

La borsa di dottorato è stata cofinanziata con risorse del Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020 (CCI 2014/T16M2OP005), Fondo Sociale Europeo, Asse IV «Istruzione e ricerca per il recupero» – Azione IV.4 – «Dottorati e contratti di ricerca su tematiche dell'innovazione» e Azione IV.5 «Dottorati su tematiche Green del PON R&I 2014-2020



UNIONE EUROPEA  
Fondo Sociale Europeo



## UNIVERSITA' DEGLI STUDI DEL MOLISE

DIPARTIMENTO DI MEDICINA E SCIENZE DELLA SALUTE "VINCENZO TIBERIO"

Dottorato di Ricerca in Medicina Traslazionale Clinica

SETTORE SCIENTIFICO DISCIPLINARE IIND-07/B – FISICA TECNICA AMBIENTALE

CICLO XXXVII

Tesi di Dottorato

### SOLUZIONI INNOVATIVE MULTIFUNZIONALI E BIOCOMPATIBILI PER LA PROGETTAZIONE SOSTENIBILE E IL MANAGEMENT DEGLI EDIFICI OSPEDALIERI NELL'ERA POST – COVID

Coordinatore:

Chiar.mo Prof. Giovanni Scapagnini

Tutor:

Chiar.mo Prof. Giuseppe Peter Vanoli

Candidata:

Nicoletta Del Regno

ANNO ACCADEMICO

2023/2024



*“La donna è stata bloccata per secoli.  
Quando ha accesso alla cultura è come un’affamata.  
E il cibo è molto più utile a chi è affamato rispetto a chi è già saturo.”*

Rita Levi Montalcini.

Ai miei genitori, che mi hanno trasmesso lo spirito del sacrificio e della determinazione.

A Emilio, pilastro della mia vita.

A Rosetta, esempio di Donna libera e “combattente”.

## Sommario

<b>Abstract: struttura, metodologia e risultati della ricerca</b> .....	6
<b>CAPITOLO 1: La sostenibilità ambientale nell'edilizia ospedaliera</b> .....	10
<b>1.1. Overview sui cambiamenti climatici e l'impatto degli edifici</b> .....	10
<b>1.2. I consumi energetici nel settore ospedaliero</b> .....	11
<b>1.3. Regolamenti e legislazione internazionale</b> .....	12
<b>1.3.1. Strategie europee per l'efficienza energetica in edilizia</b> .....	13
<b>1.3.2. Quadro normativo italiano</b> .....	15
<b>1.3.3. La legislazione delle strutture ospedaliere</b> .....	17
<b>1.4. Valutazione delle performance delle strutture ospedaliere: alcuni indicatori sanitari</b> .....	21
<b>1.5. Analisi di settore e ricerca di benchmark dei consumi energetici</b> .....	22
<b>CAPITOLO 2: Approccio metodologico per la sostenibilità degli edifici</b> .....	24
<b>2.1. I software di simulazione energetica</b> .....	24
<b>2.1.1. I fabbisogni energetici</b> .....	25
<b>2.1.2. Le condizioni interne – analisi CFD</b> .....	28
<b>2.2. Introduzione generale sui materiali e le tecnologie innovative</b> .....	29
<b>2.3. Linee guida per la diagnosi energetica degli ospedali</b> .....	32
<b>CAPITOLO 3: Soluzioni innovative per la progettazione sostenibile</b> .....	43
<b>3.1. Geopolimeri e materiali a cambiamento di fase</b> .....	43
<b>3.1.1. Ottimizzazione numerica per la progettazione di pareti in calcestruzzo geopolimerico con materiali a cambiamento di fase nel clima mediterraneo</b> .....	54
<b>3.1.2. Presentazione del caso studio</b> .....	55
<b>3.1.3. Caratteristiche dei PCM selezionati</b> .....	59
<b>3.1.4. Modello numerico</b> .....	62
<b>3.1.5. Analisi dei risultati della simulazione</b> .....	64
<b>3.1.5.1. Analisi parametrica con PCM sul lato interno</b> .....	64
<b>3.1.5.2. Analisi parametrica con PCM sul lato esterno</b> .....	67
<b>3.1.5.3. Applicazione di materiali PCM su entrambi i lati</b> .....	70
<b>3.1.6. Soluzione dell'ottimizzazione multi-obiettivo</b> .....	72
<b>3.2. Pacchetto parete innovativo in materiale a cambiamento di fase macroincapsulato e calcestruzzo geopolimerico: analisi termica in campo per un clima mediterraneo</b> .....	74
<b>3.2.1. Materiale a cambiamento di fase selezionato</b> .....	75
<b>3.2.2. Impostazione dell'apparato sperimentale</b> .....	80
<b>3.2.3. Risultati dell'attività sperimentale</b> .....	82
<b>3.2.3.1. Comportamento termodinamico in campo del PCM</b> .....	82
<b>3.2.3.2. Prestazioni del pacchetto parete</b> .....	85

3.2.3.3.	Attenuazione dello stress termico .....	92
3.2.3.4.	Energia immagazzinata e rilasciata .....	93
3.3.	Componenti trasparenti innovativi .....	94
3.3.1.	Impatto del sistema di vetratura sulla prestazione energetica di un edificio nZEB in scenari di cambiamento climatico .....	95
3.3.2.	Risultati .....	97
3.4.	L'incidenza del sistema di illuminazione sulla sensazione di comfort termico: valutazione sperimentale .....	101
3.4.1.	Risultati .....	105
<b>CAPITOLO 4: La sostenibilità energetica e il management delle strutture ospedaliere .....</b>		<b>108</b>
4.1.	L'importanza di investire nella riqualificazione energetica degli ospedali: risultati di un caso studio in un clima mediterraneo .....	108
4.2.	Diagnosi energetica e riqualificazione di edifici ad alta intensità: metodo .....	110
4.2.1.	Caso studio sull'audit energetico .....	112
4.2.2.	Layout dell'impianto di climatizzazione e di illuminazione .....	116
4.2.3.	Consumi energetici .....	120
4.2.4.	Qualità dell'energia nello stato di fatto .....	122
4.2.5.	Calibrazione del modello dell'edificio .....	123
4.2.6.	Indicatori energetici .....	124
4.2.7.	Progettazione degli interventi di efficienza .....	125
4.2.8.	Miglioramento del sistema edificio-HVAC .....	127
4.3.	Progettare il retrofit attraverso indici di comfort termico: studio numerico e sperimentale in un blocco operatorio di un ospedale italiano .....	128
4.3.1.	Approccio metodologico .....	133
4.3.2.	Risultati .....	139
4.4.	Revisione degli impianti HVAC installati nelle strutture sanitarie: analisi critica del peso di ogni sottosistema .....	154
4.4.1.	Sottosistema di generazione .....	157
4.4.2.	Sottosistema di distribuzione .....	161
4.4.3.	Sottosistema di regolazione .....	162
4.4.4.	Sottosistema di emissione .....	164
4.5.	Efficienza energetica negli ospedali: analisi comparativa di diverse configurazioni .....	165
4.5.1.	Modello numerico e calibrazione .....	172
4.5.2.	Le configurazioni HVAC proposte .....	173
4.5.3.	Risultati .....	178
4.6.	Importanza della progettazione degli emettitori di aria nelle strutture sanitarie: mappe fluidodinamiche computazionali .....	183
4.6.1.	Risultati CFD .....	185

<b>CONCLUSIONI</b> .....	188
<b>LISTA DEGLI ARTICOLI</b> .....	195
<i>Bibliografia</i> .....	196
<b>INDICE DELLE FIGURE</b> .....	219
<b>INDICE DELLE TABELLE</b> .....	222

## **Abstract: struttura, metodologia e risultati della ricerca**

L'Italia come tutta l'Europa sta attraversando una grande fase di trasformazione socio-economica che punta ad una vera trasformazione nel sistema decisionale, nel sistema produttivo e soprattutto nello stile di vita delle persone. Si tratta di un cambiamento urgente per combattere i devastanti effetti sulla salute e l'ecosistema ed il clima che l'inquinamento umano sta perpetuando negli anni. Sono, quindi, necessarie soluzioni radicali con le quali affrontare sfide essenziali per il pianeta e per l'umanità: dalla decarbonizzare del settore civile ed industriale per combattere riscaldamento globale alla promozione di un'economia circolare per preservare le risorse e salvaguardare la biodiversità.

Elemento centrale del pacchetto "Fit for 55" dell'Ue è quello di rendere l'Europa climaticamente neutra entro il 2050 e la revisione della EPBD (Energy Performance of Building Directive) mira a portare il parco immobiliare europeo a zero emissioni (ZEB) entro il 2050.

Il tema della sostenibilità ambientale nel settore edilizio comprende due aspetti: il rapporto tra l'edificio e l'ambiente circostante e il rapporto tra l'edificio e i suoi occupanti. Un edificio determina impatti sull'ambiente non solo all'atto della costruzione, ma anche lungo tutto il processo, dall'approvvigionamento delle materie prime, produzione e trasporto, fino alla dismissione e smaltimento delle macerie. Tuttavia anche l'uso dell'edificio stesso, nel garantire condizioni di comfort e benessere interno, contribuisce notevolmente a generare questo impatto. Anche l'edilizia ospedaliera deve rientrare nel processo di efficientamento energetico, soprattutto perché è tra le utenze più energivore del settore edile. L'ambiente ospedaliero è, però, un sistema molto complesso in cui molteplici fattori di rischio chimici, fisici e microbiologici, possono interagire reciprocamente tanto da determinare un'alterazione delle condizioni di comfort e di salubrità sia dell'utente che del personale. L'emergenza sanitaria da Covid-19 ha sottolineato ancora di più questi aspetti.

Gli ospedali, come tutti gli edifici ad alta densità tecnologica, sono soggetti nel tempo a forti necessità di rinnovamento delle attrezzature e ad alti indici di variazioni delle destinazioni d'uso degli ambienti. Di qui l'esigenza di non pensare mai l'ospedale come una struttura statica e chiusa, finalizzata ad una precisa ed immutabile organizzazione sanitaria, bensì ad un organismo quanto più è possibile elastico nei confronti degli imprevedibili programmi sanitari e quanto più possibile aperto verso modificazioni ed ampliamenti. Gli impianti tecnologici costituiscono uno degli aspetti più critici e delicati, dal momento che l'impostazione metodologica, formalmente corretta, che ambisce a realizzare un organismo edilizio fortemente flessibile, impone che gli impianti siano progettati in modo idoneo a servire la specifica attività sanitaria, ma nel contempo siano strutturati per consentire futuri adattamenti e/o riconversioni senza interventi fortemente distruttivi, invasivi ed eccessivamente onerosi.

In Italia vi sono circa 1550 ospedali e case di cura di cui circa il 60% pubblici e il restante 40% privati. In merito alla vetusta degli edifici che compongono il suddetto patrimonio edilizio, non esistono dati aggiornati e affidabili; ciò è dovuto al fatto che gli ospedali sono organismi complessi, spesso composti da edifici e da corpi realizzati in epoche diverse e poi soggetti a ripetuti interventi più o meno radicali che ne influenzano in maniera variabile l'età reale. Vale comunque la pena precisare che nel 1990, al momento dell'avvio del programma pluriennale di riqualificazione del nostro patrimonio edilizio sanitario, sancito, come è noto, dal

famoso articolo 20 della legge finanziaria del 1988, venne effettuato un censimento, in base al quale “la maggior parte dei presidi era definibile come scadente o mediocre”. Risultava, inoltre:

- il 26% degli ospedali italiani era ospitato in presidi di altra origine, come, ad esempio, monasteri;
- il 57% era stato edificato prima del 1940 e l'età media degli edifici era di circa 62 anni, con impianti inadeguati alle norme di sicurezza. Nel 2001, circa dieci anni dopo, è stata fatta un'altra ricognizione sul “modello ospedale tipo”, i cui dati, oggi certamente superati, hanno consolidato la consapevolezza che il nostro patrimonio ospedaliero pubblico è assolutamente obsoleto.

Nell'edilizia ospedaliera, in particolare, la progettazione di interventi per il risparmio energetico deve avvenire nell'ottica irrinunciabile della progettazione integrata del sistema edificio – impianti, poiché da un lato il controllo del microclima deve essere operato sia dall'impianto che dall'involucro, dall'altro è altresì necessario selezionare i sistemi impiantistici in funzione delle loro necessità gestionali e manutentive, principalmente in modo da non interferire con il ciclo di funzionamento continuo dell'edificio.

Intervenire su questo settore, però, significa considerare contemporaneamente sia la normativa attualmente vigente in materia di risparmio energetico in edilizia, sia le norme di progettazione specifiche per le strutture sanitarie, aspetti questi talvolta contrastanti tra di loro. Le norme e le leggi per la progettazione delle strutture ospedaliere, infatti sono molteplici e riguardano svariati campi di applicazione, data la complessità e l'importanza sociale della struttura. Il controllo dei parametri che influenzano il benessere ambientale e microclimatico all'interno di un ambiente e le strategie di controllo di tali grandezze – mediante il ricorso ad opportuni impianti di climatizzazione e ventilazione – presentano le maggiori difficoltà applicative proprio nell'ambito dell'edilizia ospedaliera caratterizzata, da una parte, dalla necessità di massimo rigore nel controllo ambientale e, dall'altra, da una complessità funzionale elevatissima, con destinazioni d'uso variegata e che richiedono diverse condizioni microclimatiche.

C'è da dire che gli ospedali sono edifici altamente omogenei: un ospedale consuma da due a cinque volte più energia di un qualsiasi altro edificio del terziario e in Europa un insieme di 15000 ospedali è responsabile di almeno il 5% delle emissioni totali annue di anidride carbonica. Per questo, intervenire sulla gestione degli impianti di climatizzazione e riscaldamento (i sistemi HVAC) rappresenta una delle più grandi sfide del settore. In generale, gli impianti di climatizzazione hanno la funzione di controllare i seguenti parametri: temperatura dell'aria, umidità relativa, portata minima di aria esterna, sovrappressione o depressione di un ambiente rispetto all'esterno e/o ad ambienti limitrofi e, nel caso di strutture ospedaliere, anche la concentrazione dei contaminanti e la presenza di virus e batteri presenti nell'aria esterna e/o prodotti all'interno degli ambienti. Inoltre l'impianto di climatizzazione dovrebbe essere in grado di bilanciare condizioni di temperatura e umidità differenti sia tra reparto e reparto che in quasi ogni singolo ambiente, non solo per le diverse condizioni di carico che possono verificarsi, ma proprio per esigenze operative intrinseche alla destinazione d'uso dell'ambiente. È facile intuire che a rendere particolarmente complessa la progettazione sono soprattutto i tassi di aria di rinnovo richiesti in ciascun ambiente, cui si aggiunge spesso la necessità di evitare il ricircolo dell'aria o il mescolamento tra volumi di aria provenienti da ambienti diversi e di fornire, in rapporto alle esigenze di reparto, aria sterile con l'utilizzo di sofisticati sistemi di filtrazione.

In generale, la ricerca scientifica svolta durante il periodo di dottorato si è concentrata principalmente sulla riqualificazione energetica di ospedali esistenti nelle regioni Campania e Molise, sia dal punto di vista impiantistico che dal punto di vista strutturale, nonché al miglioramento delle condizioni di comfort di personale e pazienti nelle degenze ospedaliere.

In particolare, il lavoro di questi anni può essere suddiviso in due macro-argomenti:

- 1) Il management energetico delle strutture ospedaliere;
- 2) Le soluzioni innovative per la progettazione sostenibile.

In questa introduzione si andrà a fornire una panoramica generale degli argomenti trattati.

## IL MANAGEMENT ENERGETICO DELLE STRUTTURE OSPEDALIERE

Per poter capire se un generico edificio è efficiente dal punto di vista energetico è necessario, innanzitutto, andare a fare una corretta diagnosi energetica. La diagnosi energetica si basa, essenzialmente, su una analisi che è finalizzata a definire lo stato di fatto dell'edificio dal punto di vista energetico-prestazionale, individuando quelli che potrebbero essere gli interventi di riqualificazione energetica da promuovere al fine di aumentare l'efficienza energetica dell'edificio stesso.

Una prima fase della ricerca ha dunque riguardato la messa a punto di una metodologia per realizzare la diagnosi energetica di strutture ospedaliere tenendo conto dei tre aspetti chiave: benessere, risparmio energetico e riduzione degli impatti ambientali. Particolare attenzione è stata posta alla diagnosi degli impianti in quanto facendo una analisi dettagliata della letteratura, attraverso una review, è emerso che usualmente ci si concentra solo sul sistema di generazione trascurando l'efficienza degli altri sottosistemi che invece concorrono all'efficienza globale del sistema. Considerando questa criticità, durante il dottorato sono stati realizzati approfonditi studi sulla tipologia di interventi da realizzare ai diversi sottosistemi utilizzando come caso studio un edificio ospedaliero situato ad Isemia, l'ospedale "Ferdinando Veneziale".

