asoodeh, 2022), with double glazing capable of reducing primary energy consumption by up to 40% (Somek et alii, 2023), as well as the thickness and material of the thermal mass, the size and positioning of ventilation openings, and their management (Briga-Sá et alii, 2021). Beyond a certain threshold, increasing wall thickness yields no significant energy benefits. It is economically inefficient (Abbassi, Naili and Dehmani, 2022), while the adoption of shading systems helps reduce heat loss at night and limit overheating during the day (Briga-Sá et alii, 2017). Likewise, the ratio between TWS surface area and façade area is a decisive factor (A'zamovich, 2022).

The literature also investigates the interactions between components and optimal operational strategies, such as the relationship between vent openings and the thermal mass material (Asdaghi and Fayaz, 2023): reducing the cross-section of the openings mitigates indoor temperature fluctuations and increases the temperature differential with the outside (Laribi et alii, 2025). Among the main innovations in the system is the use of phase change materials, which make it possible to reduce the thickness and weight of the system, improve its energy performance, and enhance indoor comfort (Leang et alii, 2020; Samiev and Halimov, 2022; Elsaid et alii, 2023; Zhou et alii, 2024; Zhang et alii, 2025). The application of TWSs in multi-storey non-residential buildings, how-

ever, remains little explored (Gu et alii, 2023; Abdel-samea et alii, 2025). Among the various configurations, the composite TWS, characterised by single or double glazing, an air cavity, a thermal mass, and ventilation openings, is the most studied and widely adopted in Mediterranean climates (Briga-Sá et alii, 2021; Abbassi, Naili and Dehmani, 2022; Hernandez-Perez et alii, 2025).

Thermal Labyrinth Ventilation System: history, operation, and literature | Hypogeal cooling techniques represent one of the oldest forms of passive air-conditioning. Historical examples of this principle can be found in the Persian 'qanats'³ (Montero-Gutiérrez et alii, 2025), comparable to those of modern thermal labyrinths, where hot air was channeled through underground tunnels ventilated by wind towers ('badghir' in Persian, 'barjeel' in Arabic; Hejazi and Hejazi, 2013), and subsequently directed toward dwellings after being cooled by contact with the moisture in the soil (Lechner, 2008; Ghandi and Leone, 2024). The vernacular dwellings of southern Italy, such as those in the Borgo della Corricella in Procida or the Historic Centre of Forio d'Ischia, demonstrate how the use of tuff stone, underground chambers, and air ducts carved into rock have, since ancient times and over the centuries, ensured comfortable indoor conditions even during the hottest months (Buono, 1998).

In these cases, cooling is not only the result of thermal mass but also of a broader urban strategy, in which the orientation of buildings and channelled ventilation play a key role in microclimate control (Bori, 2006). Givoni (1994), albeit with a pioneering approach, had already emphasised how underground buildings, by virtue of their morphological configuration and contact with the ground, could offer an effective response to summer heat, especially when combined with techniques such as night ventilation and indirect evaporative cooling.

Modern devices such as thermal labyrinths and earth-air heat exchangers are direct evolutions of these ancient solutions, adopting the same operational principles but with greater attention to material selection and construction requirements. Numerous recent studies demonstrate that these systems can reduce indoor air temperature by 6-8 °C relative to the outside, significantly improving building energy ef-

iciency (Marmion et alii, 2012; Song, Song and Lim, 2014; Annan and Nehme, 2016; Xiong et alii, 2019).

The originality of this research lies in the development of an integrated method of analysis and simulation to systematise and evaluate the components of the reference bioclimatic systems. The proposed algorithm enables modelling and comparing the thermo-energy performance of TWS and TLVS under Mediterranean climatic conditions, which remain underexplored, while defining adaptability criteria for multi-storey non-residential buildings. The results provide new evidence in support of applied research and the design of passive, low-environmental-impact solutions.

Methodology and research phases | The study develops a catalogue of components for the implementation of TWS and TLVS systems, together with an evaluation method to compare the options available on the market, and a workflow for parametric modelling and energy simulations, aimed at identifying the optimal configurations of the two systems in an integrated application. The developed methodology is articulated into six structured phases, as described below.

Phase 1 – Theoretical and Contextual Analysis. This phase involved a review of scientific literature, experiments, and case studies to specify the climate type according to the Köppen-Geiger classification⁴, which includes two systems, to understand their origins, evolution, construction, and performance characteristics. The main technological components were identified, which later became the subject of subsequent comparative analyses, together with the relevant climatic parameters, focusing on the Mediterranean climate. The study shows that TWS is most advantageous between 55° and 40° latitude, although performance depends on solar radiation and cloud cover (Kostikov, Grinkrug and Yiqiang, 2020; Licholai et alii, 2021; Lohmann and Santos, 2020; Hernandez-Perez et alii, 2025), whereas for TLVS, soil temperature and humidity are key factors. Other variables, such as maximum external temperature and wind speed, influence both systems, with particular relevance for TLVS in natural or hybrid ventilation systems.

Phase 2 – Market Research. This phase focused on identifying products that align with the main technological and material components, and assessing their availability, performance, scalability, and market potential. For the TWS, the study considered shading systems, window frames and types of glazing, PCM panels, concrete blocks for the thermal mass, and ventilation openings. For the TLVS, the cataloguing included air intake towers, thermal mass elements, form matrices, air filtration systems, and radon barriers.

Phase 3 – Construction of Thematic Databases. The collected data were organised into two Excel databases, one for each system, and an initial filter was applied based on production-site distance to minimise transport-related impacts. In accordance with UNI 8289:1981, several classes of requirements relevant to the study were selected: Safety (S), Reliability (R), Well-being (W), Appearance (A), Usability (U), Management (Mg), and Environmental Protection (Ep). Each class includes a set of requirements defined by UNI 8290-1:1981+ A122:1983 (Fig. 1).