Durante la fase di progettazione di interventi di riqualificazione energetica di strutture sanitarie sono da tenere in considerazione anche le condizioni di comfort sia dei pazienti che del personale sanitario. Proprio per tenere in considerazione tali condizioni, è stato condotto uno studio per valutare l'efficacia delle misure di efficienza sull'involucro edilizio basato sulla minimizzazione/massimizzazione di un indice ottimale per descrivere le condizioni interne. Come caso studio è stato considerato il reparto di chirurgia dell'ospedale "A. Cardarelli", a Campobasso. Sono stati valutati diversi indici, che derivano da importanti studi nel campo del comfort termico. Questi indici sono stati valutati a partire dalla variabile misurata all'interno di due stanze e confrontati con il voto di sensazione termica fornito dai pazienti. Le fasi analitiche e sperimentali suggeriscono che il voto medio previsto non è adeguato a descrivere le condizioni termiche all'interno dei reparti di chirurgia. La parte numerica, invece, indica che, in base alla percezione di comfort, ci sono scelte diverse per quanto riguarda la selezione delle misure di efficienza energetica. Infatti l'isolamento delle pareti esterne non è vantaggioso perché aumenterebbe il discomfort termico. Anzi l'adozione di schermature orizzontali sembra la soluzione più adeguata perché si può ridurre la temperatura media operativa di oltre 1°C e ottenere una distribuzione più simmetrica delle variabili interne. Per lo stesso caso studio, è stata, inoltre, eseguita una simulazione fluidodinamica computazionale con un modello dinamico al fine di studiare l'influenza di diverse posizioni

degli emettitori di aria, nonché l'efficienza di ventilazione in base a diverse configurazioni di alimentazione dell'aria.

#### LE SOLUZIONI INNOVATIVE PER LA PROGETTAZIONE SOSTENIBILE

Per migliorare l'efficienza e le prestazioni energetiche bisogna considerare l'edificio anche dal punto di vista strutturale. La ricerca sui materiali innovativi è di grande interesse in relazione agli obiettivi di risparmio energetico e di riduzione dell'impatto ambientale previsti dalla strategia europea. In questo contesto, l'adozione dei materiali a cambiamento di fase (PCM) è una soluzione promettente per il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici e del comfort interno, mentre l'integrazione del calcestruzzo geopolimerico (GPC) consente di riciclare i materiali e di ridurre la domanda di materie prime nella produzione di calcestruzzo stesso. Entrambi i materiali contribuiscono a ridurre le emissioni di anidride carbonica nel ciclo di vita dell'edificio. Al fine di definire un pacchetto di pareti in calcestruzzo geopolimerico e materiale a cambiamento di fase in grado di fornire soluzioni sostenibili per le prestazioni degli edifici in climi mediterranei, è stata proposta una analisi a due fasi per determinare la configurazione ottimale di un caso studio reale caratterizzato dalla stazione sperimentale MATRIX (Multi Activity Test-Room for Innovating<sup>X</sup>), una test-room di grande scala a servizio del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio. MATRIX è una sala prove di grandi dimensioni (36 m<sup>2</sup>). Durante il dottorato, infatti, una parte delle ricerche è stata condotta in collaborazione con il gruppo di Fisica Tecnica Ambientale della suddetta Università, proseguendo il lavoro iniziato durante il tirocinio per la tesi Magistrale.

Altri aspetti da non sottovalutare sono l'impatto del sistema di vetrate che caratterizza l'edificio stesso e il sistema di illuminazione presente all'interno dell'edificio oggetto di studio. Per approfondire entrambe le tematiche sono stati realizzati studi sperimentali in collaborazione con il gruppo dell'Università degli Studi del Sannio presso l'edificio BNZEB, un edificio a energia quasi zero costruito a Benevento.

# CAPITOLO 1: La sostenibilità ambientale nell'edilizia ospedaliera

## 1.1. Overview sui cambiamenti climatici e l'impatto degli edifici

In questa sezione verrà presentata una visione globale sui cambiamenti climatici causati dall'antropizzazione. Più in dettaglio, vengono esposti lo stato attuale, le cause e le possibili strategie di mitigazione del riscaldamento globale e dell'effetto di isola di calore urbano, con particolare attenzione al settore edilizio (residenziale e terziario). La natura cruciale di questo settore risiede in due aspetti fondamentali. Il primo è il suo forte peso nel bilancio energetico globale e di conseguenza nelle emissioni di gas climalteranti, nonché nella creazione dell'isola di calore. Il secondo risiede nel suo trend di crescita futura, che è in aumento, sia nei paesi industrializzati che in quelli in via di sviluppo. Lo sviluppo del settore edilizio è strettamente legato alla crescita della popolazione e all'urbanizzazione.

Secondo i dati pubblicati dal Dipartimento degli Affari Economici e Sociali delle Nazioni Unite [1], nel 2018 il 55% della popolazione mondiale risiedeva nelle aree urbane. Nel 1950 solo il 30% della popolazione mondiale risiedeva nelle aree urbane e si prevede che entro il 2050 il 68% della popolazione sarà nelle aree urbane. Oggi, le regioni più urbanizzate includono l'America Settentrionale (nel 2018 l'82% della sua popolazione viveva nelle aree urbane), l'America Latina (81%), l'Europa (74%) e l'Oceania (68%). Il livello di urbanizzazione in Asia, nel 2018, si avvicinava al 50%. Al contrario, l'Africa è rimasta per lo più rurale, infatti nel 2018 solo il 43% della sua popolazione viveva nelle aree urbane. L'urbanizzazione porta a un aumento molto elevato dell'uso di energia perché la crescita della popolazione e l'aumento della prosperità consentono alle persone di vivere e lavorare in maggiore comfort. Un aumento dell'1% del PIL pro capite porta a un aumento uguale (1.03) del consumo di energia. Tuttavia, un aumento della popolazione urbana dell'1% aumenta il consumo di energia del 2.2%, ovvero il tasso di variazione dell'uso di energia è il doppio del tasso di variazione dell'urbanizzazione [2].

Gli studi hanno dimostrato che l'urbanizzazione della città influisce sul tasso di aumento dell'intensità dell'isola di calore urbana. Per cui l'entità dell'aumento della temperatura ambiente urbana dipende da molti fattori, tutti legati al processo di urbanizzazione, in aumento, soprattutto per le nazioni che hanno in atto l'industrializzazione come la Cina e l'India. Inoltre le cause del riscaldamento urbano, che sono molteplici e complesse, sono spesso collegate agli stessi effetti che producono. Ad esempio, i gas serra emessi dai dispositivi di conversione energetica degli edifici influenzano il riscaldamento globale e l'isola di calore, aumentando la temperatura dell'ambiente, che di conseguenza potrebbe determinare una richiesta crescente di energia (per necessità di raffreddamento) innescando un loop. Infatti, la variazione percentuale delle richieste di energia per un aumento di 2°C di temperatura per regione si traduce in un aumento delle richieste di energia di raffreddamento tra il 20% e il 70% e in una diminuzione delle richieste di energia di riscaldamento tra il 16% e il 90% [3]. Il consumo energetico futuro per il raffreddamento è determinato dalla popolazione, dalla dimensione delle abitazioni, dai gradi giorno di raffreddamento, dal prodotto interno lordo e dall'efficienza delle apparecchiature [4].

Considerando le previsioni esistenti dei consumi di energia di raffreddamento negli edifici residenziali, è previsto un aumento molto significativo e continuo della futura domanda di raffreddamento residenziale per i

prossimi anni. Ad esempio, nel 2030 si prevede che gli USA e l'Europa saranno i maggiori consumatori di energia legata al raffreddamento, mentre nel 2050 e nel 2100 la domanda più elevata è prevista per l'Asia. In termini assoluti, il più alto incremento della domanda di energia per il raffreddamento è previsto nei paesi asiatici, in particolare in India e in Cina, a causa dell'importante impatto del cambiamento climatico, dell'aumento della popolazione e di conseguenza della più alta richiesta di energia legata all'aria condizionata. In sintesi si può, quindi, dire che il settore dell'edilizia è responsabile delle emissioni di CO<sub>2</sub> legate all'energia, la maggior parte delle quali derivano dal consumo diretto di combustibili fossili. Kuramochi et al. [5] hanno stimato che per raggiungere l'obiettivo di 1.5°C è necessario ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> negli edifici dell'89-90% entro il 2050. Di conseguenza, le nuove costruzioni devono essere prive di combustibili fossili e a energia quasi zero a partire dal 2020, mentre è necessario aumentare il tasso di ristrutturazione energetica degli edifici esistenti al 5% annuo nei Paesi OCSE. Le misure tecniche e le pratiche che consentono una profonda riduzione delle emissioni includono diverse opzioni di efficienza energetica. Nel settore dell'edilizia, le strategie di mitigazione della CO<sub>2</sub> sono:

2. riduzione del consumo di energia attraverso:
  - a. la riduzione della domanda di riscaldamento e raffreddamento migliorando le caratteristiche termiche dell'involucro edilizio;
  - b. utilizzo dei sistemi HVAC, attrezzature, illuminazione ed elettrodomestici più efficienti;
  - c. sviluppo di tecnologie intelligenti, al fine di ottimizzare la gestione degli edifici;
3. elettrificazione, sostituendo i combustibili ad alta intensità di carbonio, come il petrolio e il carbone [6];
4. installazione di impianti alimentati da fonti rinnovabili;
5. riduzione dell'energia incorporata nei materiali da costruzione [7], attraverso un maggiore utilizzo di materiali a base biologica.

Infine per quanto riguarda il settore sanitario si stima che esso contribuisce per il 4-5 % delle emissioni nette globali [8].

### **1.2. I consumi energetici nel settore ospedaliero**

Dai dati ricavati dal BPIE (Building Performance Institute Europe) emerge che il 25% degli edifici europei è rappresentato da edifici non residenziali. Di questo, il 7% è rappresentato da ospedali [9]. La maggior parte degli edifici (circa il 75%) dal punto di vista energetico non è efficiente. Questo significa che l'energia, in buona parte, viene persa. Una strategia di riduzione dei consumi e delle emissioni di anidride carbonica è quella di andare a ristrutturare gli edifici esistenti [10].

Dal punto di vista energivoro gli ospedali sono molto complessi infatti hanno un consumo energetico totale del 10% [9] con contributo alle emissioni di anidride carbonica del 5% [11]. Le strutture ospedaliere sono state progettate per migliorare la salute dei pazienti e per rispettare l'ambiente, in realtà stanno contribuendo al problema che cercano di risolvere e gli effetti negativi sono proporzionali all'età media delle strutture stesse. Infatti, il patrimonio sanitario edilizio europeo risale, per circa il 60%, agli anni '80 del secolo scorso e solo il

15% di essi è stato costruito dopo il 2000 [12]. In Italia, invece, circa il 4% degli edifici ospedalieri è stato costruito prima del 1950, il 66% tra il 1950 e gli anni 2000 e solo il 30% dei complessi ospedalieri è stato edificato negli ultimi venti anni [13]. La natura vecchia e obsoleta delle strutture sanitarie italiane consente un enorme spreco di energia da parte delle stesse, legate soprattutto alla richiesta di riscaldamento e raffreddamento degli ambienti per tutto l'anno, causate soprattutto dalla necessità di alti tassi di ventilazione e requisiti severi di controllo ambientale interno [14]-[16]. Durante la pandemia da Covid-19, la domanda di energia, nei diversi settori, è diminuita drasticamente, fatta eccezione per il settore sanitario la cui domanda di energia è risultata più alta del solito [17] a causa dell'aumento dei ricoveri e dell'utilizzo di numerose apparecchiature sanitarie.

### **1.3. Regolamenti e legislazione internazionale**

Per promuovere lo sviluppo di un sistema energetico sostenibile, competitivo e decarbonizzato, sono state messe in atto alcune azioni nazionali e internazionali.

Nel 1988 è stato creato l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), un comitato scientifico di alto livello che studia le ragioni, gli impatti del cambiamento climatico e le possibili soluzioni al problema.

Nel 1992 è stata adottata la United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), con l'obiettivo di stabilire limiti per le concentrazioni di gas serra nell'atmosfera. Da allora sono stati riconosciuti gli effetti negativi del cambiamento climatico sulla popolazione mondiale. Si è presa consapevolezza che le attività umane hanno aumentato significativamente i livelli di gas climalteranti, causando un ulteriore riscaldamento della superficie terrestre e potenziali danni agli ecosistemi naturali e alle persone.

I paesi sviluppati sono stati storicamente responsabili della maggior parte delle emissioni globali, mentre le emissioni dei paesi in via di sviluppo sono relativamente basse, ma si prevede che cresceranno per soddisfare le loro esigenze sociali e di sviluppo. L'UNFCCC enfatizza la cooperazione internazionale e differenzia le responsabilità nell'affrontare il cambiamento climatico. Il Protocollo di Kyoto, uno strumento chiave per l'attuazione dell'UNFCCC, è stato adottato alla terza sessione della Conference of Parties (COP3) tenutasi a Kyoto, in Giappone, nel 1997. Attraverso questo protocollo i paesi si sono impegnati a raggiungere specifici obiettivi di riduzione delle emissioni e hanno esplorato meccanismi per mitigare gli impatti del cambiamento climatico. Ha segnato un passo significativo verso un'azione globale contro il cambiamento climatico.

L'ultima Conference of Parties degna di nota si è tenuta a Parigi nel 2015, la COP21. Durante questa Conferenza è stato negoziato l'Accordo di Parigi, un accordo globale sulla riduzione del cambiamento climatico, il cui testo rappresenta un consenso dei rappresentanti delle 195 parti partecipanti. L'obiettivo principale dell'Accordo di Parigi è quello di mantenere l'aumento della temperatura globale "ben al di sotto dei 2°C", con la raccomandazione di fare di più (per uno scenario inferiore a 1.5°C). Una delle disposizioni chiave dell'accordo è la creazione di un meccanismo di revisione per gli impegni di diversi paesi, che avrà luogo ogni cinque anni, con l'obiettivo di aumentare progressivamente l'ambizione. Dopo la COP21, la successiva Conference of Parties non ha stabilito accordi fondamentali.

### 1.3.1. Strategie europee per l'efficienza energetica in edilizia

Il settore edile può contribuire in modo significativo al progresso verso lo sviluppo sostenibile, per esempio attraverso l'efficienza energetica e un uso più sostenibile delle risorse naturali. Le politiche dell'Unione Europea (UE) sono state orientate verso lo sviluppo di un sistema energetico diversificato, competitivo e sostenibile, caratterizzato da un basso consumo energetico e in grado di affrontare il cambiamento climatico e il riscaldamento globale. L'UE ha sviluppato un piano strategico, noto come SET Plan del 2007, per promuovere lo sviluppo di tecnologie a basse emissioni di carbonio e affrontare le problematiche climatiche. In linea con questi obiettivi, nel dicembre 2008 l'UE ha adottato una strategia integrata su energia e cambiamenti climatici, con l'obiettivo di sviluppare un'economia sostenibile basata sui criteri di efficienza energetica entro il 2020.

In particolare, il pacchetto clima ed energia (piano 20-20-20) ha introdotto una serie di normative vincolanti per garantire che l'UE raggiunga i suoi obiettivi climatici ed energetici entro il 2020. Questi obiettivi, noti come obiettivi "20-20-20", hanno stabilito tre obiettivi chiave per il 2020:

- una riduzione del 20% delle emissioni di gas serra dell'UE rispetto ai livelli del 1990;
- un aumento del 20% della quota di consumo energetico dell'UE da fonti rinnovabili;
- un miglioramento del 20% dell'efficienza energetica dell'UE.

Queste misure rappresentano un passo importante verso l'efficienza energetica e la sostenibilità in Europa.

Il sistema di scambio delle quote di emissione (ETS) è il principale strumento dell'UE per ridurre le emissioni di gas serra da grandi impianti energetici, industriali e aeronautici e copre circa il 45% delle emissioni di gas serra dell'UE. Entro il 2020 l'obiettivo era quello di ridurre le emissioni di questi settori del 21% rispetto al 2005. Ci sono, inoltre, obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni; questi obiettivi riguardano settori che non sono coperti dall'ETS e rappresentano circa il 55% delle emissioni totali dell'UE: edifici, agricoltura, rifiuti, trasporti (esclusa l'aviazione). I paesi dell'UE hanno dovuto implementare obiettivi vincolanti di riduzione delle emissioni annuali per questi settori entro il 2020 (rispetto al 2005) e sono stati stabiliti dallo sforzo condiviso. Questi obiettivi e misure dimostrano l'impegno dell'UE nel combattere il cambiamento climatico e promuovere un futuro energetico più sostenibile. Gli obiettivi variano in base al reddito nazionale, da una riduzione del 20% per i paesi più ricchi a un aumento massimo del 20% per quelli meno ricchi (tuttavia ci si aspettava che fossero fatti degli sforzi per limitare le emissioni). Successivamente il quadro per il clima e l'energia al 2030, adottato nell'ottobre del 2014, ha ampliato gli obiettivi del piano 20-20-20, fissando:

- tagli di almeno il 40% delle emissioni di gas serra (rispetto ai livelli del 1990). Per raggiungere questo obiettivo:
  - i settori interessati dall'ETS UE dovranno ridurre le emissioni del 43% rispetto al 2005; a tal fine l'ETS dovrà essere riformato e rafforzato,
  - i settori non interessati dall'ETS dovranno ridurre le emissioni del 30% rispetto al 2005 e ciò dovrà tradursi in obiettivi nazionali individuali vincolanti per gli Stati membri;
- almeno il 27% di quota per le energie rinnovabili;

- almeno il 27% di miglioramento dell'efficienza energetica; l'obiettivo sarà esaminato nel 2020 partendo da un target del 30%.