Phase 4 – Multi-Criteria Analysis. The classes and requirements were translated into evaluation criteria and parameters, rated on a 0-5 scale based on

Test 1: smooth vertical walls

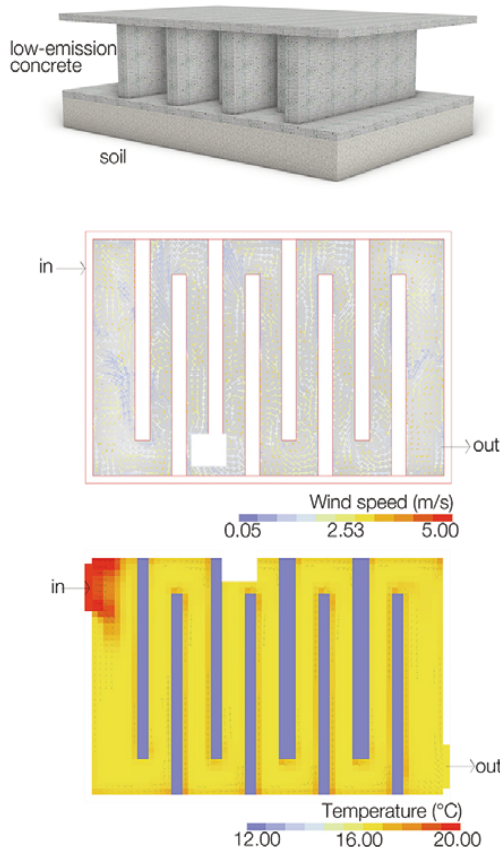


Fig. 12 | Case 1: configuration with smooth vertical low-emission concrete walls; distribution of wind speed (m/s) and temperature (°C) along the ventilation path (credit: the Authors, 2025).

Test 2 : zigzag walls

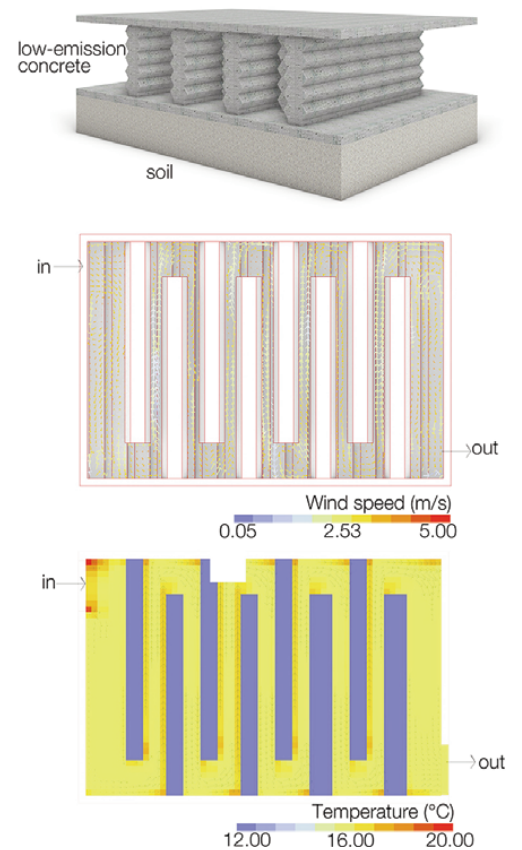


Fig. 13 | Case 2: configuration with zigzag vertical low-emission concrete walls; distribution of wind speed (m/s) and temperature (°C) along the ventilation path (credit: the Authors, 2025).

Test 3: zigzag walls and floor

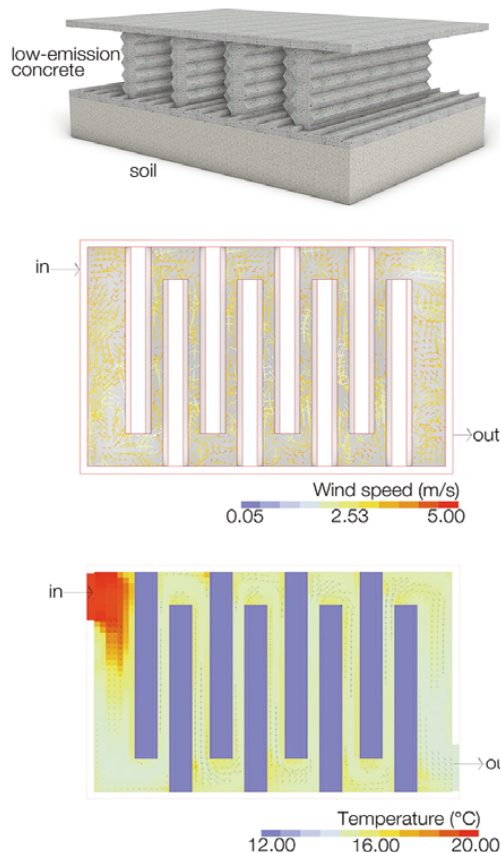


Fig. 14 | Case 3: configuration with zigzag walls and floor in low-emission concrete; distribution of wind speed (m/s) and temperature (°C) along the ventilation path (credit: the Authors, 2025).

Test 4: zigzag walls, floor and ceiling

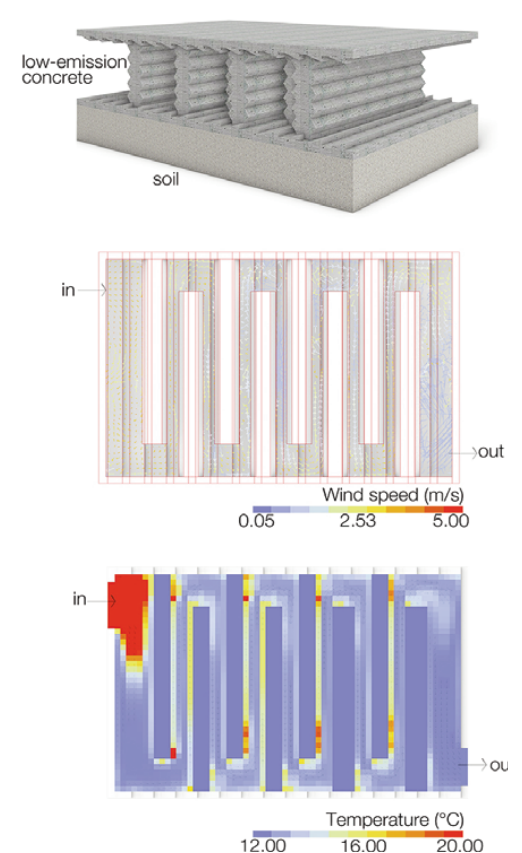


Fig. 15 | Case 4: configuration with zigzag walls, floor and ceiling in low-emission concrete; distribution of wind speed (m/s) and temperature (°C) along the ventilation path (credit: the Authors, 2025).