Il 28 novembre 2018 la Commissione Europea ha presentato la sua visione strategica a lungo termine per un'economia prospera, moderna, competitiva e climaticamente neutra entro il 2050. Questa visione, che mira a un futuro a impatto zero, ha influenzato quasi tutte le politiche dell'UE ed è in linea con l'obiettivo dell'Accordo di Parigi di mantenere l'aumento della temperatura globale ben al di sotto dei 2°C e di continuare gli sforzi per mantenere questo valore a 1.5°C. Questo impegno dimostra la determinazione dell'UE a guidare la lotta contro i cambiamenti climatici e promuovere lo sviluppo sostenibile.

La Direttiva 2002/91/CE, nota come EPBD (Energy Performance of Buildings Directive)[18], è stata la prima direttiva europea riguardante la prestazione energetica degli edifici. Questa direttiva ha promosso il miglioramento della prestazione energetica degli edifici nuovi ed esistenti, tenendo conto delle condizioni climatiche esterne e locali, nonché dei requisiti relativi al clima interno e alla convenienza economica. Questa direttiva fa parte di una serie di direttive sviluppate dall'UE per raggiungere obiettivi energetici e ambientali stabiliti, con particolare attenzione al settore edilizio. Queste misure dimostrano l'impegno dell'UE nel promuovere l'efficienza energetica e la sostenibilità. L'EPBD aveva l'obiettivo di creare metodologie armonizzate per stimare il consumo energetico e rilasciare un'etichetta energetica. Questa direttiva è stata integrata e sostituita dalla Direttiva 2010/31/UE [19], nota come EPBD recast, che ha ampliato l'ambito di applicazione dell'EPBD. L'EPBD recast richiede agli Stati Membri di stabilire requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi, introducendo l'idea di "livelli di prestazione energetica di costo ottimale" negli edifici, ovvero la "prestazione energetica che comporta il costo più basso nel ciclo di vita economico stimato". Inoltre ha esteso la certificazione per coprire gli edifici non pubblici quando vengono messi in vendita o in affitto e ha rafforzato le disposizioni sull'ispezione degli impianti di riscaldamento e condizionamento. Queste misure rappresentano un passo importante verso l'efficienza energetica e la sostenibilità in Europa. Il concetto più importante introdotto è quello di "nearly Zero Energy Building" (nZEB). Un edificio nZEB è un edificio che ha una altissima prestazione energetica, il che significa che la quantità di energia richiesta, quasi zero o comunque molto bassa, dovrebbe essere coperta in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, inclusa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze. Sono imposti vincoli temporali agli Stati membri: a partire dal 31 dicembre 2020, tutti i nuovi edifici devono essere edifici a energia quasi zero. Inoltre, a partire dal 31 dicembre 2018, i nuovi edifici occupati e di proprietà di enti pubblici devono essere nZEB. Gli Stati membri devono elaborare piani nazionali per aumentare il numero di nZEB. Questi piani nazionali possono includere obiettivi differenziati in base alla categoria di edificio. Va sottolineato il ruolo chiave dato agli edifici pubblici, che devono essere esempi virtuosi in materia di risparmio energetico. L'articolo 7 di questa direttiva è specificamente dedicato agli edifici esistenti: grande enfasi è data all'importanza di stabilire requisiti che portino a investimenti per interventi ottimali rispetto ai risparmi energetici conseguiti nel ciclo di vita degli edifici, evidenziando la rilevanza di importanti ristrutturazioni, ovvero non singole operazioni ma interventi globali riferiti a interi settori. Il 9 luglio 2018 è entrata in vigore la EPBD (UE) 2018/844 rivista [20]. Tale direttiva include le misure che accelereranno

il tasso di ristrutturazione degli edifici verso sistemi più efficienti dal punto di vista energetico e rafforzeranno le prestazioni energetiche dei nuovi edifici, rendendoli più intelligenti. La nuova direttiva introduce modifiche mirate alla direttiva 2010/31/UE con la visione di un patrimonio edilizio decarbonizzato entro il 2050 e la mobilitazione degli investimenti. La revisione supporta anche l'implementazione di infrastrutture per la mobilità elettrica nei parcheggi degli edifici e introduce nuove disposizioni per migliorare le tecnologie intelligenti e i sistemi tecnici degli edifici, inclusa l'automazione. Gli Stati membri hanno 20 mesi per recepire le sue disposizioni nella legislazione nazionale.

Nel contesto dell'efficienza energetica, la Direttiva sull'efficienza energetica 2012/27/UE (EED) [21], che modifica le Direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le Direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE, prevede la riqualificazione energetica di almeno il 3% degli edifici pubblici a partire dal 2014, applicando requisiti minimi sempre più restrittivi, finanziamenti e supporto tecnico a livello nazionale. Ha stabilito, inoltre, un quadro comune di misure per la promozione dell'efficienza energetica nell'Unione per garantire il raggiungimento degli obiettivi delineati nel piano Clima ed energia 20-20-20 e per introdurre ulteriori miglioramenti dell'efficienza energetica oltre tale data. Gli Stati membri hanno dovuto promuovere strategie di risparmio energetico fissando obiettivi indicativi nazionali di efficienza energetica. Inoltre stabilisce anche un impegno di audit energetico per tutte le aziende ad alto consumo di energia, che è richiesto ogni quattro anni. Questa direttiva è stata cancellata perché aggiornata e inclusa nella nuova Direttiva 844/2018.

Infine, la Direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, che modifica e successivamente abroga le Direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE, stabilisce un quadro comune per la promozione dell'energia da fonti rinnovabili. Per quanto riguarda il settore edilizio, gli Stati membri sono tenuti a introdurre nei loro regolamenti e codici edilizi misure appropriate per aumentare la quota di tutti i tipi di energia da fonti rinnovabili in questo settore. Inoltre, nello stabilire norme e obblighi per i requisiti minimi per l'uso di energia da fonti energetiche rinnovabili, sia negli edifici nuovi che in quelli ristrutturati, gli Stati membri possono prendere in considerazione misure nazionali relative ad aumenti sostanziali dell'efficienza energetica e relative alla cogenerazione e agli edifici passivi, a basso o a zero consumo di energia. Queste direttive sull'efficienza energetica riguardano anche il settore terziario ed in particolare edifici ospedalieri e strutture sanitarie.

### **1.3.2. Quadro normativo italiano**

Il Decreto Legislativo italiano n.63 del 4 giugno 2013 [22] e la Legge di Conversione n.90 del 3 agosto 2013 [23] rappresentano un passaggio significativo nel processo legislativo italiano in materia di efficienza energetica negli edifici, sia pubblici che privati. Tali leggi sono state emanate per dare attuazione alla Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo [19] e del Consiglio del 19 maggio 2010, che si concentra sulla prestazione energetica degli edifici e definisce le procedure di infrazione messe in atto dalla Commissione Europea. Include, inoltre, altre disposizioni relative alla coesione sociale. Tale decreto è uno degli atti più importanti del quadro legislativo italiano, a dimostrazione dell'impegno dell'Italia nel migliorare l'efficienza energetica e nel promuovere la coesione sociale. Il Decreto Ministeriale italiano del 26/06/2015

sull'”Applicazione dei metodi di calcolo della prestazione energetica e definizione di prescrizioni e requisiti minimi degli edifici” [24], entrato in vigore nell'ottobre del 2015, attua la legge nazionale n. 90/2013 che modifica e integra il decreto legislativo n. 195/2005. Questo decreto ministeriale stabilisce la metodologia per il calcolo della prestazione energetica degli edifici e stabilisce requisiti minimi di prestazione energetica per edifici e unità. Si tratta di un passo importante per l'efficienza energetica in Italia, in quanto fornisce un quadro chiaro per la valutazione e il miglioramento della prestazione energetica degli edifici. Il Decreto Ministeriale Italiano del 26/06/2015 introduce nuovi requisiti sia per i nuovi edifici che per la ristrutturazione e il rifacimento energetico di edifici esistenti. Specifica, inoltre, i requisiti per gli edifici a energia quasi zero (nZEB), che si applicheranno ai nuovi edifici e alle ristrutturazioni importanti dal 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici e dal 1° gennaio 2021 per il resto degli edifici. Queste misure rappresentano un passo importante verso l'efficienza energetica e la sostenibilità in Italia.

Con il Decreto Ministeriale del 26 giugno 2009, successivamente adeguato con il Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015 [25], sono state introdotte le nuove Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici. Tale Decreto ha come scopo quello di favorire l'applicazione dell'attestato di prestazione energetica degli edifici o delle unità immobiliari su tutto il territorio nazionale. In particolare vengono stabilite le linee guida per la stesura dell'attestato di prestazione energetica, comprendente i criteri generali, le metodologie per il calcolo, la classificazione degli edifici, le procedure amministrative, i format nonché le norme per il monitoraggio e i controlli della regolarità tecnica e amministrativa. L'Attestato di Prestazione Energetica (APE) è un documento informativo e va a riportare tutte le caratteristiche energetiche di un edificio, specificando i possibili interventi che possono essere applicati all'edificio al fine di migliorarne l'efficienza energetica. La redazione dell'APE è obbligatoria in caso di nuova costruzione, quando ci sono interventi di ristrutturazioni riguardanti oltre il 25% della superficie, per edifici pubblici e va presentato quando c'è un atto di compravendita, di locazione o di trasferimento. Esso viene redatto da un tecnico abilitato dopo aver fatto un sopralluogo dell'edificio. Ha validità massima di dieci anni e l'idoneità decade quando vengono eseguiti interventi che modificano la prestazione energetica o la destinazione d'uso dell'edificio. L'APE contiene una serie di informazioni quali: la prestazione energetica globale, espressa in termini di energia primaria totale e primaria non rinnovabile; la qualità energetica del fabbricato; la classe energetica; i requisiti minimi di efficienza energetica; le caratteristiche termoclimatiche; gli indici di prestazione energetica rinnovabile e non rinnovabile ed energia elettrica esportata; le emissioni di anidride carbonica; la quantità annua di energia consumata; i servizi energetici e le relative efficienze; le proposte di interventi significativi ed economicamente convenienti per il miglioramento dell'efficienza energetica. L'informazione principale che viene riportata sull'APE è l'indice di prestazione energetica non rinnovabile ( $EP_{gl,nren}$ ), che indica il fabbisogno di energia primaria non rinnovabile relativa a tutti i servizi erogati dai sistemi tecnici presenti. Questo indice identifica la classe energetica dell'edificio.

### 1.3.3. La legislazione delle strutture ospedaliere

Le normative tecniche che regolamentano le strutture sanitarie sono molteplici e tutte indirizzate al benessere e alla sicurezza dei degenti e di chi lavora all'interno delle strutture. Ci sono delle differenze, a volte non trascurabili, tra le normative italiane e quelle internazionali che devono essere seguite per una corretta progettazione. Una tra le normative italiane riguardanti la gestione e la progettazione in ambito sanitario è il D.P.R. 14/01/1997 "Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento alle regioni e alle province autonome di Trento e di Bolzano, in materia di requisiti strutturali, tecnologici ed organizzativi minimi, per l'esercizio delle attività sanitarie da parte delle strutture pubbliche e private" [26]. Sebbene tale decreto fornisca requisiti minimi impiantistici generali, non differenzia sufficientemente e in modo specifico le differenze esistenti tra i vari reparti. Tale norma fornisce la classificazione degli impianti, la definizione dei requisiti minimi degli impianti e dei valori delle grandezze di riferimento durante il funzionamento degli stessi. Essa si applica agli impianti aeraulici destinati al benessere delle persone. La norma UNI 10339 [27] va in aiuto al D.P.R. e fornisce elementi aggiuntivi su obblighi di ventilazione con il numero di ricambi in litri/secondo relativi al reparto (Tabella 1).

<b>Zone</b>	<b>Portata di aria esterna minima</b>
Degenze	11 litri/secondo per persona
Corsie	11 litri/secondo per persona
Camere sterili	11 litri/secondo per persona
Camere per infettivi	Specificata in base alle esigenze
Sale mediche/soggiorni	8.5 litri/secondo per persona
Terapie fisiche	11 litri/secondo per persona
Sale operatorie/sale parto	Specificate in base alle esigenze
Servizi igienici	Estrazione di 8 volumi/ora

**Tabella 1. Ventilazione minima prescritta dalla norma UNI 10339 [27]**

Nel caso di ospedali, case di cura, cliniche e assimilabili non è ammesso usare aria di ricircolo, per cui risulta essere molto dispendiosa a livello energetico. Nella stessa normativa vengono indicate anche le classi dei filtri e l'efficienza di filtrazione necessaria in relazione al singolo reparto (Tabella 2).

<b>Zona</b>	<b>Classe di filtri (min-max)</b>	<b>Efficienza di filtrazione</b>
Degenze	6-8	Alta
Corsie	6-8	Alta
Camere sterili e infettivi	10-11	Altissima
Maternità, anestesia e radiazioni	10-11	Altissima
Prematuri e sale operatorie	11-12	Altissima
Visite mediche	6-8	Alta

**Tabella 2. Classi di filtri ed efficienza di filtrazione prescritte dalla norma UNI 10339 [27]**

Tuttavia, a partire dal 4 luglio 2024, questa normativa è stata ritirata, per cui per la progettazione della ventilazione negli edifici bisogna far riferimento al pacchetto di norme UNI EN 16798, “Prestazione energetica degli edifici-Ventilazione per gli edifici” [28], in vigore dal 2019. Tale norma è divisa in una serie di parti e va a sostituire la norma UNI EN 15251, “Criteri per la progettazione dell’ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell’aria interna, all’ambiente termico, all’illuminazione e all’acustica”. La norma UNI EN 16798 distingue i vari ambienti in quattro categorie, a seconda del loro livello di aspettativa in relazione al comfort degli occupanti (Tabella 3).

<b>Categoria</b>	<b>Livello di aspettativa</b>
IEQ <sub>I</sub>	Alto
IEQ <sub>II</sub>	Medio
IEQ <sub>III</sub>	Moderato
IEQ <sub>IV</sub>	Basso

**Tabella 3. Categorie di qualità dell’ambiente e rispettivi livelli di aspettativa previsti dalla norma UNI EN [28]**

Nel caso delle strutture sanitarie bisogna considerare una categoria di tipo I, corrispondente ad un livello di aspettativa alto, in quanto in esse sono presenti soggetti particolarmente sensibili e vulnerabili. Per quanto riguarda la qualità dell’aria interna (Indoor Air Quality o IAQ), essa dipende in parte anche dalle caratteristiche dell’involucro edilizio ed in parte da altri fattori come il tipo di attività svolta ed il numero di occupanti. La norma UNI EN 16798 indica tre modi differenti per quantificare il livello di qualità dell’aria interna: il metodo basato sulla qualità dell’aria percepita, il metodo dei valori massimi per la concentrazione delle sostanze inquinanti, il metodo basato su portate predefinite di ventilazione. Il metodo basato sulla qualità dell’aria percepita utilizza come tasso di ventilazione di progetto il maggiore tra il valore necessario per ridurre i rischi per la salute dovuti ad uno specifico inquinante e il tasso di ventilazione richiesto per ottenere un certo livello di qualità dell’aria. Per questo motivo si vede che il tasso di ventilazione di progetto si calcola in questo caso attraverso due componenti, la prima corrisponde alla ventilazione necessaria per rimuovere o quantomeno diminuire la concentrazione degli inquinanti generati dagli occupanti, mentre la seconda corrisponde alla ventilazione necessaria per rimuovere gli inquinanti prodotti dall’edificio o dagli impianti ad esso connessi. Il tasso di ventilazione totale necessario in corrispondenza della “zona di respirazione” è dato dall’equazione 1.1:

$$q_{tot} = n * q_P + A_R * q_B \quad (1.1)$$

dove:

$q_{tot}$  è il tasso totale di ventilazione per la zona di respirazione, espresso in litri/secondo;

$n$  è il valore di progetto per il numero di persone presenti nell’ambiente;

$q_P$  è il tasso di ventilazione necessario per l’occupazione di una singola persona, espresso in litri/secondo per persona;

$A_R$  è l'area di pavimento, espressa in  $m^2$ ;

$q_B$  è il tasso di ventilazione per le emissioni dell'edificio, espresso in litri/secondo per  $m^2$ .

Categoria	Percentuale attesa di insoddisfatti [%]	Flusso d'aria per persone non adattabile [l/s*persona]
I	15	10
II	20	7
III	30	4
IV	40	2.5

Tabella 4. Tassi di ventilazione per la diluizione delle emissioni dovute agli occupanti in base alle differenti categorie ( $q_P$ ) previsti dalla norma UNI EN 16798 [28]

Categoria	Edificio molto poco inquinante [l/s* m <sup>2</sup> ]	Edificio poco inquinante [l/s* m <sup>2</sup> ]	Edificio non inquinante [l/s* m <sup>2</sup> ]
I	0.5	1.0	2.0
II	0.35	0.7	1.4
III	0.2	0.4	0.8
IV	0.15	0.3	0.6

Tabella 5. Tassi di ventilazione per la diluizione delle emissioni dovute agli occupanti in base alle differenti categorie ( $q_B$ ) previsti dalla norma UNI EN 16798 [28]

Il metodo dei valori massimi per la concentrazione delle sostanze inquinanti si basa, invece, sul calcolo dei tassi di ventilazione per abbassare la concentrazione di una specifica sostanza inquinante presente all'interno dell'ambiente e si calcola attraverso l'equazione 1.2:

$$Q_h = \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,o}} * \frac{1}{\epsilon_v} \quad (1.2)$$

dove:

$Q_h$  è il tasso di ventilazione necessario per la diluizione, espresso in  $m^3/s$ ;

$G_h$  è il tasso di generazione di una sostanza, espresso in  $mg/s$ ;

$C_{h,i}$  è il valore di riferimento sulla concentrazione per quella sostanza, espresso in  $mg/ m^3$ ;

$C_{h,o}$  è la concentrazione della sostanza nell'aria, espressa in  $mg/ m^3$ ;

$\epsilon_v$  è l'efficacia della ventilazione.