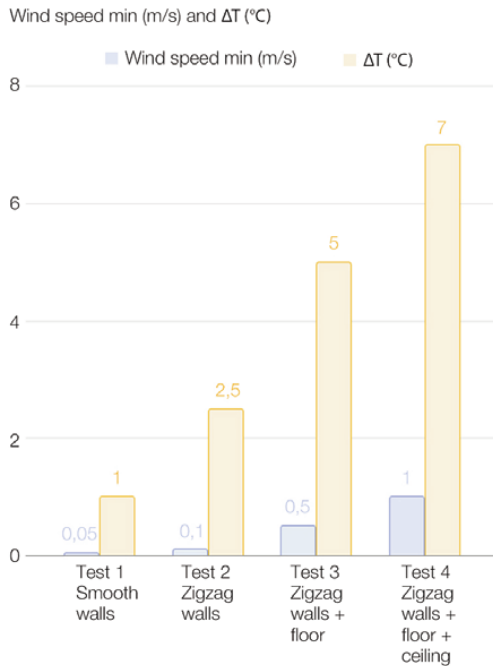


Fig. 16 | Influence of TLVS geometry on wind speed, m/s, and temperature reduction, ΔT (credit: the Authors, 2025).

their effectiveness for product and system performance. For each product, qualitative assessment sheets were prepared to compare the alternatives and identify the components most suitable for integrating the systems into the Rome Technopole pilot project.

Phase 5 – Energy Simulations. This phase analysed specific factors identified in the previous stages, using a parametric model developed in Grasshopper and simulated with Ladybug Tools⁵ (Honeybee and Butterfly) together with the EnergyPlus, OpenStudio (OS), and OpenFOAM engines. For the TWS, the parameters considered were the thickness of the air cavity between the glazing and the massive wall, the thickness of the thermal mass, the position and operation of shading devices, and the size and configuration of ventilation openings. For the TLVS, the analyses focused on the thickness and shape of the thermal mass, the distance between the walls, and the velocity of the incoming air flow.

Phase 6 – Determination of Optimal Configurations. The results enabled the identification of the most effective solutions for applying both systems to the Rome Technopole pilot project.

TWS and TLVS: case studies and international best practices

Six international best practices were selected from a broader collection, and this paper reports those realised in climates comparable to the reference context, in order to understand possible methods of adoption and integration of the systems. These are non-residential multi-storey projects or buildings characterised by large interior spaces and the potential for façade or underground integration, with characteristics similar to those of the Rome Technopole building, where the systems analysed in this study will be integrated. The TWS can be configured in different ways, all of which share its components' modularity, suggesting the potential for system standardisation.

The Blue Ridge Parkway Destination Centre (Asheville, NC, 2008; Cfa⁶) features a system of 13 massive solar walls facing south, with a distinctive

sawtooth configuration that alternates between storage walls and light inlets. Its performance was analysed through a Computational Fluid Dynamics (CFD) model, providing a valuable reference for simulation-based validation (Fig. 2). The Oregon Health and Science University Centre for Health and Healing (Portland, OR, 2006; Csb⁷) is a multi-storey building employing a two-level system with double glazing and recirculation systems as part of a hybrid strategy for preheating water and air, a dual functionality that could also be explored in the Rome Technopole context (Fig. 3). Lastly, the Recreation and Wellness Center (Hayward, CA, 2011; Csb) uses a ventilated system with an extensive concrete thermal mass characterising its west-facing façade, ensuring stable and comfortable temperatures within large interior spaces (Fig. 4).

In the TLVS case studies, the adopted methodology combines a critical literature review with a comparative analysis of thermo-energy performance to assess transferability and versatility across different architectural and climatic contexts.

At the Great Hall of Kent College (Canterbury, UK, 2019; Cfb⁸), the TLVS comprises five underground concrete chambers, a simple, low-maintenance construction solution that ensures natural ventilation and thermal stability, supporting high-occupancy comfort. However, its performance can be affected by soil humidity and low thermal amplitude (Fig. 5).

In the Ewha Womans University Campus Complex (Seoul, South Korea, 2008; Dwa⁹), the system takes the form of a vertical labyrinth excavated into the ground, capable of reducing summer air temperature by up to 7 °C and preheating winter air by 10 °C. Its urban scale and landscape integration make it an emblematic reference for complex projects, comparable in concept to the Rome Technopole in the Pietralata area (Fig. 6). Its strength lies in the ability to regulate the microclimate and maintain high comfort levels with low energy consumption, while its main challenges concern construction complexity and maintenance costs associated with its large scale. At the Big Data Institute (Oxford, UK, 2017; Cfb), a technologically advanced version of the system is implemented, integrating a 600 m² labyrinth with cogeneration and photovoltaic systems. Computational fluid dynamics (CFD) simulations optimised airflow and thermal balance, demonstrating, on the one hand, that combining passive and active strategies requires a high level of control and management, and, on the other, that TLVS can also be applied to research and office buildings in technologically innovative contexts (Fig. 7).

Overall, these examples show how the TLVS can be developed as a natural and architectural device in buildings with a strong landscape component, through underground and contextual integration, and as a technologically advanced component when combined with other passive strategies, high-efficiency systems, and optimised CFD simulations.

Components and products: a catalogue for the implementation of TWS and TLVS

The first phase of the methodology enabled the identification of the main technological and material components of the TWS and TLVS, united by the type of thermal mass, which was analysed comparatively following in phases 2, 3, and 4 of the research.

For prefabricated concrete blocks, dimensional and physical data were collected, such as thickness,

height, length, unit weight, and thermal conductivity, ranging approximately from 1.6 to 2.0 W/(m²K), as well as transmittance values varying with thickness, a density of about 2,400 kg/m³, and a specific heat capacity of approximately 850 J/K·kg. Additional data concerned functional and durability performance, including compressive strength, fire resistance, frost and chemical resistance, dimensional stability, service life, water tightness, and air permeability. Parameters related to comfort and environmental quality were also considered, including thermal and acoustic insulation, hygrometric behaviour, harmful emissions, and the ability to support ventilation and indoor well-being. The assessment extended to aesthetic and management aspects, including surface regularity, equipment adaptability, and maintainability, as well as to the impact on overall energy consumption.

The data collected from technical data sheets and standards were organised into a comparative matrix, providing a coherent overview of performance. Each parameter was assigned a score from 0 (data absent) to 5 (optimal value), and the scores were summed to yield a qualitative evaluation based on quantitative data, both for individual requirements classes and overall.

Parameterisation and optimisation: ideal configurations for the application of the two systems

To further investigate the role of thermal mass, parametric energy simulations were carried out, as defined in phases 5 and 6 of the methodology, by progressively varying thickness and configuration in order to evaluate their impact on the performance of TWS and TLVS.

For the former, using the Grasshopper programming plugin, two parametric geometric models were developed: a baseline room (4 × 5 × 3 metres) and an identical room equipped with a TWS (Fig. 8). Both models feature a south-facing wall with a 1 × 2-metre window, double clear glazing, aluminium thermal-break frames, and an external roller shading system. In the second model, the TWS, also 1 × 2 metres, was added, consisting of low-emissivity double glazing (4-16-4 mm) filled with argon gas, an absorber made of a metal plate with high thermal conductivity, an air cavity of 15 cm, and a concrete mass varying from 5 to 45 cm. The wall includes four ventilation openings, two at the bottom and two at the top (35 × 10 cm), regulated by season and the day-night cycle, along with a dual shading system (both internal and external) adjusted by season.

The use of a parametric model was essential for varying the dimensions and properties of the components. The parameters required for energy simulation were assigned using the Honeybee (HB) component of the Ladybug Tools package. Opaque and transparent materials were associated via the 'HB construction material' component and applied to the corresponding layers. The two zones, the 'room' and the 'TWS', were made to communicate through 'HB solve adjacency'. Specifically, the 'room' was assigned the 'small office' program. At the same time, the TWS was treated as a plenum, i.e., an environment without thermal or electrical loads, serving only to exchange heat accumulated from the exterior with the interior of the 'room'. Both 'rooms' were then linked to the HB model, which, after conversion to OpenStudio Model (OSM) format, was assigned the simulation parameters.

The objective was to investigate the influence of thermal mass thickness on TWS performance by

comparing specific energy consumption (kWh/m²) for heating, cooling, and total energy demand on a monthly and annual basis. The results were compiled into an Excel sheet to produce a synoptic representation. Geometric properties were managed in Grasshopper, thermo-physical properties in Honeybee, and climatic conditions in Ladybug using an EPW file from the Rome Urbe Station. The model was linked to EnergyPlus and OpenStudio, from which the monthly data required for the analysis were extracted (Fig. 9). For the CFD modelling of the TLVS, a reference geometry was developed in Rhinoceros (Rhino) software, with overall dimensions of 10 × 15 × 3 metres, and later implemented in the Butterfly plugin, integrated with Grasshopper and based on the OpenFOAM computational engine. The simulation process was structured into four fundamental phases: Definition of Geometry and Boundary Conditions, Mesh Generation, Solver Setup and Run and Post-Processing (Fig. 10).

This procedure was applied to four different geometric variants of the system, designed to evaluate the influence of internal surface configuration on the fluid dynamic results: the first with smooth walls, the second with vertical zigzag walls, the third extending the same zigzag geometry to the floor, and the fourth with a completely irregular configuration where the zigzag pattern affects walls, floor, and ceiling. The decision to simulate multiple configurations was inspired by Rim's research, which found that embossed floor surfaces produced significant thermal variations (Rim, Sung and Kim, 2018).

In phase one, uniform boundary conditions were established: the walls were maintained at a constant temperature of 14 °C, a value chosen as representative of the average soil temperature at a certain depth, while the incoming air was characterised by a velocity of 0.3 m/s and a temperature of 20 °C, consistent with typical natural ventilation scenarios. This initial setup provided a coherent reference framework for evaluating the thermofluid dynamic behaviour of the system, ensuring comparability among the analysed geometric variants.

Subsequently, during phase two, the computational grid was constructed, an essential element for the correct discretisation of the computational domain. The mesh was first generated using the blockMesh command to define a regular, organised base structure, and then refined in critical zones using snappyHexMesh to ensure accurate representation of velocity and temperature gradients near solid surfaces.

In phase three, the use of the buoyantSimpleFoam solver made it possible to estimate variations in air velocity (m/s) and temperature differentials (ΔT) through the use of 'probes' positioned at the inlet and outlet sections. The numerical parameters, such as convergence criteria, maximum number of iterations, and residual tolerances, were calibrated to ensure computational stability and reproducibility of results.

Finally, in phase four, the velocity and temperature fields were analysed in detail, extracted through virtual probes (single points or sets of points within the computational domain) placed at the initial and final sections of the labyrinth, to calculate the average air velocity (m/s) and determine temperature differentials (ΔT). The data analysis highlighted spatial variations in fluid-dynamic parameters, providing valuable insights into the efficiency of the studied geometric configurations and the TLVS's actual capability to contribute to passive cooling and stabilise the indoor microclimate.

Results | The simulations highlight the significant influence of thermal mass thickness on overall energy requirements. The adoption of TWS leads to a marked reduction in heating consumption, approximately 50% compared to the baseline scenario. The best performance is observed with a 20 cm thick thermal mass, while beyond 25 cm, an inverse trend appears, with a gradual increase in energy demand. For cooling, there is a slight increase in consumption compared to the baseline, which is negligible relative to the overall benefit achieved. Considering the annual energy balance, the values range from 40 to 35 kWh/m², with a maximum variation of 20% relative to the initial condition (Fig. 11). Overall, a 20 cm thickness emerges as the optimal configuration within the climatic and operating conditions considered.

The CFD analysis of the four TLVS configurations revealed the decisive influence of geometry on the distribution of fluid dynamic and thermal fields. With smooth walls (Test 1; Fig. 12), the airflow remains uniform, with moderate velocities (0.05-2.5 m/s) and limited cooling, corresponding to ΔT ≈ -1/-2 °C. The introduction of zigzag-shaped walls (Test 2; Fig. 13) increases turbulence and promotes stronger thermal gradients, with local air velocities up to 5 m/s and a temperature reduction of about -3/-4 °C.

Extending the embossed geometry to the floor (Test 3; Fig. 14) further enhances air mixing, producing broad regions with velocities between 2.5 and 5 m/s and an average ΔT between -4 and -8 °C. Finally, the complete configuration with zigzag walls, floor, and ceiling (Test 4; Fig. 15) proved the most effective, achieving stable internal ventilation of 4-5 m/s and a temperature reduction of up to -6/-8 °C. Overall, the increase in geometric complexity results in improved air mixing and a significant decrease in outlet air temperature (Fig. 16).