La norma applicata questo metodo all'anidride carbonica, utilizzata anche come tracciante per rilevare l'occupazione di un ambiente. I valori limite sono riportati nella Tabella 6.

Categoria	Concentrazione di CO <sub>2</sub> corrispondente ai valori in PPM per le persone non adattabili
I	550 (10)
II	800 (7)
III	1350 (4)
IV	1350 (4)

**Tabella 6. Concentrazione differenziale limite rispetto a quella esterna di anidride carbonica CO<sub>2</sub>, assumendo un'emissione standard pari a 20 l/h per persona [28]**

Il metodo basato su portate predefinite di ventilazione permette di determinare i valori minimi predefiniti dal tasso di ventilazione che permettano di raggiungere sia i requisiti sulla qualità dell'aria percepita sia il minor livello di rischio per la salute. Questo metodo viene espresso attraverso uno o più di questi parametri:

- ventilazione totale di progetto per persone o componenti dell'edificio ( $q_{tot}$ );
- ventilazione di progetto per unità di area di pavimento ( $q_{m^2}$ );
- ventilazione di progetto per persona ( $q_p$ );
- tassi di ricambio dell'aria di progetto (ach);
- tassi di ventilazione di progetto per singolo ambiente e tipologia di edificio ( $q_{room}$ ).

Questo metodo permette, quindi, di esprimere il tasso di ventilazione sia in funzione del numero di occupanti sia in relazione all'area del pavimento.

La normativa italiana, però, non è completa nell'indicare gli obblighi relativi al benessere e alla sicurezza di chi usufruisce della struttura ospedaliera. Per questo motivo, ad integrazione della normativa italiana si può citare la normativa internazionale, in particolare la statunitense ASHRAE 62-1989 [29]. Tale norma va a riportare le condizioni di pressione prescritte dalla stessa ai vari locali della struttura ospedaliera (Tabella 7) al fine di evitare possibili contaminazioni e fughe di flussi batterici. Tale aspetto non è preso in considerazione da nessuna normativa vista fino ad ora e quindi rappresenta una importante integrazione.

Zona	Condizione di pressione
Sale operatorie, traumatologia, parto, nurse e terapia intensiva	Sovrapressione
Camera di degenza normale	Controllo non necessario
Servizi igienici	Sottopressione
Reparti di isolamento per infettivi	Sottopressione
Reparti di isolamento per immunodepressi	Sovrapressione
Laboratori	Specificate in base alle esigenze
Visite mediche	Controllo non necessario
Locali medicazione	Sovrapressione
Sterilizzazione e lavanderia	Sottopressione

**Tabella 7. Condizioni di pressione prescritte ai locali ospedalieri dalla normativa ASHRAE 62-1989 [29]**

#### **1.4. Valutazione delle performance delle strutture ospedaliere: alcuni indicatori sanitari**

La valutazione del servizio offerto dalle strutture sanitarie ha come obiettivo generale la misura della qualità dell'assistenza ospedaliera e il miglioramento delle performance. Tale esigenza risponde a motivazioni economiche e scientifiche. In campo sanitario, il processo di valutazione viene condotto attraverso la definizione di alcuni indicatori in grado di restituire una rappresentazione sintetica degli aspetti del sistema ospedaliero. Tra gli indicatori più utilizzati, occorre distinguere gli indicatori basati sui dati di movimento dei pazienti (indicatori classici) dagli indicatori sui sistemi di classificazione dei pazienti (indicatori complessi). A questi, si aggiungono ulteriori indicatori rappresentativi della relazione tra le strutture sanitarie ed il proprio territorio. Rientrano nella categoria degli indicatori classici le degenze medie, l'indice di occupazione dei posti letto, l'intervallo di turn-over e l'indice di rotazione.

La degenza media indica la durata media di un ricovero, espressa in giorni, in una struttura ospedaliera o in una divisione in un determinato periodo di tempo, solitamente l'anno. Tale indicatore risente di fattori quali l'accessibilità ai mezzi diagnostici, la correttezza della diagnosi, l'efficienza del reparto e la qualità delle cure prestate (efficacia del trattamento). L'indice di occupazione dei posti letto indica il livello di occupazione dei posti letto disponibili (in %) in un determinato periodo. La degenza media e l'indice di occupazione sono due indicatori che non riescono ad offrire una descrizione sufficientemente rappresentativa della complessa realtà ospedaliera. A questi occorre affiancare altri indicatori analitici, in grado di restituire valutazioni in merito al funzionamento dinamico del servizio ospedaliero. Fra questi c'è l'intervallo di turn-over, che indica il tempo medio (giorni) intercorrente tra la dimissione di un paziente e il successivo ricovero di un altro paziente. Pertanto, l'indicatore misura il periodo in cui un posto letto rimane libero o, in altri termini, gli eventuali sprechi nell'utilizzazione dei posti letto. A questo, si aggiunge l'indice di rotazione che indica il numero di ricoverati che ruotano su un medesimo posto letto in un determinato periodo di tempo, generalmente l'anno. Esso rappresenta una misura dell'intensità di utilizzo di un posto letto e viene spesso interpretato come un indice di produttività.

Tra gli indicatori complessi rientrano l'indice comparativo di performance e l'indice di case-mix. Si tratta di due indicatori complessi della degenza media, utilizzati per valutare le attività ospedaliere tenendo conto della casistica trattata per raggruppamenti omogenei di diagnosi. L'indice comparativo di performance esprime l'efficienza di un ospedale, in termini di degenza media, in rapporto all'efficienza media di un insieme di ospedali assunto come standard di riferimento, a parità di composizione della casistica trattata. Valori dell'indice comparativo di performance inferiori a 1 esprimono una degenza media inferiore e, quindi, un'efficienza maggiore rispetto allo standard. Invece, valori dell'indice comparativo di performance superiori a 1 esprimono una degenza media superiore e, quindi, una efficienza inferiore rispetto allo standard. L'indice di case-mix esprime la complessità dei casi trattati da un ospedale in rapporto alla complessità media di un insieme di ospedali assunto come standard di riferimento. Valori dell'indice di case-mix inferiori a 1 esprimono una composizione della casistica trattata meno complessa rispetto allo standard. Invece, valori dell'indice di case-mix superiori a 1 esprimono una composizione della casistica trattata più complessa rispetto allo standard.

### 1.5. Analisi di settore e ricerca di benchmark dei consumi energetici

Il benchmarking è uno strumento strategico che ha l'obiettivo di individuare possibilità di miglioramento attraverso il confronto sistematico delle prestazioni energetiche di un edificio con quelle dei best performer. La metodologia di benchmarking dell'efficienza energetica è definita nella norma UNI CEI EN 16231:2012 [30], che ne definisce i requisiti e ne fornisce raccomandazioni. La norma prevede la definizione di dati chiave e di indicatori del consumo energetico. Il benchmarking del consumo energetico, sia interno (tramite analisi dello storico/trend) che esterno (confronto con altre imprese del settore), è un potente strumento per la valutazione delle prestazioni e il miglioramento dell'efficienza energetica tramite l'analisi delle tendenze del consumo energetico, dei costi dell'energia e del consumo energetico specifico.

Tra gli strumenti maggiormente utilizzati per il benchmarking prestazionale troviamo gli Energy Performance Indicators (EnPI) o IPE (Indici di prestazione energetica). Lo scopo di definire gli indici di prestazione energetica è quello di individuare valori di riferimento tali da permettere alle aziende di pianificare in modo appropriato la propria politica energetica. Tali valori possono essere relativi all'intero sito produttivo, ad un singolo processo produttivo, ad un'area/reparto aziendale, ad una singola fase del processo produttivo. L'IPE assume solitamente la forma di un consumo specifico, avendo come denominatore l'energy driver e come numeratore il consumo di energia:

$$IPE = \frac{\text{Consumo}}{\text{Produzione}}$$

Il confronto del valore degli IPE aziendali con gli standard di settore permette un confronto denominato benchmarking di settore. Il benchmarking delle prestazioni energetiche consente di: quantificare le tendenze dei consumi energetici (fissi e variabili) rispetto ai livelli di produzione; confrontare le prestazioni energetiche del settore rispetto a vari livelli di produzione; identificare le best practice di settore; quantificare i margini disponibili per la riduzione dei costi energetici. Esso, inoltre, costituisce la base per impostare il piano di monitoraggio e i target energetici da raggiungere.

Per poter analizzare correttamente il consumo di energia del sito produttivo e correlarlo alle diverse aree funzionali così da poterlo confrontare con i benchmark di settore è necessario predisporre di un modello energetico del sito stesso. Tramite il modello energetico è possibile determinare il consumo di un determinato impianto al variare delle sue condizioni operative e stabilire quali sono le principali variabili che lo influenzano. Il modello energetico può essere dedotto dalle leggi fisiche che regolano il processo oppure utilizzando un approccio induttivo (metodo statistico). Tramite il modello energetico è possibile prevedere i consumi ed avere un maggiore controllo dei costi energetici. Il modello consente inoltre di identificare le eventuali anomalie e di stimare gli effetti degli interventi di efficientamento energetico sui consumi, sui costi e sugli indicatori. È opportuno costruire il modello relativamente ad ogni vettore energetico (elettrico, termico, combustibili, ecc.) acquistato e utilizzato nel sito in esame, con lo scopo di suddividere i consumi annui del vettore specifico tra le diverse utenze presenti nel sito stesso. In pratica si dovrà realizzare un inventario, il più

dettagliato possibile, delle utenze che consumano quel vettore energetico e associare a ciascuna di esse il relativo consumo.

## **CAPITOLO 2: Approccio metodologico per la sostenibilità degli edifici**

Il crescente interesse per la sostenibilità, le politiche energetiche intergovernative e le direttive internazionali hanno portato a sviluppare e studiare nuovi sistemi, soluzioni progettuali e strategie di gestione per le costruzioni, mirate a raggiungere l'efficienza energetica e gli edifici ecosostenibili. Tuttavia, qual è l'approccio più appropriato per studiare queste nuove tecnologie e soluzioni?

Il primo passo di ogni possibile metodo di indagine è la definizione di un volume di controllo dell'analisi, che potrebbe essere un singolo componente dell'edificio o l'intero sistema HVAC/involucro. Una volta definito questo, possono essere adottati due diversi approcci metodologici, generalmente utilizzati in letteratura e nella pratica corrente: a) l'approccio numerico (simulazione/calcolo), basato su modelli matematici implementati nella maggior parte dei casi in un ambiente di simulazione; e b) l'approccio sperimentale in ambiente controllato o reale. Ovviamente, è anche possibile seguire entrambi i metodi in combinazione tra loro, al fine di eseguire una valutazione più dettagliata e avanzata. In generale, possono essere fatte diverse scelte di studio, sulla base di costi sostenibili e tempo disponibile, nonché risorse sperimentali e computazionali disponibili. Va inoltre considerato che, dal punto di vista fisico, un edificio è un sistema complesso, influenzato da un'ampia gamma di parametri. È da sottolineare il fatto che tra tutti gli edifici, le strutture ospedaliere risultano essere tra le più complesse dal punto di vista energetico ed energivoro. Per questo motivo, per poter aumentare l'efficienza energetica di edifici sanitari esistenti è necessario considerare il sistema edificio/impianto nel suo insieme. Infine non è da sottovalutare lo studio dei parametri di comfort all'interno delle strutture sanitarie. Di seguito verrà presentata una breve panoramica dei metodi numerici utilizzati per lo studio dei sistemi edilizi in ambito sanitario sia dal punto di vista del sistema edificio/impianto sia dal punto di vista del comfort.

### **2.1. I software di simulazione energetica**

Utilizzando tutte le informazioni sulla geometria dell'edificio sanitario, sull'involucro, sulle caratteristiche del sistema di impianto e su alcuni risultati del monitoraggio sul campo, è stato creato e calibrato il modello numerico dell'edificio secondo la metodologia proposta dalle linee guida M&V [31]. Come strumento di modellazione è stato utilizzato DesignBuilder [32]. Esso offre un'interfaccia rapida per la creazione di modelli ed è combinata con un'interfaccia utente completa per EnergyPlus HVAC. Una caratteristica fondamentale di DesignBuilder è la sua integrazione con il motore di calcolo EnergyPlus [33]; esso offre anche un pacchetto CFD integrato. Inoltre DesignBuilder consente al modellatore di utilizzare lo stesso edificio anche per lo studio CFD e quindi può essere eseguita un'indagine accoppiata BES (Building Energy Simulation) e CFD (Computational Fluid Dynamics). Il software genera automaticamente un mesh di volume finito per adattare gli oggetti all'interno del dominio di studio, selezionato in base alla spaziatura della griglia scelta dall'utente. In particolare, i modelli numerici delle diverse strutture ospedaliere, adatti per eseguire simulazioni dinamiche, vengono utilizzati per prevedere informazioni dettagliate sulla distribuzione del flusso d'aria e della temperatura all'interno dell'edificio, nonché per la distribuzione di alcuni indici di comfort.

### 2.1.1. I fabbisogni energetici

Per fabbisogno energetico si intende la quantità di energia che deve essere fornita nel corso del tempo agli ambienti riscaldati che costituiscono un edificio per mantenere una determinata temperatura interna definita dalla normativa. Il calcolo del fabbisogno di energia, secondo le direttive europee e i decreti attuativi vigenti, è solitamente effettuato con metodi definiti statici, ovvero che fanno riferimento alle condizioni di calcolo medie giornaliere. I fabbisogni energetici ideali di un edificio, in regime invernale e in regime estivo, possono essere calcolati seguendo i bilanci di energia definiti dalla norma UNI/TS 11300 [34]. Tale normativa definisce una procedura semplificata per il calcolo dei fabbisogni energetici di riscaldamento e raffrescamento, che non tiene conto delle reali condizioni dinamiche di variazione dei carichi termici. Per questo motivo i risultati di questi calcoli sono fittizi e portano a risultati spesso inesatti per la valutazione dei consumi energetici reali che invece dipendono da molti fattori come la zona climatica, la tipologia di costruzione e il profilo d'uso sia delle sorgenti interne che degli impianti. La specifica tecnica, in particolare, fornisce dati e metodi per la determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale e definisce le modalità di applicazione della norma UNI EN ISO 13790:2008 [35], che fa riferimento al metodo mensile per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per umidificazione e per la deumidificazione. Il fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento degli ambienti dipende da diversi fattori, che si possono raggruppare nelle seguenti categorie: parametri climatici della località considerata, caratteristiche geometriche dell'edificio considerato, caratteristiche termiche e costruttive, caratteristiche correlate alla modalità di occupazione ed utilizzo dell'edificio stesso. Nella categoria dei parametri climatici della località considerata rientrano dati quali la temperatura media mensile dell'aria esterna e l'irradiazione solare incidente mensilmente sulle superfici che delimitano l'involucro edilizio; alla categoria delle caratteristiche geometriche dell'edificio rientrano parametri quali, ad esempio, il volume netto riscaldato, la superficie utile, l'orientamento dell'edificio, le superfici di tutti i componenti dell'involucro edilizio. Per quanto riguarda le caratteristiche termiche e costruttive, occorre conoscere il valore della trasmittanza di energia solare di tutti i componenti trasparenti dell'involucro edilizio, le tipologie di ponti termici presenti, le capacità termiche areiche dei componenti della struttura dell'edificio. Infine, i dati relativi alla modalità di occupazione ed utilizzo dell'edificio comprendono, ad esempio, la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento, gli apporti interni, la tipologia e le caratteristiche della ventilazione, la durata del periodo di riscaldamento. Definiti i dati di ingresso, il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento è ricavato dall'equazione (2.1):

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} * Q_{gn} \quad (2.1)$$

dove:

$Q_{H,ht}$  rappresenta lo scambio termico totale nel caso di riscaldamento ed è dato dalla somma dello scambio termico per trasmissione ( $Q_{H,tr}$ ) e per ventilazione ( $Q_{H,ve}$ ). È espresso in MJ;

$\eta_{H,gn}$ , è il fattore di utilizzazione degli apporti termici;

$Q_{gn}$  rappresenta gli apporti totali di energia termica ed è dato dalla somma degli apporti di energia termica dovuti a sorgenti interni ( $Q_{int}$ ) e gli apporti di energia termica per la radiazione solare sui componenti vetriati ( $Q_{sol}$ ). È espresso in MJ.

Per cui, il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento è dato da:

$$Q_{H,nd} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} * (Q_{int} + Q_{sol}) \quad (2.2)$$

Lo scambio termico per trasmissione comprende due contributi: un contributo rappresenta le perdite per trasmissione attraverso l'involucro opaco e trasparente, mentre l'altro contributo rappresenta il cosiddetto extraflusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste. A questi due contributi, che sono di dispersione, va sottratto il termine relativo ai guadagni solari sui componenti opachi. Per queste ragioni, lo scambio termico per trasmissione si può scrivere nel seguente modo:

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} * (\theta_{int,set,H} - \theta_e) * t + \{\sum_k F_{r,k} \Phi_{r,mn,k}\} * t + \{\sum_l (1 - b_{tr,l}) F_{r,l} \Phi_{r,mn,u,l}\} * t - Q_{sol,op} \quad (2.3)$$

dove:

$H_{tr,adj}$  è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto per tener conto della differenza di temperatura tra interno ed esterno, espresso in W/K;

$t$  è la durata del mese o della frazione di mese considerata, espresso il Ms;

$\theta_{int,set,H}$  è la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona considerata, espressa in °C;

$\theta_e$  è la temperatura esterna media del mese considerato o della frazione di mese considerata, espressa in °C;

$F_{r,k}$  è il fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste;

$F_{r,l}$  è il fattore di forma tra il componente edilizio l-esimo dell'ambiente non climatizzato e la volta celeste;

$\Phi_{r,mn,k}$  è l'extraflusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste emessa dal componente edilizio k-esimo, mediato sul tempo, espresso in W;

$\Phi_{r,mn,u,l}$  è l'extraflusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste emessa dal componente edilizio l-esimo dell'ambiente non climatizzato, mediato sul tempo, espresso in W;

$b_{tr,l}$  è il fattore di riduzione delle dispersioni per l'ambiente non climatizzato avente il componente l-esimo soggetto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste;

$Q_{sol,op}$  rappresenta gli apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente sui componenti opachi, espresso in MJ.

Lo scambio termico per ventilazione dipende dalle caratteristiche geometriche dell'edificio riscaldato, nello specifico dal volume netto riscaldato, e dalle caratteristiche della ventilazione, se naturale o controllata. Lo scambio termico per ventilazione è dato da:

$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} * (\theta_{int,set,H} - \theta_e) * t \quad (2.4)$$

dove:

$H_{ve,adj}$  è il coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura tra interno ed esterno, espresso in W/K;

$t$  rappresenta la durata del mese o della frazione di mese considerata, espressa in Ms;

$\theta_{int,set,H}$  rappresenta la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona considerata, espressa in °C;

$\theta_e$  rappresenta la temperatura media del mese considerato o della frazione di mese considerata, espressa in °C.

Al fine di chiudere il bilancio energetico dell'involucro edilizio nel periodo di riscaldamento occorre determinare anche i contributi positivi del bilancio stesso, ovvero gli apporti interni e gli apporti solari.

Gli apporti termici interni sono dovuti alle sorgenti di energia termica presenti all'interno di uno spazio chiuso, ovvero dovuti agli occupanti, alle apparecchiature elettriche e all'illuminazione, e sono calcolati attraverso la seguente espressione:

$$Q_{int} = \left\{ \sum_k \Phi_{int,mn,k} \right\} * t + \left\{ \sum_l (1 - b_{tr,l}) \Phi_{int,mn,u,l} \right\} * t \quad (2.5)$$

dove:

$\Phi_{int,mn,k}$  rappresenta il flusso termico prodotto dalla k-esima sorgente di calore interna, mediata sul tempo, espresso in W;

$b_{tr,l}$  rappresenta il fattore di riduzione dell'ambiente non climatizzato avente la sorgente di calore interna l-esima;

$\Phi_{int,mn,u,l}$  rappresenta il flusso termico prodotto dalla l-esima sorgente di calore interna all'ambiente non climatizzato adiacente non climatizzato u, mediato sul tempo, espresso in W.

I principali fattori che incidono sul calcolo degli apporti solari sono l'esposizione del componente considerato, l'eventuale presenza di ombreggianti e il colore, nel caso di componente opaco, o la trasmittanza solare, nel caso di componente finestrato. Gli apporti di energia termica per la radiazione solare sono dati dalle seguenti relazioni:

$$Q_{sol,w} = \left\{ \sum_k \Phi_{sol,w,mn,k} \right\} * t + \sum_j Q_{sd,w,j} \quad (2.6)$$

$$Q_{sol,op} = \left\{ \sum_k \Phi_{sol,op,mn,k} \right\} * t + \left\{ \sum_l (1 - b_{tr,l}) \Phi_{sol,mn,u,l} \right\} * t + \sum_j (Q_{sd,op,j} + Q_{si,j}) \quad (2.7)$$

dove:

$Q_{sol,w}$  rappresenta gli apporti solari attraverso i componenti finestrati, espresso in W;

$Q_{sol,op}$  rappresenta gli apporti solare attraverso i componenti opachi, espresso in W;

$\Phi_{sol,mn,k}$  rappresenta il flusso termico k-esimo di origine solare, mediato sul tempo, espresso in W;

$\Phi_{sol,mn,u,l}$  rappresenta il flusso termico l-esimo di origine solare nell'ambiente non climatizzato adiacente u, mediato sul tempo, espresso in W;

$Q_{sd,w,j}$  rappresenta gli apporti di energia termica diretti attraverso le partizioni trasparenti, dovuti alla radiazione solare entrante nella zona climatizzata dalla serra j-esima, espressi in MJ;

$Q_{sd,op,j}$  rappresenta gli apporti di energia termica diretti attraverso le partizioni opache dovuti alla radiazione solare entrante nella zona climatizzata della serra j-esima, espressi in MJ;

$Q_{si,j}$  rappresenta gli apporti di energia termica indiretti dovuti alla radiazione solare entrante nella zona climatizzata della serra j-esima, espressi in MJ;

$b_{tr,l}$  è il fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato avente la sorgente di calore interna l-esima oppure il flusso termico l-esimo di origine solare.

Anche nel caso di raffrescamento il fabbisogno di energia termica dipende dai parametri climatici della località considerata, dalle caratteristiche geometriche dell'edificio considerato, dalle caratteristiche termiche e costruttive, dalle caratteristiche correlate alla modalità di occupazione ed utilizzo dell'edificio stesso e delle

caratteristiche dei vari componenti dell'impianto di raffrescamento. Il fabbisogno ideale di energia termica per il raffrescamento degli ambienti è ricavato dalla seguente espressione:

$$Q_{c,nd} = Q_{gn} - \eta_{c,ls} * Q_{c,ht} = (Q_{int} + Q_{sol,w}) - \eta_{c,ls} * (Q_{c,tr} + Q_{c,ve}) \quad (2.8)$$

dove:

$Q_{gn}$  sono gli apporti totali di energia termica, dati dalla somma degli apporti di energia termica dovuti a sorgenti interne ( $Q_{int}$ ) e degli apporti di energia termica per la radiazione solare sui componenti vetrati ( $Q_{sol,w}$ ), espressi in MJ;

$Q_{c,ht}$  è lo scambio di energia termica totale nel caso di raffrescamento, dato dalla somma dello scambio termico per trasmissione ( $Q_{c,tr}$ ) e lo scambio termico per ventilazione ( $Q_{c,ve}$ ), entrambi nel caso di raffrescamento ed entrambi espressi in MJ;

$\eta_{c,ls}$  è il fattore di utilizzazione delle dispersioni di energia termica.

Lo scambio termico totale nel caso di raffrescamento ( $Q_{c,ht}$ ) è valutato utilizzando le Eq. (2.3) e (2.4), sostituendo la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento ( $\theta_{int,set,H}$ ) con la temperatura interna di regolazione per il raffrescamento ( $\theta_{int,set,C}$ ). Gli apporti termici ( $Q_{gn}$ ) sono calcolati con le Eq. (2.5), (2.6), (2.7).

### 2.1.2. Le condizioni interne – analisi CFD

La fluidodinamica computazionale (CFD), basata sulle equazioni di Navier-Stokes per modellare il sistema di flusso o il sistema termico, sta svolgendo un ruolo sempre più importante nella progettazione degli edifici. In generale, le informazioni fornite dall'analisi CFD possono essere utilizzate per analizzare l'impatto degli scarichi degli edifici sull'ambiente, per prevedere i rischi di fumo e incendio negli edifici, per qualificare la qualità dell'ambiente interno e per progettare sistemi di ventilazione naturale. I processi di convezione nei fluidi, descritti da equazioni differenziali parziali, sono derivati dai principi di conservazione generali formulati, di solito, per sistemi aperti in ipotesi abbastanza semplificative. In particolare, la distribuzione della temperatura, governata dall'equazione di conservazione dell'energia, è basata sul primo principio della termodinamica, mentre la distribuzione della velocità, governata dall'equazione di continuità e dalle equazioni di Navier-Stokes, è basata sul principio di conservazione della massa e sul principio di conservazione della quantità di moto. Per lo studio del campo termico, nella formulazione usuale dell'equazione energetica, vengono trascurate le variazioni di energia cinetica e potenziale, il lavoro trasferito e la conversione di energie chimica, elettrica e nucleare in calore. L'espressione differenziale risultante include solo i termini di variazione temporale, trasporto conduttivo e convettivo. La conoscenza del campo di moto è richiesta per determinare il campo termico a causa della presenza delle componenti di velocità come coefficienti del termine avvertivo.

La soluzione numerica delle equazioni del moto è difficile nell'ipotesi di incomprimibilità perché la pressione non appare come variabile principale nell'equazione. La pressione gioca un ruolo importante durante il moto perché istante per istante assume valori che garantiscono il rispetto della continuità. Quindi, l'uso di variabili primitive, di componenti di pressione e velocità prevede di trasformare l'equazione di continuità in

un'equazione per la pressione (trovata una distribuzione di pressione che porta a un campo di moto che rispetta la continuità se utilizzata nelle equazioni di Navier-Stokes). Dall'altra parte, il rispetto della continuità può essere ottenuto anche attraverso strategie alternative come, ad esempio, la formulazione delle equazioni del moto in termini di funzione di corrente e vorticità e potrebbero portare al rispetto della continuità, ma la loro implementazione in codici di calcolo 3D non è possibile [36]. I problemi tridimensionali sono generalmente risolti nel contesto di variabili primitive, che potrebbero essere facilmente ed efficientemente implementate nei codici commerciali.

Le soluzioni numeriche delle equazioni di convenzione mediante variabili primitive potrebbero essere facilmente utilizzate in regime di flusso laminare, stimando la diffusività termica e la cinematica. Mentre, per i campi di flusso turbolento, la soluzione diretta richiede maglie dense di dominio e/o un numero molto elevato di intervalli temporali, quindi difficile da supportare con codici di calcolo commerciali. Per superare questo problema, le equazioni mediate su intervalli di tempo piuttosto lunghi, o piuttosto grandi porzioni di spazio, vengono utilizzate al posto delle equazioni differenziali originali. In questo modo, la variazione del moto in piccoli intervalli di tempo e spazi limitati diventa trascurabile. Con l'approccio delle equazioni mediate devono essere valutati specifici stress turbolenti e flussi di calore. A questo scopo, potrebbero essere utilizzati diversi modelli, la maggior parte dei quali si basa sulla cinematica turbolenta e sulla diffusività termica. Il modello di turbolenza più utilizzato è il cosiddetto modello  $k-\epsilon$ , basato sull'energia cinetica della turbolenza ( $k$ ) e sulla velocità di dissipazione dell'energia della turbolenza ( $\epsilon$ ) per descrivere la diffusività termica e la cinematica turbolenta. Diversi sono i software commerciali/open source per risolvere i problemi CFD. I più accreditati nella comunità scientifica sono COMSOL, OpenFOAM, Star-CCM+ e Fluent, che differiscono per una più o meno spunta possibilità di modifica dei modelli che governano il calcolo da parte dell'utente. In questa tesi di dottorato è stato utilizzato il modulo CFD DesignBuilder v. 6.0 per risolvere il calcolo CFD sul flusso d'aria e la distribuzione di temperatura presente all'interno di una degenza ospedaliera, con l'adozione di opportune condizioni al contorno derivate dalla simulazione dell'energia termica dell'edificio. In generale, questo modulo CFD può essere utilizzato sia per analisi esterne che interne, si basa sul metodo delle variabili primitive e sul modello di turbolenza  $k-\epsilon$  e le condizioni al contorno possono includere gli effetti dei guadagni di calore interni climatici dei sistemi HVAC.

## **2.2. Introduzione generale sui materiali e le tecnologie innovative**

In linea con quelli che sono gli obiettivi di questo elaborato, ora si va a dare una descrizione generale di quelle che sono le principali soluzioni progettuali atte a migliorare le prestazioni energetiche di un edificio, alcune delle quali verranno trattate meglio nei capitoli successivi. In generale, questi interventi sono finalizzati:

- alla minimizzazione delle dispersioni energetiche in regime invernale, massimizzando lo sfruttamento degli apporti gratuiti endogeni e, soprattutto, solari;
- al controllo del surriscaldamento estivo ed un efficace uso della ventilazione, al fine di garantire il massimo comfort termico e il minor uso degli impianti di climatizzazione.

Per ridurre i consumi energetici relativi alla climatizzazione invernale si può intervenire:

- a) sull'involucro, con la riduzione delle dispersioni termiche verso l'esterno, prevedendo l'isolamento termico delle strutture opache e selezionando componenti trasparenti adeguati, facendo, inoltre, attenzione alla tenuta all'aria dell'involucro edilizio;
- b) incrementando gli apporti termici gratuiti, soprattutto di natura solare, massimizzando lo sfruttamento diretto, ad esempio superfici vetrate esposte a sud e serre solari, e lo sfruttamento indiretto della radiazione solare;
- c) sull'efficienza degli impianti di riscaldamento, garantendo un rendimento maggiore dell'impianto termico con l'impiego di sistemi ad alta efficienza di conversione dell'energia, migliorando la regolazione dell'impianto, il sistema di distribuzione del fluido termovettore e i terminali in ambiente, nonché utilizzando sistemi per il recupero del calore disperso per ventilazione, ad esempio con i recuperatori di calore.

In regime estivo, invece, è necessario prevedere interventi riguardanti gli impianti e l'involucro degli edifici che permettano sia di limitare gli apporti termici gratuiti con un adeguato controllo termico, sia di smaltire il calore accumulato durante il giorno. Le strategie di controllo termico si attuano attraverso sistemi e tecniche che riducono il surriscaldamento generato dalla radiazione solare, gli apporti gratuiti endogeni, dovuti a persone ed apparecchiature, lo scambio convettivo tra aria calda e superfici, che avviene per infiltrazione e/o ventilazione.

Il controllo della radiazione solare attraverso i componenti opachi può essere attuato sostanzialmente agendo sulla temperatura superficiale esterna e sull'inerzia dell'involucro. La temperatura superficiale influenza il flusso termico per trasmissione incrementando l'effetto di isolamento dall'esterno e può essere gestita selezionando la finitura della superficie esterna, in particolare scegliendone il materiale ed il colore, in quanto tale scelta offre specifiche caratteristiche spettrali in termini di riflessione solare ( $\rho_{sol}$ ) e di emissività nel lontano infrarosso ( $\epsilon_{infrarosso}$ ). Per quanto riguarda il controllo sull'inerzia termica, è necessario considerare come le condizioni climatiche esterne, in regime estivo, possano subire variazioni sensibili, pertanto il comportamento termico di un elemento opaco deve essere valutato in condizioni dinamiche attraverso coefficiente di sfasamento, che è il periodo temporale che intercorre tra il picco massimo della temperatura esterna e il massimo picco del flusso termico che si verifica in ambiente, e il fattore di attenuazione, che è il rapporto tra il massimo flusso della parete capacitiva ed il massimo flusso della parete a massa termica nulla, indicanti rispettivamente la riduzione in ampiezza dell'onda termica nel passaggio dall'esterno all'interno dell'ambiente e il ritardo temporale della trasmissione di calore attraverso la struttura in esame.

Attenuazione, sfasamento e trasmittanza termica dipendono fortemente dalla capacità degli strati della struttura opaca. L'introduzione, dunque, di un materiale isolante con una maggiore densità e un maggior calore specifico disposto tra due elementi massivi, ad esempio laterizi, è un'alternativa valida in regime estivo in quanto migliora lo sfasamento e l'attenuazione dell'onda termica.

In controllo della radiazione solare attraverso le superfici trasparenti può essere attuato selezionando schermature solari a protezione delle vetrate e adoperando vetri riflettenti e/o a controllo solare che filtrano i raggi solari e riducono il surriscaldamento provocato dalla radiazione solare entrante nell'ambiente. Inoltre

esistono i vetri innovativi con proprietà ottiche variabili (cromogenici) che risultano sensibili alla radiazione luminosa (fotocromici), alla temperatura (termocromici) e alla variazione della tensione elettrica applicata (elettrocromici).

In linea generale i possibili interventi finalizzati al miglioramento delle prestazioni dell'involucro edilizio, attuabili per nuovi edifici o in retrofit di edifici esistenti, i seguenti.