Conclusions | The research confirmed the effectiveness of the integrated architectural application of the Trombe Wall System (TWS) and the Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) as complementary bioclimatic strategies for the Mediterranean climate. In the first phase, beyond validating the usefulness and potential of applying the two systems, the study defined the main technological and material components for their implementation within the reference climatic context. This selection proved essential for the subsequent setup and market analysis (Phase 2) and for the product evaluation conducted in accordance with the UNI 8289:1981 framework (Phase 3). The selected products were then evaluated and classified by assigning partial and total scores (Phase 4) using a weighted multi-criteria analysis. The parametric simulations (Phase 5) highlighted the influence of specific thermal-mass factors on the performance of both systems: thickness for the TWS and geometry for the TLVS.

For the TWS, a thickness of 15-20 cm is optimal, reducing heating demand by up to 50% while maintaining low cooling loads. Beyond this threshold, performance tends to decrease, making the use of additional material unnecessary. For the TLVS, CFD analysis showed that geometry strongly influences airflow distribution and thermal gradients. Smooth walls provide only limited cooling (ΔT ≈ -1/-2 °C), while zigzag configurations progressively improve ventilation and heat exchange. The most complex model, with corrugated walls, floor, and ceiling, achieved stable air velocities of 4-5 m/s and temperature

reductions of -6 to -8 °C, demonstrating the potential of surface roughness to enhance convective phenomena and heat transfer.

Overall, the results demonstrate that the two systems, when integrated, offer synergistic benefits: the TWS ensures winter efficiency, while the TLVS provides summer cooling and airflow regulation. Together, they contribute to energy savings and environmental comfort, offering a replicable design methodology aimed at resilient, low-impact buildings. These findings establish a solid foundation for the future application of integrated passive bioclimatic solutions in architectural projects targeting high resilience and climate-mitigation capacity, as in the Rome Technopole pilot project, and outline operational guidelines that combine historical knowledge with advanced simulation tools.

The dissemination of this approach, however, faces several barriers documented in the literature. Among cultural barriers, the lack of awareness of benefits and the limited availability of technical information hinder the adoption of bioclimatic solutions (Furszyfer Del Rio, Sovacool and Griffiths, 2021; Obuseh et alii, 2025). Economic and social barriers arise from high initial costs, lack of incentives, and unequal access, which confine their use mainly to experimental contexts (Vassiliades et alii, 2023). Finally, the absence of rigorous legislation, limited funding and investment for promoting low-carbon solutions, and policy and regulatory gaps further constrain the systematic adoption of bioclimatic technologies (United Nations Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction, 2025; Balali and Yunusa-Kaltungo, 2025).

Future developments of this study could include validating the results by simultaneously applying the two systems to a single simulation model of the entire Rome Technopole building to obtain project-specific data. It should also be noted that the market analysis was conducted only on a national scale, and thus within a limited geographic scope relative to the reference climate. Similarly, the energy simulations considered only a subset of parameters, whereas the whole range could be analysed for system optimisation. The results obtained could therefore be integrated with further simulation activities to examine the impact of additional variables identified in Phase 5 of the methodology.

Acknowledgements

The research is part of the PNRR Rome Technopole National Project, Flagship Project 2 ‘Energy transition and digital transition in urban regeneration and construction’, for which Prof. F. Tucci (‘Sapienza’ University of Rome) is Scientific Supervisor, with particular reference to Thematic Line 1, dedicated to the effects of technological, bioclimatic and energy innovation factors in environmental design on architectural redevelopment and urban regeneration processes.

Notes

- 1) For further information, see the webpage: iea.org/energy-system/buildings/heating [Accessed 12 September 2025].
- 2) The research is part of the National PNRR Flagship Project 2 – ‘Energy transition and digital transition in urban regeneration and construction’; Scientific Supervisor Prof. Fabrizio Tucci (‘Sapienza’ University of Rome).
- 3) Originating and developed in ancient Persia, the qanat is a system of water transport mainly through underground channels, designed explicitly for arid climates; the word itself meant initially ‘channel’.
- 4) Wladimir Köppen was a well-known geographer, botanist, and climatologist. Born in Russia, he spent most of his life in Germany, between 1846 and 1940. The first version of his classification method dates back to 1884, but the final version was developed in 1936 in collaboration with climatologist Rudolf Geiger, with a last revision published in 1961.
- 5) For additional information, visit the webpage: Ladybug tools [Accessed 12 September 2025].
- 6) Cfa – Humid temperate climate with hot summer.
- 7) Csb – Warm temperate climate with hot, dry summers and mild, rainy winters.
- 8) Cfb – Temperate oceanic climate or subtropical highland climate.
- 9) Dwa – Humid continental monsoon-influenced climate with hot summers.

References

A'zamovich, S. K. (2022), “Determination of Rational Values of the Parameters of an Unventilated Trombe Wall Using the Method of Multicriteria Optimization for the Climatic Conditions of Uzbekistan”, in *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, vol. 13, issue 3, pp. 123-134. [Online] Available at: doi.org/10.30880/ijscet.2022.13.03.012 [Accessed 12 September 2025].

Abbassi, F., Naili, N. and Dehmani, L. (2022), “Optimum Trombe wall thickness in the Mediterranean Tunisian context – An energetic and economic study”, in *Energy Science and Engineering*, vol. 10, issue 8, pp. 2930-2939. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ese3.1179 [Accessed 12 September 2025].

Abdelsamea, A., Hassan, H., Shokry, H., Asawa, T. and Mahmoud, H. (2025), “An Innovative Multi-Story Trombe Wall as a Passive Cooling and Heating Technique in Hot Climate Regions – A Simulation-Optimization Study”, in *Buildings*, vol. 15, issue 7, article 1550, pp. 1-36. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15071150 [Accessed 12 September 2025].

Annan, G. R. and Nehme, B. A. (2016), “Energy Efficient Building Design Optimization Using an Underground Thermal Labyrinth”, in *Second International ASHRAE Conference – Efficient Building Design – Materials and HVAC Equipment Technologies*, Maamari Auditorium, American University of Beirut, Liban, September 22-23, 2016, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, New York, pp. 162-167. [Online] Available at: store.asructech.com/standards/energy-efficient-building-design-optimization-using-an-underground-thermal-labyrinth?product_id=1929536&srsId=AfmBOopezUyIzOL2jD_H2cB1fHTkrj6pu7DjmrSSxhIme4LUuKn5j3az#full [Accessed 12 September 2025].

Asdaghi, H. and Fayaz, R. (2023), “Optimal Specifications of a Trombe Wall in Low-Rise Residential Buildings of Mashhad”, in *Applied Solar Energy*, vol. 59, issue 4, pp. 542-556. [Online] Available at: doi.org/10.3103/S0003701X2260117X [Accessed 12 September 2025].

Balali, A. and Yunusa-Kaltungo, A. (2025), “Drivers and barriers to the adoption of passive energy design in buildings”, in *Energy and Buildings*, vol. 328, article 115148, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115148 [Accessed 17 October 2025].

Bori, D. (2006), *Il Raffrescamento Passivo degli Edifici – Tecniche, Tecnologie, Esempi – Cenni di Termofisica Applicata*, Sistemi Editoriali, Napoli.

Briga Sá, A., Boaventura-Cunha, J., Lanzinha, J.-C. and Paiva, A. (2017), “An experimental analysis of the Trombe wall temperature fluctuations for high range climate conditions – Influence of ventilation openings and shading devices”, in *Energy and Buildings*, vol. 138, pp. 546-558. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.085 [Accessed 12 September 2025].

Briga-Sá, A., Paiva, A., Lanzinha, J.-C., Boaventura-Cunha, J. and Fernandes, L. (2021), “Influence of air vents management on Trombe Wall temperature fluctuations – An experimental analysis under real climate conditions”, in *Energies*, vol. 14, issue 16, article 5043, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en14165043 [Accessed 12 September 2025].

Buono, M. (1998), *L'architettura del vento – Soluzioni tecnologiche per il raffrescamento passivo*, CLEAN Edizioni, Napoli.

Cabeza, L. F., Bai, Q., Bertoldi, P., Kihila, J. M., Lucena, A. F. P., Mata, E., Mirasgedis, S., Novikova, A. and Saheb, A. (2023), “Buildings”, in IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2022 – Mitigation of Climate Change – Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, pp. 953-1048. [Online] Available at: doi.org/10.1017/9781009157926.011 [Accessed 12 September 2025].

Caffari, F., Calabrese, N., Murano, G. and Signoretti, P. (eds) (2024), *La consistenza del parco immobiliare nazionale*, ENEA, Roma. [Online] Available at: pubblicazioni.enea.it/download.html?task=download.send&id=698:la-consistenza-del-parco-immobiliare-nazionale&catid=3 [Accessed 12 September 2025].

der Wieden, M. B., Braungardt, S., Hoerner, M. and Bischof, J. (2023), *Minimum Energy Performance Standards for Non-Residential Buildings – EU requirements and national implementation*. [Online] Available at: iwu.de/fileadmin/publikationen/news/2023_IWU_EtAl_Hoerner-EtAl_MEPS-for-NRB.pdf [Accessed 12 September 2025].

Di Turi, S., Ronchetti, L. and Sannino, R. (2023), “Towards the objective of Net ZEB – Detailed energy analysis and cost assessment for new office buildings in Italy”, in *Energy and Buildings*, vol. 279, article 112707, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112707 [Accessed 12 September 2025].

Elsaid, A. M., Hashem, F. A., Mohamed, H. A. and Ahmed, M. S. (2023), “The energy savings achieved by various Trombe solar wall enhancement techniques for heating and cooling applications – A detailed review”, in *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 254, article 112228, pp. 1-50. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112228 [Accessed 12 September 2025].

European Commission (2021), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Fit for 55 – Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality*, document 52021DC 0550, COM/2021/550 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0550 [Accessed 16 September 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2024), *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast)*, document 32024L1275, PE/102/2023/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng [Accessed 12 September 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2021), *Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate*

Law’), document 32021R1119, PE/27/2021/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32021R1119 [Accessed 12 September 2025].

Ferrucci, M. and Peron, F. (2018), “Ancient Use of Natural Geothermal Resources – Analysis of Natural Cooling of 16th Century Villas in Costozza (Italy) as a Reference for Modern Buildings”, in *Sustainability*, vol. 10, issue 12, article 4340, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su10124340 [Accessed 12 September 2025].

Furszyfer Del Rio, D. F., Sovacool, B. K. and Griffiths, S. (2021), “Culture, energy and climate sustainability: the adoption of smart home technologies”, in *Energy Research & Social Science*, vol. 2, article 100035, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100035 [Accessed 17 October 2025].

Ghandi, H. and Leone, M. F. (2024), “The Potential of One-Sided Traditional Windcatchers for Outdoor Use as a Sustainable Urban Feature”, in *Urban Science*, vol. 8, issue 4, article 229, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/urban-sci8040229 [Accessed 12 September 2025].

Givoni, B. (1994), *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*, John Wiley and Sons, Toronto.

Grosjean, A., Touati, K., Alonzo, G., Ravat, H. C., Houot, T., El Mendili, Y., Nougardès, B. and Camara, N. (2025), “Experimental Raw Earth Building for Passive Cooling – A Case Study for Agricultural Application in a Mediterranean Climate”, in *Buildings*, vol. 15, issue 15, article 2603, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15152603 [Accessed 12 September 2025].

Gu, W., Li, G., Xiermaimaiti, A. and Ma, T. (2023), “A review of recent techniques in performance augmentation and evaluation metrics of Trombe walls”, in *Energy and Buildings*, vol. 301, article 113693, pp. 1-34. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113693 [Accessed 12 September 2025].

Hejazi, M. and Hejazi, B. (2013), “Cooling performance of Persian wind towers”, in Brebbia, C. A. (ed.), *Eco-Architecture IV – Harmonisation between Architecture and Nature – ERES 2025 – 14th International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures*, Edinburgh, United Kingdom, June 11-13, 2025, WIT Transaction on Ecology and the Environment, vol. 165, WIT Press, Southampton (UK), pp. 197-207. [Online] Available at: doi.org/10.2495/ARC120181 [Accessed 12 September 2025].