- Applicazione di intonaci termo-isolanti: sistemi di rivestimento esterni sostitutivi dei tradizionali strati di completamento. All'impasto degli intonaci si aggiungono additivi, quali per esempio sughero, argilla, perlite, che ne riducono la conducibilità termica rispetto ai tradizionali intonaci e, dunque, contribuiscono a incrementare l'isolamento termico degli edifici.
- Utilizzo di termo-blocchi: blocchi preassemblati, adatti nel caso di edifici di nuova costruzione o di demolizione e costruzione, che contribuiscono a migliorare il livello di isolamento termico e a conferire buone prestazioni di resistenza meccanica, di isolamento acustico e di inerzia termica. Essi possono essere ad isolamento distribuito, integrando nei laterizi un materiale isolante, o ad isolamento concentrato, alternando tra i blocchi di laterizi un isolante termico.
- Applicazione di vernici termo-isolanti e finiture: miscele nanotecnologiche che in funzione della tipologia di additivo possono presentare un comportamento diverso. Si distinguono in tre categorie:
  - vernici termo-isolanti, atte principalmente alla riqualificazione energetica dell'edilizia esistente e forniscono un film sottile di copertura con il più alto isolamento possibile;
  - finiture riflettenti, che sono finiture superficiali esterne ad elevato fattore di riflessione solare e ad alta emissività nel lontano infrarosso, capaci di riflettere la radiazione solare incidente e a cedere l'energia accumulata dalla superficie all'ambiente nel campo dell'elevata lunghezza d'onda. Grazie a queste caratteristiche spettrali, tali finiture riducono la temperatura superficiale esterna e, di conseguenza, il flusso termico trasmesso negli ambienti termici avendo una riduzione della richiesta di energia necessaria per la climatizzazione estiva;
  - finiture captanti, che presentano un basso fattore di riflessione solare ed una bassa emissività nel lontano infrarosso, particolarmente utili in regioni fredde, per massimizzare quindi i guadagni solare in regime invernale.

Infine, vengono descritte, in maniera del tutto generale, le strategie finalizzate al riscaldamento e al raffrescamento passivo dell'involucro edilizio.

- La facciata ventilata opaca è un insieme di soluzioni tecnologiche caratterizzate dalla presenza di un'intercapedine d'aria tra involucro edilizio interno e paramento murario esterno. L'intercapedine d'aria naturalmente ventilata contribuisce a smaltire, per l'effetto camino, la radiazione solare trasferita al suo interno, provvedendo a ridurre le rientrate termiche per irraggiamento e, quindi, i carichi termici estivi. In regime invernale, se ben concepita, protegge le strutture murarie protegge la struttura muraria dall'azione degli agenti atmosferici (asciugando eventuali condense e ristagni di vapore) e fornisce un isolamento continuo all'involucro murario esterno, eliminando eventuali ponti termici.

- Il tetto ventilato e un tetto con isolamento termico in falda. È un sistema che garantisce un ambiente più salubre e maggior comfort abitativo, fornendo un notevole risparmio sui consumi energetici e sui costi di manutenzione. In estate garantisce il rapido smaltimento del calore grazie alla presenza di un'intercapedine ventilata e funge da barriera alla radiazione solare verso l'interno. In inverno, invece, provvede a smaltire il vapore acqueo ed asciuga eventuali infiltrazioni; inoltre, grazie ad una omogenea distribuzione dell'energia termica, evita eventuali accumuli di ghiaccio e neve. In entrambe le stagioni, infine, garantisce una maggiore durabilità degli elementi costruttivi del tetto.
- Il muro di Trombe è una struttura muraria massiccia con una superficie annerita esternamente e protetta da una lastra a doppio vetro, posta a 5-10 cm di distanza, predisponendo anche uno strato termoisolante al di sotto di essa. Con un'adeguata regolazione delle aperture inferiori e superiori del muro è possibile convogliare l'aria calda, catturata tra il muro ed il vetro, verso gli ambienti interni in inverno; mentre in estate, grazie all'inerzia termica della struttura, il calore assorbito viene accumulato, diffondendolo con un certo ritardo all'interno dell'intercapedine, irradiandolo poi negli ambienti confinanti.
- Il tetto verde e la parete verde è un sistema tecnologico complesso, in cui lo strato vegetale è parte integrante della copertura. Possono essere distinti per principio di funzionamento: le pareti verdi offrono un buon comportamento in regime estivo, soprattutto a causa della maggiore riflessione della radiazione solare; i tetti verdi, invece, sfruttano soprattutto la massa inerziale dell'edificio ed il fenomeno di evapotraspirazione. Una corretta progettazione consente numerosi vantaggi energetici ed ambientali che si traducono in un miglioramento del microclima interno al singolo edificio, in un impatto benefico sulla riduzione delle isole di calore urbane, in un miglioramento della qualità dell'aria e, infine, in un sostegno al sistema di smaltimento delle acque reflue. In regime invernale incrementano la resistenza termica grazie allo strato aggiuntivo di terreno, limitando tuttavia i guadagni solari data la maggiore capacità termica indotta dal substrato del terreno di coltura; in regime estivo provvede ad attenuare e sfasare il flusso termico trasmesso dall'esterno verso l'interno.
- I materiali a cambiamento di fase (PCM) sono materiali accumulatori di calore latente che, sfruttando il fenomeno fisico della transizione di fase, riescono ad assorbire i flussi termici latenti e ad immagazzinare molta energia, mantenendo costante la propria temperatura. I materiali a cambiamento di fase utilizzati per l'involucro edilizio contribuiscono alla riduzione dei consumi energetici sia in regime invernale che in regime estivo. Riescono, infatti, ad incrementare l'inerzia termica della struttura in cui sono inseriti.

Come già detto in precedenza, alcune tecnologie e alcuni materiali innovativi saranno approfonditi nei capitoli successivi.

### **2.3. Linee guida per la diagnosi energetica degli ospedali**

Negli ultimi anni il tema dell'efficienza energetica ha acquisito sempre più importanza, soprattutto in vista degli obiettivi europei in materia di riduzione dei consumi energetici e di emissione di gas serra posti per il 2020 e il 2030.

Risulta quindi importante individuare i sistemi energetici meno efficienti e intervenire su di essi. La diagnosi energetica è lo strumento più qualificato per analizzare il quadro della gestione energetica di un'attività: essa mette in evidenza il livello di efficienza della gestione partendo dall'analisi dei flussi energetici significativi per individuare le fasi del processo e le macchine più energivore, i possibili recuperi e le opportunità di applicare tecnologie energy-saving più attuali, identificando le soluzioni più convenienti sia sotto il profilo energetico che economico.

Le modalità operative, gli scopi ed i passaggi fondamentali di una diagnosi energetica sono definiti dalla norma UNI CEI EN 16247 [37], la quale va a dettare le linee guida per le diagnosi energetiche in diversi ambiti. Questa norma si divide in cinque parti: la prima parte è stata rilasciata nel 2012 e definisce i requisiti generali comuni a tutte le diagnosi energetiche; le parti 2, 3 e 4 sono state rilasciate nel 2014 e riguardano rispettivamente le diagnosi energetiche specifiche per gli edifici, per i processi produttivi e per il settore dei trasporti; la parte 5 è stata rilasciata nel 2015 e indica le competenze che l'auditor energetico o un team di auditor energetici devono possedere per effettuare in maniera efficace diagnosi energetiche conformi ai requisiti della parte 1, eventualmente integrata dalle parti relative ai tre settori "edifici", "processi" e "trasporti".

Secondo tale norma, la diagnosi energetica consiste in una procedura sistematica ed articolata in passaggi ben definiti.

Il D. Lgs. 115/08 [38] definisce la diagnosi energetica come una "procedura sistematica volta a fornire un'adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o di un gruppo di edifici, di una attività o impianto industriale o di servizi pubblici e privati, volta ad individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici e riferire in merito ai risultati".

La diagnosi energetica può essere effettuata con differenti obiettivi, quali una riqualificazione, una analisi volontaria o il soddisfacimento di obblighi di legge. Questo si ha perché con una diagnosi energetica e con la conseguente applicazione di efficientamento in essa individuate è possibile ottenere i seguenti risultati:

- ridurre i propri consumi energetici attraverso un aumento dell'efficienza energetica dell'impresa;
- ridurre l'incidenza della spesa energetica sul proprio fatturato;
- ridurre le emissioni di anidride carbonica e gas serra.

La diagnosi energetica permette di ottenere una conoscenza approfondita sugli usi e consumi energetici della realtà sottoposta ad esame, al fine di individuare le modifiche più efficaci. Rappresenta, quindi, la condizione necessaria per realizzare un percorso di riduzione dei consumi di energia negli usi finali, tramite l'individuazione e la modifica delle attività a più bassa efficienza energetica, attraverso la valutazione dei possibili margini di risparmio conseguibili.

Vi è una relazione diretta tra il costo della diagnosi, la quantità di dati che devono essere raccolti e analizzati ed il numero delle opportunità di risparmio energetico individuate. Occorre quindi distinguere in fase preliminare tra i costi accettati o accettabili per la diagnosi, poiché essi ne determineranno il livello di dettaglio. L'audit deve esser svolto in maniera idonea a soddisfare attese, necessità e limiti indicati dal committente, così che possano essere decisi concordemente obiettivi e scopo della diagnosi.

Il processo di diagnosi energetica, secondo la UNI 16247, deve essere:

- appropriato: adatto allo scopo, agli obiettivi e alla completezza concordati in partenza;
- completo: il sistema energetico descritto deve comprendere gli aspetti e gli usi energetici significativi;
- rappresentativo: al fine di raccogliere dati affidabili e pertinenti: dati reali devono essere acquisiti in numero e qualità necessari per lo sviluppo dell'inventario energetico; il consumo energetico deve essere coerente con i dati di fatturazione e/o con quanto rilevato dalla strumentazione di misura;
- tracciabile: identificazione e utilizzo di un inventario energetico, documentazione circa l'origine dei dati e l'eventuale modalità di elaborazione a supporto dei risultati della diagnosi, includendo le ipotesi di lavoro eventualmente assunte;
- utile: al fine di identificare e valutare sotto il profilo costi/benefici gli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica. Gli interventi devono essere espressi attraverso documentazione adeguata, differenziata in funzione del settore, delle finalità e dell'ambito di applicazione;
- verificabile: devono essere identificati gli elementi che consentono al committente la verifica del conseguimento dei miglioramenti di efficienza risultanti dalla applicazione degli interventi proposti.

Esistono tre livelli di diagnosi energetica di accuratezza crescente, riportati in Tabella 8, ciascuno dei quali comporta il raggiungimento di risultati diversi, con requisiti e costi differenti.

<b>Procedure e strumenti</b>	<b>Diagnosi leggera</b>	<b>Diagnosi standard</b>	<b>Diagnosi approfondita</b>
Caratteristiche dell'edificio	Planimetria	Planimetria, piante, prospetti, sezioni	Planimetria, piante, prospetti, sezioni, relazione legge 10/1997, libretto di caldaia
Caratteristiche degli impianti	Di massima	Di dettaglio	Di dettaglio
Dati sui consumi energetici	Ultimi 3 anni	Ultimi 3 anni	Ultimi 3 anni, consumi settimanali o giornalieri
Misure da effettuare	Spessore e stratigrafia chiusure opache e trasparenti	Spessore e stratigrafia chiusure opache e trasparenti, dati del generatore di calore	Spessore e stratigrafia chiusure opache e trasparenti, dati del generatore di calore, monitoraggio temperatura e umidità relativa interna. Termoflussimetro o carotaggi

Sistemi di monitoraggio	No	No	Temperatura, umidità, radiazione solare, affollamento dell'edificio
Software di calcolo	Semplici fogli di calcolo	CENED	Software di simulazione dinamica (DesignBuilder, Doe, Energy Plus)
Tempi previsti	1 giorno	1 settimana	Alcune settimane
Risultati da ottenere	Fare emergere problematiche a livello gestionale, proporre suggerimenti	Relazione tecnica in sintesi con indicazione delle inefficienze strutturali, impiantistiche e gestionali; definizione degli interventi proposti	Relazione tecnica approfondita con indicazione delle inefficienze strutturali, impiantistiche e gestionali; definizione e valutazione di combinazione di più interventi
Costi	Bassi	Medi	Alti

**Tabella 8. Livelli di diagnosi energetica previsti dalla norma UNI 16247 [37]**

La scelta del tipo di diagnosi energetica necessaria dipende dalla complessità dell'oggetto della diagnosi stessa: per strutture semplici è sufficiente una diagnosi "leggera", mentre per realtà complesse e polimorfe, come ad esempio un ospedale tale strumento non è sufficiente ad ottenere dei risultati validi e realistici per cui è necessario svolgere un'analisi più dettagliata e completa, il cui svolgimento comporta ovviamente un aumento del tempo e dei costi.

I tre tipi di diagnosi sono:

- 1° livello: diagnosi per ispezione visiva o diagnosi leggera (Walk-Through Audit)

La diagnosi energetica leggera consiste in una visita al sito oggetto d'analisi con lo scopo di ispezionare visivamente ciascuno dei sistemi e dei sottosistemi impieganti energia. Include una valutazione dei dati di consumo energetico allo scopo di esaminare le quantità e i profili di utilizzo dell'energia, e permette di effettuare dei confronti con valori di riferimento (benchmark). È il tipo di diagnosi meno costosa, ma può comunque essere utile per una stima preliminare del potenziale di risparmio. Inoltre fornisce una lista di opportunità di risparmio energetico a basso costo facilmente implementabili, principalmente attraverso il miglioramento delle procedure di gestione e manutenzione. La diagnosi di primo livello è anche un'opportunità per raccogliere informazioni utili per una successiva analisi più dettagliata, se dalla valutazione preliminare appare plausibile il

raggiungimento di obiettivi più ampi, in modo da giustificare un'attività di diagnosi più accurata e quindi più dispendiosa.

- 2° livello: diagnosi standard (Standard Audit)

Con la diagnosi standard si possono quantificare gli utilizzi e gli sprechi di energia, tramite un'analisi dei sistemi e delle loro caratteristiche operazionali. Questa analisi può includere anche alcune misure sul posto e verifiche prestazionali per quantificare l'impiego di energia e l'efficienza energetica dei diversi impianti. Per determinare le efficienze, calcolare il fabbisogno energetico ed il risparmio economico legato a miglioramenti e modifiche di ogni sottosistema, si adoperano strumenti di calcolo ingegneristici standard. La diagnosi energetica di secondo livello include anche la valutazione economica delle misure di risparmio energetico raccomandate, in termini di investimento e tempo di ritorno.

- 3° livello: diagnosi dettagliata (Detailed Audit)

Il terzo livello di diagnosi include un'analisi più dettagliata dell'utilizzo di energia, ripartito tra le diverse funzioni e destinazioni d'uso, e una più completa valutazione dei profili di consumo. Vengono adoperati programmi di calcolo e di modellazione dinamica del sistema energetico considerato. L'operatore esegue delle simulazioni del sistema edificio-impianto che tengano in considerazione l'interrelazione climatica e tutte le altre variabili legate alle modalità d'utilizzo dell'edificio per prevedere i fabbisogni e gli usi di energia nell'arco annuale. Lo scopo è creare un database di riferimento per il successivo confronto, che sia coerente con gli effettivi consumi della struttura. Una volta costruita tale baseline, si possono modificare parti del sistema per migliorarne l'efficienza e, effettuando ulteriori simulazioni con le nuove configurazioni raggiunte, se ne possono misurare gli effetti confrontando i risultati con i valori di riferimento. Questo metodo tiene anche conto delle interazioni tra i diversi sottosistemi, il che aiuta a prevenire la sovrastima dei risparmi. A causa del tempo che occorre per la raccolta dei dati necessari a descrivere dettagliatamente ogni apparato e per approntare un modello sufficientemente accurato per la simulazione dinamica, tale approccio rappresenta il livello più costoso di diagnosi energetica. Tuttavia può essere giustificato da un'elevata complessità dell'edificio o del sistema in esame, non altrimenti trattabile in modo corretto con i livelli precedenti.

Una volta stabilito il livello di diagnosi che si vuole eseguire, si può iniziare a raccogliere indicazioni circa i componenti strutturali e meccanici che condizionano gli impieghi di energia dell'edificio e sulle modalità di funzionamento e gestione. Queste informazioni possono e dovrebbero essere raccolte prima della visita al sito in esame. Infatti, una valutazione approfondita prima dell'ispezione sul posto aiuta sicuramente nell'identificazione delle aree di potenziale risparmio energetico e di ottimizzazione. Il processo di diagnosi energetica può quindi essere suddiviso in diverse fasi, indicate dettagliatamente nella norma UNI 16247-1 [39] e di seguito descritte.

- Contratto preliminare

Il responsabile della diagnosi energetica deve concordare con l'organizzazione in merito a:

- obiettivi, necessità ed aspettative relative alla diagnosi energetica;
- scopo, limiti e grado accuratezza richiesto;
- arco temporale per completare la diagnosi energetica;
- criteri per la valutazione delle misure di risparmio energetico;
- impegno richiesto in termini di tempo ed altre risorse;
- i requisiti circa i dati da raccogliere prima dell'inizio della diagnosi energetica e la disponibilità, la validità ed il formato dei dati relativi ad energia ed attività;
- misure e/o ispezioni da realizzare durante la diagnosi energetica.