Hernandez-Perez, I., Rodriguez-Ake, A., Saucedo-Carvajal, D., Hernandez-Lopez, I., Kumar, B. and Zavala-Guillen, I. (2025), “Experimental Thermal Assessment of a Trombe Wall Under a Semi-Arid Mediterranean Climate of Mexico”, in *Energies*, vol. 18, issue 1, article 185, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en18010185 [Accessed 12 September 2025].

Hu, Z., He, W., Ji, J. and Zhang, S. (2017), “A review on the application of Trombe wall system in buildings”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 976-987. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.003 [Accessed 12 September 2025].

IEA – International Energy Agency (2023), *Italy 2023 – Energy Policy Review*, IEA, Paris. [Online] Available at: iea.blob.core.windows.net/assets/71b328b3-3e5b-4c04-8a22-3ead575b3a9a/Italy_2023_EnergyPolicyReview.pdf [Accessed 12 September 2025].

IEA – International Energy Agency (2018), *The Future of Cooling – Opportunities for energy-efficient air conditioning*, IEA, Paris. [Online] Available at: iea.blob.core.windows.net/assets/0bb45525-277f-4c9c-8d0c-9c0cb5e7d525/The_Future_of_Cooling.pdf [Accessed 12 September 2025].

Kostikov, S., Grinkov, M. and Yiqiang, J. (2020), “Comparative technical and economic analysis of the Trombe wall use in the heat supply system at different climatic conditions”, in *Journal of Physics | Conference Series*, vol. 1614, article 012064, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012064 [Accessed 12 September 2025].

Laribi, A., Bégot, S., Surdyk, D., Ait-Oumeziane, Y., Lepiller, V., Désévaux, P., El Zein, N. and De Carvalho, A. R. (2025), “Experimental study of the influence of the vents on the thermal performance of a Trombe wall”, in *Energy and Buildings*, vol. 328, article 115176, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115176 [Accessed 12 September 2025].

org/10.1016/j.enbuild.2024.115176 [Accessed 12 September 2025].

Leang, E., Tittlein, P., Zalewski, L. and Lassue, S. (2020), "Impact of a composite Trombe wall incorporating phase change materials on the thermal behavior of an individual house with low energy consumption", in *Energies*, vol. 13, issue 18, article 4872, pp. 1-32. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en13184872 [Accessed 12 September 2025].

Lechner, N. (2008), *Heating, Cooling, Lighting – Sustainable Design Methods for Architects*, John Wiley & Sons, New Jersey.

Licholai, L., Starakiewicz, A., Krasoń, J. and Miąsik, P. (2021), "The influence of glazing on the functioning of a Trombe wall containing a phase change material", in *Energies*, vol. 14, issue 17, article 5243, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en14175243 [Accessed 12 September 2025].

Lohmann, V. and Santos, P. (2020), "Trombe Wall Thermal Behavior and Energy Efficiency of a Light Steel Frame Compartment – Experimental and Numerical Assessments", in *Energies*, vol. 13, issue 11, article 2744, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en13112744 [Accessed 12 September 2025].

Marmion, P., Pradinuk, R., Woods, A., Guity, A. and Rehmanji, I. (2012), "Large Dynamic Thermal Labyrinth – A Step Towards Net Zero Energy Use in Acute Care Hospitals", in *2012 ACEEE | The 17th Biennial ACEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings – Fueling Our Future with Efficiency*, American Council for an Energy-Efficient Economy, Pacific Grove (CA), vol. 13, pp. 215-226. [Online] Available at: aceee.org/files/proceedings/2012/data/papers/0193-000399.pdf [Accessed 12 September 2025].

Matos, A. M., Delgado, J. M. P. Q. and Guimarães, A. S. (2022), "Energy-Efficiency Passive Strategies for Mediterranean Climate – An Overview", in *Energies*, vol. 15, issue 7, article 2572, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en15072572 [Accessed 12 September 2025].

Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadakis, M., Halkos, G., Paravantis, J., Makridis, S. and Papaefthymiou, S. (2022), "Applications of earth-to-air heat exchangers – A holistic review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 155, article 111921, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2021.111921 [Accessed 12 September 2025].

Ministero della Transizione Ecologica (2021), *Strategia per la Riqualificazione Energetica del Parco Immobiliare Nazionale*. [Online] Available at: circabc.europa.eu/ui/group/8f5f9424-a7ef-4dbf-b914-1af1d12ff5d2/library/aa97dcc4-bb5d-423b-b3c7-40ff6d77133b/details [Accessed 12 September 2025].

Ministro dello Sviluppo Economico (2015), *Decreto interministeriale 26 giugno 2015 – Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici – Requisiti specifici per gli edifici esistenti soggetti a riqualificazione energetica – Appendice B (Allegato I, Capitolo 4)*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/normativa/DM_requisiti_minimi_appendiceB.pdf [Accessed 12 September 2025].

Mo, W., Zhang, G., Yao, X., Li, Q. and Debacker, B. J. (2024), "Assessment of Passive Solar Heating Systems' Energy-Saving Potential across Varied Climatic Conditions – The Development of the Passive Solar Heating Indicator (PSHI)", in *Buildings*, vol. 14, issue 5, article 1364, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14051364 [Accessed 12 September 2025].

Montero-Gutiérrez, P., Sánchez Ramos, J., Castro Medina, D., Palomo Amores, T., Guerrero Delgado, M. C. and Álvarez Domínguez, S. (2025), "Exploring a new approach to ancient Qanat techniques using earth-air and water-air heat exchangers for efficient natural cooling", in *Energy Conversion and Management*, vol. 341, article 120066, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120066 [Accessed 12 September 2025].

Obuseh, E., Eyenubo, J., Alele, J., Okpare, A. and Oghogho, I. (2025), "A Systematic Review of Barriers to Renewable Energy Integration and Adoption", in *Journal of Asian Energy Studies*, vol. 9, pp. 26-45. [Online] Available at: doi.org/10.24112/jaes.090002 [Accessed 17 October 2025].

Pourghorban, A. and Asodeh, H. (2022), "The impacts of

advanced glazing units on annual performance of the Trombe wall systems in cold climates", in *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 51, article 101983, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.seta.2022.101983 [Accessed 12 September 2025].

Rim, M., Sung, U.-J. and Kim, T. (2018), "Application of Thermal Labyrinth System to Reduce Heating and Cooling Energy Consumption", in *Energies*, vol. 11, issue 10, article 2762, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en11102762 [Accessed 12 September 2025].

Ritchie, H. (2024), "Air conditioning causes around 3% of greenhouse gas emissions – How will this change in the future?", in *Our World in Data*, 29/07/24. [Online] Available at: ourworldindata.org/air-conditioning-causes-around-greenhouse-gas-emissions-will-change-future [Accessed 12 September 2025].

Rome Technopole (2024), *Flagship Project 2 – Transizione energetica e transizione digitale nella rigenerazione urbana e nell'edilizia*. [Online] Available at: rometechnopole.it/progetti-flagship-project-2/ [Accessed 12 September 2025].

Samiev, K. A. and Halimov, A. S. (2022), "Annual Thermal Performance of the Trombe Wall with Phase Change Heat Storage under Climate Conditions of Uzbekistan", in *Applied Solar Energy*, vol. 58, issue 2, pp. 297-305. [Online] Available at: doi.org/10.3103/S0003701X22020189 [Accessed 12 September 2025].

Simões, N., Manaia, M. and Simões, I. (2021), "Energy performance of solar and Trombe walls in Mediterranean climates", in *Energy*, vol. 234, article 121197, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.energy.2021.121197 [Accessed 12 September 2025].

Song, S.-Y., Song, J.-H. and Lim, J.-H. (2014), "Effectiveness of a thermal labyrinth ventilation system using geothermal energy – A case study of an educational facility in South Korea", in *Energy for Sustainable Development*, vol. 23, pp. 150-164. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.esd.2014.07.008 [Accessed 12 September 2025].

Somek, K., Papis-Frączek, K., Calise, F., Cappiello, F. L. and Vicidomini, M. (2023), "A Review of Experimental and Numerical Analyses of Solar Thermal Walls", in *Energies*, vol. 16, issue 7, article 3102, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en16073102 [Accessed 12 September 2025].

Tucci, F. (2021), *Adaptive Design – Spazi solari e bioclimatici in Architettura | Solar and bioclimatic spaces in Architecture*, Altralinea Editrice, Firenze.

Tucci, F. (2020a), *Atlante dei sistemi tecnologici per l'Architettura bioclimatica – Ventilazione naturale in Architettura | Atlas of Technological Systems for Bioclimatic Architecture – Natural Ventilation in Architecture*, Altralinea Editrice, Firenze.

Tucci, F. (2020b), *Atlante dei sistemi tecnologici per l'Architettura bioclimatica – Riscaldamento passivo in Architettura | Atlas of Technological Systems for Bioclimatic Architecture – Passive Heating in Architecture*, Altralinea Editrice, Firenze.

Tucci, F. (2018), *Costruire e Abitare Green – Approcci, Strategie, Sperimentazioni per una Progettazione Tecnologica Ambientale | Green Building and Dwelling – Approaches, Strategies, Experimentation for an Environmental Technological Design*, Altralinea Editrice, Firenze.

Tucci, F. (2009), *Tecnologia e Natura – Gli insegnamenti del mondo naturale per il progetto di architettura bioclimatica*, Altralinea Editrice, Firenze.

UNEP – United Nations Environment Programme (2023), *Global Cooling Watch 2023 – Keeping it Chill – How to meet cooling demands while cutting emissions*. [Online] Available at: wedocs.unep.org/20.500.11822/44243 [Accessed 12 September 2025].

UNI 8290-1:1981 + A122:1983, *Residential building – Building Elements. Classification and Terminology*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-8290-1-1981-a122-1983 [Accessed 12 September 2025].

UNI 8289:1981, *Building – Functional Requirements of Final Users – Classification*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-8289-1981 [Accessed 12 September 2025].

UNI EN 16798-1:2019, *Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1 – Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal en-*

vironment, lighting and acoustics – Module M1-6. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-16798-1-2019 [Accessed 12 September 2025].

UNI EN ISO 15265:2005, *Ergonomics of the thermal environment – Risk assessment strategy for the prevention of stress or discomfort in thermal working conditions*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-15265-2005 [Accessed 12 September 2025].

UNI EN ISO 13790:2008, *Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-13790-2008 [Accessed 12 September 2025].

United Nations Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction (2025), *Not just another brick in the wall – The solutions exist – Scaling them will build on progress and cut emissions fast – Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025*. [Online] Available at: wedocs.unep.org/20.500.11822/47214 [Accessed 17 October 2025].

Vassiliades, C., Christos M., Olga-Eleni A., Barone G. and Vardopoulos, I. (2023), "Socio-Economic Barriers to Adopting Energy-Saving Bioclimatic Strategies in a Mediterranean Sustainable Real Estate Setting – A Quantitative Analysis of Resident Perspectives", in *Energies*, vol. 16, issue 24, article 7952, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en16247952 [Accessed 17 October 2025].

Volkova, A. (2024), *Energy efficiency indicators for heat supply sector*. [Online] Available at: odyssee-mure.eu/publications/policy-brief/european-heat-supply.pdf [Accessed 12 September 2025].

Wang, D., Hu, L., Du, H., Liu, Y., Huang, J., Xu, Y. and Liu, J. (2020), "Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe walls", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 124, article 109772, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2020.109772 [Accessed 12 September 2025].

Xiao, Y., Yang, Q., Fei, F., Li, K., Jiang, Y., Zhang, Y., Fukuda, H. and Ma, Q. (2024), "Review of Trombe wall technology – Trends in optimisation", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 200, article 114503, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2024.114503 [Accessed 12 September 2025].

Xiong, J., Yao, R., Grimmond, S., Zhang, Q. and Li, B. (2019), "A hierarchical climatic zoning method for energy efficient building design applied in the region with diverse climate characteristics", in *Energy and Buildings*, vol. 186, pp. 355-367. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.005 [Accessed 12 September 2025].

Zhang, T., Wang, H., Ding, J., Tang, S., Yuan, D. and Rao, Y. (2025), "Transient Simulation of the Thermal Performance of a Novel Phase Change Material Trombe Wall", in *Coatings*, vol. 15, issue 3, article 303, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.3390/coatings15030303 [Accessed 12 September 2025].

Zhou, S., Song, M., Shan, K., Zhang, L., You, B. and Razapqur, A. G. (2024), "Heating and energy performances of a dynamic Trombe wall incorporating phase change materials under different operation modes", in *Journal of Building Engineering*, vol. 95, article 1101201, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2024.110201 [Accessed 12 September 2025].