Il responsabile della diagnosi energetica deve inoltre richiedere informazioni per quanto riguarda:

- il contesto della diagnosi energetica;
- eventuali vincoli normativi in grado di influenzare lo scopo o altri aspetti della diagnosi energetica, eventuali restrizioni esistenti relative a misure potenziali di miglioramento dell'efficienza energetica ed eventuali cambiamenti che possano avere una ricaduta sulla diagnosi energetica e sulle sue conclusioni;
- un più ampio programma strategico comprendente progetti pianificati e la descrizione del sistema di gestione del sito oggetto di analisi;
- la documentazione attesa ed il formato richiesto del rapporto.

Infine il responsabile della diagnosi energetica deve provvedere ad informare il committente riguardo:

- tutti gli impianti ed apparecchiature speciali necessari alla realizzazione della diagnosi energetica;
- tutti gli interessi commerciali o di altro genere che potrebbero influenzare le proprie conclusioni o raccomandazioni.

➤ Incontro di avvio (o incontro preliminare)

Lo scopo dell'incontro di avvio è di informare tutte le parti interessate riguardo a obiettivi, scopo, ambito, confini e grado di accuratezza della diagnosi energetica e concordarne le disposizioni pratiche.

In occasione di tale incontro il responsabile della diagnosi deve richiedere all'organizzazione di:

- nominare la persona sostanzialmente responsabile della diagnosi energetica nell'organizzazione e la persona che dovrà rapportarsi con il responsabile della diagnosi;
- informare il personale coinvolto e le altre parti interessate in merito alla diagnosi energetica e ad ogni esigenza posta in capo a loro entro tale ambito;
- assicurare la cooperazione delle parti coinvolte;
- informare circa ogni condizione, intervento di manutenzione o altra attività anomala che possa avvenire durante il periodo di svolgimento della diagnosi energetica che ne influenzi l'esito.

Nel corso di tale incontro occorre anche concordare:

- la modalità di accesso alla struttura;
- le regole di prevenzione e di sicurezza nei luoghi interessati dalla diagnosi;
- i dati e le risorse che devono essere resi disponibili e gli eventuali accordi di riservatezza in merito a dati riservati e confidenziali;

- una proposta di programma temporale delle visite con indicazione delle relative priorità.

Il responsabile della diagnosi deve descrivere le procedure, gli strumenti e le modalità con cui la diagnosi energetica sarà pianificata ed eseguita, con tanto di previsione temporale, e le possibili esigenze di apparecchiature di misura aggiuntive.

➤ Raccolta dati

L'auditor energetico deve cooperare con il committente al fine di raccogliere le seguenti informazioni:

- lista dei sistemi, dei processi e degli apparecchi che utilizzano energia, nonché lo stato del sistema di gestione dell'energia;
- caratteristiche dettagliate dell'oggetto sottoposto a diagnosi, compresi i fattori di aggiustamento conosciuti e come l'organizzazione ritiene che essi influenzino i consumi energetici, nonché lo stato attuale del sistema di gestione;
- dati storici riguardo i consumi energetici, i relativi fattori di aggiustamento e le appropriate misurazioni ad essi correlate;
- l'operativo storico ed eventi passati che potrebbero aver influenzato il consumo energetico nel periodo coperto dai dati raccolti (condizioni di funzionamento insolite, interventi di manutenzione e altre attività);
- documenti di progetto, di funzionamento e di mantenimento, eventuali diagnosi energetiche o studi precedenti connessi all'energia e all'efficienza energetica;
- prezzi e costi correnti e previsti, o prezzi e costi di riferimento da usare per garantire la riservatezza commerciale, e altri dati economici rilevanti.

➤ Attività in campo

Occorre ispezionare il sistema energetico oggetto della diagnosi tramite uno o più sopralluoghi al fine di:

- valutare gli usi energetici dell'oggetto sottoposto a diagnosi secondo finalità, scopo ed accuratezza della diagnosi energetica;
- formulare idee preliminari per le opportunità di miglioramento dell'efficienza energetica;
- redigere un elenco di aree e processi per i quali sono necessari ulteriori dati quantitativi per effettuare la successiva analisi.

Il responsabile della diagnosi energetica deve:

- Assicurarsi che misure e rilievi siano effettuati in maniera attendibile e in condizioni che siano rappresentative delle ordinarie condizioni di esercizio; può risultare vantaggioso realizzare alcune misurazioni al di fuori del normale orario di funzionamento, durante i periodi di spegnimento, o quando il fattore climatico non influisce eccessivamente;
- Informare il committente di ogni difficoltà incontrata durante lo svolgimento della diagnosi stessa.

Per quel che riguarda le ispezioni sul campo, è necessario richiedere al committente di:

- nominare uno o più soggetti che dovranno fare da guida durante i sopralluoghi sul campo; questi soggetti dovranno possedere le competenze e l'autorità necessarie per compiere direttamente, se richiesto, manovre su processi ed apparecchiature;
- consentire all'auditor energetico l'accesso a disegni, manuali e tutta la documentazione tecnica significativa per i diversi impianti, correlata di eventuali risultati di prove e misure di collaudo già effettuate.

➤ Analisi e inventario energetico

Durante questa fase, il responsabile della diagnosi deve definire il livello di performance energetica del sito oggetto di diagnosi, che rappresenta il riferimento sulla base del quale possono venire valutati gli interventi di miglioramento. Devono essere forniti:

- la ripartizione dei consumi energetici suddivisi per uso e fonte;
- i flussi energetici ed un bilancio energetico dell'oggetto sottoposto a diagnosi;
- il diagramma temporale della domanda di energia;
- le correlazioni tra il consumo energetico ed i fattori di aggiustamento;
- uno o più indicatori di prestazione energetica adatti a valutare l'oggetto sottoposto a diagnosi (ad esempio kWh/posto letto in un presidio ospedaliero).

L'auditor energetico deve valutare l'affidabilità dei dati forniti, evidenziando eventuali carenze e/o anomalie, ed utilizzare metodi di calcolo tecnicamente appropriati, documentando quali sono stati adoperati e con quali assunzioni. È necessario inoltre considerare ogni vincolo normativo o di altra natura che possa influire sulle potenziali misure di efficientamento energetico.

Con i dati raccolti, si deve costruire l'inventario energetico dell'edificio sottoposto a diagnosi, ossia la descrizione degli utilizzi di ciascun vettore energetico impiegato. I dettagli di tale ripartizione dipenderanno dalla disponibilità di misure dirette e dalla rilevanza dell'ambito di interesse.

Lo schema energetico dovrà essere costruito relativamente ad ogni vettore energetico (elettrico, termico, vapore, acqua, etc.) acquistato ed utilizzato nel sito in esame e avrà lo scopo di ripartire i consumi annui del vettore specifico tra le diverse utenze che alimenta, associando a ciascuna il relativo consumo.

L'inventario dovrà essere il più dettagliato possibile. In esso vanno quindi indicati:

- l'energia fornita disaggregata per vettore energetico in termini di consumi, costi ed emissioni in unità di misura coerenti;
- usi finali di energia disaggregati per servizi ed altri usi in valori assoluti o specifici ed in unità di misura coerenti;
- se presente, registro della produzione locale di energia e relativa quota esportata.

L'inventario energetico deve essere rappresentativo dell'energia in ingresso e di come essa viene impiegata. Inoltre, deve risultare chiaro quali flussi energetici sono basati su misurazioni e quali su stime o calcoli. Una volta costruito, è possibile determinare gli indicatori di prestazione energetica o

di specifici livelli di riferimento per l'edificio, che serviranno per meglio comprendere se e dove vi sono possibilità di intervento.

Il responsabile della diagnosi deve individuare le opportunità di miglioramento dell'efficienza energetica ed ottimizzazione, valutando per ognuna l'impatto rispetto alla prestazione energetica corrente dell'oggetto analizzato, basandosi su:

- i risparmi economici innescati dalle misure di miglioramento dell'efficienza energetica e gli investimenti necessari ad attuarle;
- il tempo di ritorno dell'investimento o ogni altro criterio economico concordato con il committente;
- gli altri possibili vantaggi non energetici (come produttività o manutenzione);
- il confronto in termini sia di costo sia di consumo tra le misure di miglioramento dell'efficienza energetica ed eventuali interazioni tecniche tra azioni multiple.

Le azioni di risparmio energetico devono essere elencate secondo una graduatoria costruita seguendo i criteri concordati inizialmente.

➤ Rapporto e incontro finale

In quest'ultima fase vengono presentati i risultati della diagnosi energetica effettuata, assicurandosi che essa risponda a tutti i requisiti concordati con il committente nelle fasi preliminari. Il responsabile della diagnosi deve quindi redigere un rapporto contenente l'analisi effettuata ed i risultati ottenuti e presentarlo al committente durante l'incontro finale.

L'esatto contenuto del rapporto deve essere appropriato allo scopo, all'obiettivo e al livello di dettaglio della diagnosi energetica. Esso deve contenere:

- a) un documento di sintesi in cui è riportata la graduatoria delle opportunità di miglioramento dell'efficienza energetica ed il programma d'attuazione proposto;
- b) le Informazioni generali sull'organizzazione sottoposta a diagnosi e sulla metodologia di diagnosi energetica adottata, il contesto specifico in cui la diagnosi energetica è stata effettuata, la descrizione del sistema oggetto di diagnosi e le norme tecniche pertinenti;
- c) La diagnosi energetica:
  - descrizione, scopo, obiettivo e livello di dettaglio, arco temporale, limiti e confini della diagnosi energetica;
  - informazioni sulla raccolta dei dati, analisi dei consumi energetici e criteri per la classificazione delle misure di miglioramento della prestazione energetica;
- d) Le opportunità di miglioramento dell'efficienza energetica:
  - azioni proposte, raccomandazioni, piano e programma temporale di implementazione;
  - ipotesi assunte durante il calcolo dei risparmi energetici e loro impatto sull'accuratezza delle raccomandazioni;
  - informazioni su contributi, incentivi e sovvenzioni applicabili;
  - analisi economica appropriata;

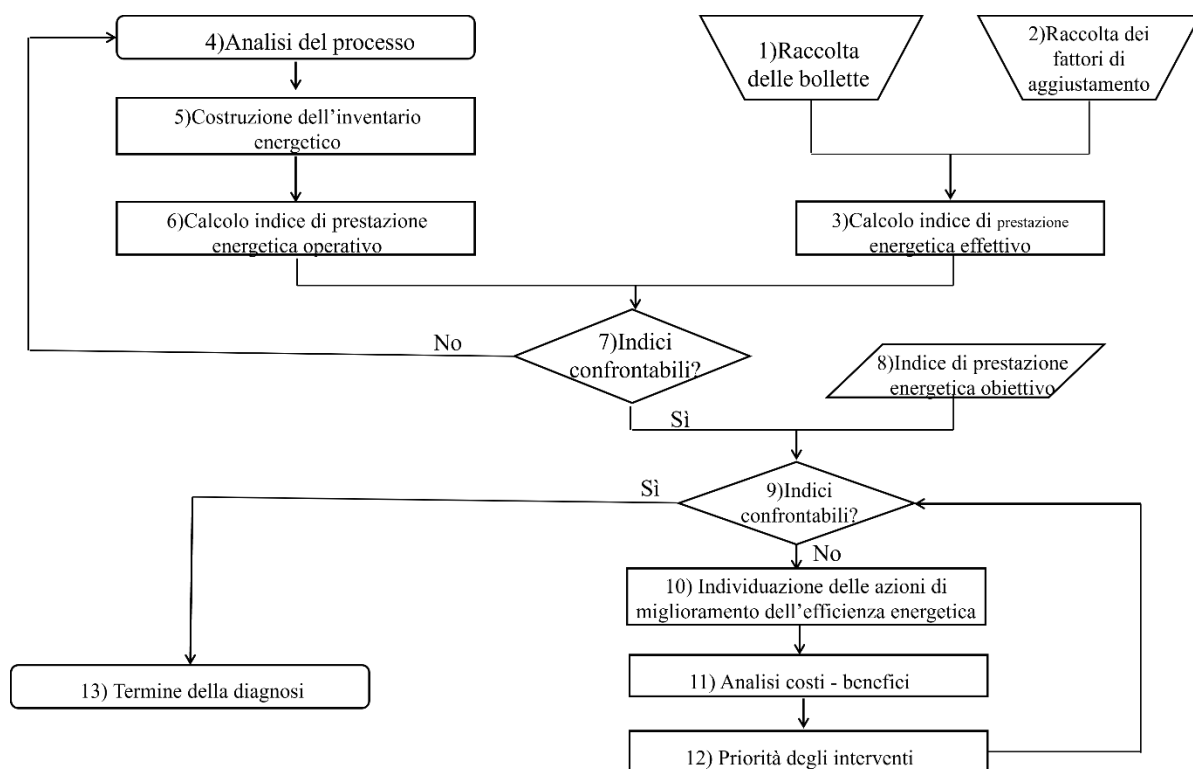
- potenziali interazioni con altre raccomandazioni proposte;
- metodi di misura e verifica che dovranno essere usati per le valutazioni post attuazione delle opportunità individuate.

e) Le conclusioni finali.

In accordo con la normativa, la procedura di diagnosi energetica, rappresentata in Figura 1, deve prevedere almeno le seguenti azioni:

- 1) raccolta dei dati relativi alle bollette di fornitura energetica e ricostruzione dei consumi effettivi di elettricità e combustibili per uno o più anni;
- 2) individuazione e raccolta dei fattori di aggiustamento cui riferire i consumi energetici;
- 3) identificazione e calcolo di un indice di prestazione energetica effettivo espresso in energia/fattore di riferimento/anno;
- 4) raccolta delle informazioni necessarie alla creazione dell'inventario energetico e allo svolgimento della diagnosi;
- 5) costruzione degli inventari energetici (elettrico e termico) relativi all'oggetto della diagnosi;
- 6) calcolo dell'indice di prestazione energetica operativo;
- 7) confronto tra l'indice di prestazione energetica operativo e quello effettivo. Se gli indici tendono a convergere, si prosegue l'analisi col passo successivo, altrimenti si ritorna al punto 4 e si affina l'analisi del processo produttivo e degli inventari energetici individuando le cause della mancata convergenza. La convergenza tra gli indici può considerarsi raggiunta per scostamenti percentuali ritenuti accettabili in funzione del settore d'intervento e dello stato del sistema energetico;
- 8) individuazione dell'indice di prestazione energetica obiettivo;
- 9) se i valori espressi dagli indicatori sono tra loro confrontabili, la diagnosi può considerarsi conclusa in quanto l'obiettivo definito dall'indice di riferimento è stato raggiunto;
- 10) se esiste uno scarto significativo tra l'indice di prestazione operativo ottenuto nel punto 6 e l'indice di prestazione obiettivo di cui al punto 8, si individuano le misure di miglioramento dell'efficienza che consentano il loro riallineamento;
- 11) per tali misure devono essere condotte le rispettive analisi di fattibilità tecnico-economiche;
- 12) le misure individuate, singole e/o integrate, sono classificate ed ordinate in funzione degli indici concordati tra il responsabile della diagnosi e il committente. Al termine di tale operazione, si esegue nuovamente il punto 9.

Una volta attuati tutti gli step, la diagnosi si considera conclusa.



**Figura 1. Procedura di diagnosi energetica prevista dalla norma UNI 16247-1 [39]**

## **CAPITOLO 3: Soluzioni innovative per la progettazione sostenibile**

Questo capitolo ha un ruolo centrale nell'attività di ricerca sviluppata in quanto affronta importanti questioni riguardanti l'efficienza energetica di reali strutture sanitarie presenti sul territorio molisano e campano. Tali questioni sono state analizzate durante il programma di dottorato secondo un approccio bottom-up, partendo dalla scala dei materiali fino a un'analisi globale del sistema edificio – impianto. Innanzitutto la ricerca dei materiali e soluzioni innovative deve garantire efficienza energetica, comfort interno e sostenibilità. Nella prima sezione vengono discussi i materiali a cambiamento di fase e i geopolimeri con i relativi risultati sperimentali. Nella sezione successiva si parlerà dei componenti trasparenti innovativi e di luce artificiale, andando ad approfondire aspetti quale il loro ruolo sulla condizione di comfort e sulle performance energetiche dell'edificio preso in esame. In particolare questi studi sono stati condotti all'interno di un edificio ad energia quasi zero (nZEB) sito a Benevento.

### **3.1. Geopolimeri e materiali a cambiamento di fase**

I materiali a cambiamento di fase (PCM – Phase Change Materials) sono materiali accumulatori di calore latente e, sfruttando il fenomeno della transizione di fase, accumulano grandi quantità di energia termica mantenendo la propria temperatura costante. Negli ultimi vent'anni è cresciuto l'interesse dell'architettura ecosostenibile e della bioedilizia, concentrandosi sulla sperimentazione di pannelli in cartongesso o in legno, intonaci, sistemi di facciata vetrati o in plexiglas, isolanti termici, impianti di riscaldamento o di raffrescamento passivo, collettori solari e scambiatori di calore. L'aspetto che rende più interessante l'integrazione dei materiali a cambiamento di fase in edilizia è l'elevata densità di energia stoccata in gioco e la possibilità di accumulare energia a temperatura costante, pari a quelli di fusione del PCM, durante il passaggio di fase. Difficilmente questi materiali vengono utilizzati sfusi, ma il più delle volte vengono incapsulati in contenitori oppure con tecnologie diverse, a seconda del tipo di utilizzo che i materiali a cambiamento di fase sono destinati ad avere. In applicazioni edilizie esistono tre modi di incorporazione: metodi tradizionali, micro incapsulamento e PCM stabilizzati. Nel caso specifico, sono stati utilizzati PCM micro incapsulati e macro incapsulati (appartenente ai metodi tradizionali).

Per quanto riguarda il PCM macroincapsulato, esso è stato utilizzato su una parete innovativa insieme a del calcestruzzo geopolimerico.

Il settore dell'edilizia e delle costruzioni svolge un ruolo centrale nel raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità energetica ed ambientale. La sostenibilità ambientale comprende due aspetti chiave: l'impatto dell'edificio sull'ambiente naturale e l'effetto sulla percezione della qualità interna. Per quanto riguarda il primo aspetto, secondo un approccio basato sul ciclo di vita, il 5-12% dei gas serra (GHG) di un edificio vengono rilasciati durante l'estrazione delle materie prime, la fabbricazione di prodotti da costruzione e i processi di costruzione, ristrutturazione e demolizione [40]. Invece, il dazio residuo è dovuto alle emissioni operative di GHG, che si verificano durante la vita operativa dell'edificio, che si prevede diminuiranno con il rafforzamento degli standard di efficienza energetica [41]. Inoltre, poiché gli esseri umani trascorrono più del 70% del loro tempo all'interno di un edificio [42], è stata introdotta la progettazione di un ambiente costruito

sensibile al clima [43]. Questo aspetto implica che le soluzioni progettate debbano garantire le condizioni richieste di comfort e benessere indoor, considerando anche gli eventi estremi più frequenti durante il periodo estivo. Con l'obiettivo di affrontare entrambi gli aspetti, ricercatori e progettisti stanno esaminando nuove tecnologie e sistemi [44]. Tra questi, l'incorporazione di materiali a cambiamento di fase (PCM) nell'involucro edilizio è riconosciuta come una delle soluzioni più interessanti [45]. Infatti i PCM possono contribuire, nei climi caldi, a contrastare l'impatto dell'isola di calore urbana e il continuo incremento della domanda di raffrescamento estivo e a ottenere migliori condizioni di comfort indoor. I PCM possono ridurre le fluttuazioni e i picchi di temperatura indoor grazie alla capacità di accumulo di energia termica latente [46] e di conseguenza la temperatura operativa [47]. In breve, i PCM possono immagazzinare quantità molto maggiori di energia termica per unità di massa rispetto ai materiali da costruzione convenzionali [48]. Nella letteratura recente diversi tipi di PCM sono stati analizzati utilizzando approcci numerici e sperimentali, anche variando le condizioni al contorno e il tipo di applicazioni. In tutti i casi la conclusione principale è che le prestazioni dipendono fortemente dal tipo di PCM, dalla sua posizione e dalla temperatura di transizione di fase del PCM [49]. La posizione ottimale del PCM (vicino alla superficie esterna o interna) dipende principalmente dalle condizioni climatiche [50].

Considerando l'obiettivo della ricerca proposta, è stata condotta una revisione approfondita della letteratura, concentrandosi sugli studi disponibili sui materiali a cambiamento di fase macro-incapsulati in un clima mediterraneo. Come esaminato da Wang et al. [51], esiste un'ampia gamma di spazi operativi e scelte, e i PCM macro-incapsulati per applicazioni di riscaldamento e raffreddamento hanno guadagnato il maggiore interesse di ricerca nello sviluppo della loro applicazione nell'involucro edilizio esistente [52]. Tuttavia, quando il PCM non viene selezionato correttamente, può aumentare la domanda di energia dell'edificio [53].

La Tabella 9 propone le principali informazioni riportate negli studi applicativi e quindi l'anno di pubblicazione, l'approccio dello studio (numerico o sperimentale), il tipo di PCM, il suo spessore ( $x$ ), la temperatura di fusione ( $T_f$ ), le caratteristiche dell'elemento edilizio, le condizioni al contorno interne (temperatura di set point -  $T_{sp}$ ) ed esterne e i risultati principali.

Gli studi numerici sono focalizzati sull'ottimizzazione di uno o più parametri di progettazione come il punto di fusione o lo spessore e la posizione. Markarian e Fazelpour [54] hanno dimostrato che il PCM con una temperatura di fusione di 25°C ha prestazioni migliori in termini di carico di raffreddamento, mentre i PCM con una temperatura di fusione di 21°C hanno prestazioni migliori durante il riscaldamento. La posizione ottimale è stata trovata al centro o vicino allo strato interno delle pareti esterne. Secondo Sarri et al. [55], per ridurre al minimo il consumo energetico annuale, la temperatura di fusione ottimale è vicina a 28°C per le zone climatiche mediterranee e semi-aride e tra 19°C e 21°C per i climi secchi. Per il clima mediterraneo caldo e moderato del Marocco [56], con una temperatura massima media in estate di 33.7°C, una temperatura di fusione del PCM di 25°C ha portato alla temperatura ottimale e un aumento dello spessore del PCM con adeguati tassi di ventilazione meccanica può garantire una notevole riduzione del disagio termico e del consumo di energia per il raffrescamento. Sun et al. [57] hanno verificato l'effetto di sei fattori: temperatura dell'aria esterna ed interna, livello di isolamento, spessore, posizione all'interno della cavità della parete e temperatura

di transizione. Per i casi studiati, la temperatura di transizione di fase ottimale è stata trovata nell'intervallo 27-31°C quando la temperatura dell'aria interna è stata impostata a 24°C. Adilkhanova et al. [58], considerando l'aspetto del comfort termico, hanno scoperto che nello scenario attuale il punto di fusione di 26°C e l'adozione della ventilazione naturale sono la strategia più efficiente. Successivamente, sotto l'impatto del cambiamento climatico (2095), la temperatura di fusione ottimale cambia tra 26°C e 28°C. Invece, Hamidi et al. [59], simulando otto città diverse hanno scoperto che il risparmio energetico può raggiungere il 56% nelle città del Mediterraneo nord-orientale utilizzando un PCM con una temperatura di fusione di 26°C, mentre non è stato notato alcun risparmio energetico per le città del sud-est. M'hamdi et al. [60] hanno sottolineato che l'uso del PCM in condizioni ottimali può ridurre il 10% dei costi energetici e 707 kg/anno di emissioni di CO<sub>2</sub> con un periodo di ritorno dell'investimento compreso tra 7 e 43 anni. Ismail et al. [61] hanno riscontrato una notevole riduzione (0.5-3.3°C) della temperatura interna con una temperatura di fusione di 27°C.

I dati sperimentali disponibili sono ottenuti da misurazioni nella sala prova o in laboratorio con moduli di PCM di dimensioni rappresentative. Le condizioni interne sono solitamente libere e quelle esterne sono simulate in termini di variazione di temperatura con una camera climatica o apparecchiature semplificate; nel frattempo, l'effetto delle radiazioni non è considerato. Le condizioni al contorno adottate sono il limite principale degli esperimenti proposti; un altro punto critico è rappresentato dalla tempistica in quanto l'attività sperimentale è solitamente sviluppata per alcuni giorni o poche settimane. Wijesuriya e Tabares-Velasco [62][63] hanno testato due PCM macro-incapsulati in un ambiente controllato per raccogliere dati con lo scopo di convalidare gli algoritmi di modellazione. Gli esperimenti in laboratorio indicano che i Sali idrati mostrano effetti di sottoraffreddamento, mentre un BioPCM non è interessato da questo fenomeno. Secondo Wu et al. [64] il PCM posizionato all'esterno protegge dalla condensa e dal rischio di muffa con una migliore capacità di accumulo/rilascio di calore. Al-Yasiri e Szabó [65], con uno studio sperimentale sul tetto, hanno anche scoperto che l'applicazione vicino all'ambiente interno offre il peggior comportamento termico; nel frattempo, è possibile invece ottenere prestazioni migliori al centro del tetto. Tuttavia, questa posizione può influenzare la resistenza meccanica. In un altro lavoro [66] hanno scoperto che maggiore è l'area di incapsulamento maggiore è la riduzione della temperatura e del trasferimento di calore e più lungo è il tempo di ritardo del calore. Abbas, Jalil e Ahmed [67] hanno scoperto che il livellamento del carico termico dell'indice può essere ridotto del 23.84% durante il giorno del test, aumentando il ritardo di due ore e spostando il carico di picco. Secondo Arumugam e Shaik[68] la combinazione di PCM al centro del cemento più rigido e sulle tegole del tetto ha mostrato il più alto risparmio annuale sui costi di condizionamento dell'aria e la più alta mitigazione annuale delle emissioni di carbonio. L'analisi proposta indica che gli studi disponibili adottano sia metodi sperimentali che numerici; tuttavia, la maggior parte di esse sono orientate teoricamente e risolvono problemi di ottimizzazione per stabilire parametri di progettazione migliori. In queste simulazioni le condizioni esterne vengono solitamente modificate ma l'effetto dei carichi interni sulla transizione del cambiamento di fase non viene discusso e non c'è convalida sperimentale per i risultati. Invece gli studi sperimentali, di solito, utilizzano test su piccola scala per convalidare i modelli teorici rispetto ai dati sperimentali per periodi molto brevi. In breve, le applicazioni non tengono conto della variazione reale di tutte le condizioni climatiche esterne: ad

esempio, non solo la temperatura è importante per il cambiamento di fase ma anche l'effetto della radiazione solare. Inoltre, ci sono ancora molti ostacoli alla realizzazione di applicazioni su larga scala, principalmente quando il PCM macroincapsulato viene combinato con il calcestruzzo geopolimerico. Tutti gli studi disponibili sono focalizzati sulla caratterizzazione in laboratorio delle miscele di calcestruzzo e PCM microincapsulato, sulla conduttività termica e sulle proprietà strutturali. Ad esempio, Hassan et al. [69] hanno studiato capsule di materiale a cambiamento di fase in schiuma di poliuretano rivestita di geopolimero/calcestruzzo geopolimerico, mentre Ramakrishnan, Pasupathy e Sanjayan [70] hanno modificato un calcestruzzo geopolimerico aerato/schiumato con una perlite espansa paraffinica/idrofobica e hanno scoperto che l'incorporazione del 30% di PCM può ridurre la temperatura interna di picco di 3.76°C. Attraverso un modello numerico, Cao, Bui e Kjøniksen [71], utilizzando pareti multistrato che integrano materiali a cambiamento di fase microincapsulati nel calcestruzzo geopolimerico, hanno riscontrato una riduzione annuale dell'energia del 28-30%. Sukontasukkul et al. [72] hanno proposto un nuovo strato di calcestruzzo PCM a sandwich. Invece, non ci sono dati sul comportamento in situ in condizioni esterne ed interne reali e quindi c'è una mancanza di conoscenza sul comportamento termodinamico della combinazione tra PCM macroincapsulato e blocco di calcestruzzo geopolimerico con il materiale montato in serie con due strati diversi. È importante sottolineare che questa soluzione potrebbe risolvere il problema del deterioramento delle prestazioni strutturali.

Autori	Anno	Tipo di analisi	PCM	Stratigrafia (in →out)	Condizioni al contorno	Risultati
Markariana et al.	2019	Numerica	BioPCM (x=11.2 mm, T <sub>f</sub> =21°C) BioPCM (x=20.8 mm, T <sub>f</sub> =25°C) BioPCM (x=37.1 mm, T <sub>f</sub> =27°C) BioPCM (x=74.2 mm, T <sub>f</sub> =29°C)	Prima configurazione • Intonaco di gesso • Blocco di cemento • Polistirene estruso • BioPCM • Mattone Seconda configurazione • Intonaco di gesso • Blocco di cemento • BioPCM • Polistirene estruso • Mattone Terza configurazione • Intonaco di gesso • BioPCM • Blocco di cemento • Polistirene estruso • Mattone	IN T <sub>sp</sub> =20°C (inverno) T <sub>sp</sub> =26°C (estate)  OUT Tehra: estate calde Clima mediterraneo. Tabriz: clima freddo semi arido. Bandar Abas: clima caldo semi arido. Shiraz: estati mediterranee. Yazd: clima caldo desertico.	Tehra: riduzione dei carichi di riscaldamento e raffreddamento del 7,36%, del 3,98% e del consumo di energia elettrica del 5,21%. Tabriz: riduzione dei carichi di riscaldamento e raffreddamento del 4,96%, del 4,74% e del consumo di energia elettrica del 4,59%. Bandar Abas: riduzione dei carichi di riscaldamento e raffreddamento del 96,14%, del 4,8% e dei consumi di energia elettrica del 5,70%. Shiraz: riduzione dei carichi di riscaldamento e raffreddamento dell'8,24%, del 3,75% e del consumo di energia elettrica del 4,75%. Yazd: riduzione dei carichi di riscaldamento e raffreddamento del 7,84%, del 3,78% e del consumo di energia elettrica del 93%.
Sarri et al.	2021	Numerica	RT-27 Materiale organico macroincapsulato in lastre rigide di alluminio (x=5 e 10 mm; T <sub>f</sub> =27°C)	Configurazione della parete • Rivestimento in gesso con PCM • Mattoni cavi • Intercapedine d'aria • Mattoni cavi • Malta cementizia	IN T <sub>sp</sub> =18°C (inverno) T <sub>sp</sub> =27°C (estate)  OUT Algeria • Nord: clima mediterraneo. • Centro: clima semi arido. • Saharan Atlas: clima desertico.	Algeria settentrionale: riduzione del consumo annuo tra il 5,32% e il 7,94%. Algeria centrale: riduzione del consumo annuo tra il 4,03% e il 7,71% Zona desertica: riduzione del consumo annuo tra il 3,37% e il 4,45%
Wijesuriya et al.	2020	Sperimentale	BioPCM (T <sub>f</sub> =20°C-26°C) Sali idrati (T <sub>f</sub> =20°C-25°C)	Configurazioni delle pareti • Cartongesso normale • Sacchetti di BioPCM • Rame • Compensato • Cartongesso normale • Sacchetti di sali idrati • Rame • Compensato	IN Free-floating  OUT temperatura dell'acqua di mandata radiante compresa tra 5°C e 60°C	Un calo della temperatura di 5°C attraverso lo strato PCM.

Tabella 9. Articoli di ricerca con casi di studio

<b>Autori</b>	<b>Anno</b>	<b>Tipo di analisi</b>	<b>PCM</b>	<b>Stratigrafia (in →out)</b>	<b>Condizioni al contorno</b>	<b>Risultati</b>
Mechouet et al.	2021	Numerica	PCM macroincapsulato basato su sali idrati (T <sub>r</sub> =18°C-28°C)	Configurazione della parete • Intonaco di cemento • Muro di mattoni di argilla • PCM • Muro di mattoni di argilla • Intonaco di cemento	IN T <sub>sp</sub> =26°C (estate)  OUT Marocco • clima caldo semi-arido. • clima caldo mediterraneo. • clima temperato mediterraneo. • clima caldo desertico.	PCM da 18 mm e tasso di ventilazione di 3 ACH: riduzione delle temperature interne tra 1,92 °C e 2,33 °C e riduzione del consumo di energia di raffreddamento tra il 19,5 e il 62,9%
Sun et al.	2021	Numerica	PCM a base di paraffina, ottodecano (T <sub>r</sub> =27°C)	Configurazione della parete • Pannello di cartongesso • Isolamento in fibra di vetro • PCM • Isolamento in fibra di vetro • Pannello OSB • Rivestimento OSB	IN T <sub>sp</sub> =20°C, 22°C e 24°C  OUT Luglio – agosto (temperatura dell'aria tra 22 e 42°C).	Riduzione del flusso termico superiore al 50% con PCM all'interno della cavità della parete e quando lo spessore dello strato di PCM è cambiato da 3 mm a 7 mm.
Saffari et al.	2022	Numerica	Pannello modulare di accumulo compatto con PCM concentrato al 100% in peso (x=10 mm, T <sub>r</sub> =10°C-25°C)	Configurazione della parete • Pannello di rivestimento PCM • intercapedine d'aria • pannello isolante • superficie metallica	IN T <sub>sp</sub> =20°C (inverno) T <sub>sp</sub> =25°C (estate)  OUT Madrid: clima mediterraneo	L'adozione del PCM consente la massima efficienza di flessibilità con un valore del 244%.
Adlikhanova et al.	2021	Numerica	PCM a base organica	Configurazione della parete • PCM • Isolamento • Acciaio zincato	IN Free-floating  OUT Kazakistan: clima continentale estivo caldo influenzato dal Mediterraneo	L'applicazione di PCM in combinazione con la ventilazione naturale ha contribuito ad aumentare il periodo di ore senza disagio e ha notevolmente ridotto il numero di ore di disagio grave.

**Tabella 9. (Continua)**

<b>Autori</b>	<b>Anno</b>	<b>Tipo di analisi</b>	<b>PCM</b>	<b>Stratigrafia (in →out)</b>	<b>Condizioni al contorno</b>	<b>Risultati</b>
M'hamdi	2022	Numerica	BioPCM ( $T_f=25^\circ\text{C}$ ) PCM infinito ( $T_f=25^\circ\text{C}$ ) Esadecano+diatomite ( $T_f=23^\circ\text{C}$ )	Configurazione della parete • PCM • Blocco di cemento • Intonaco di cemento	IN $T_{sp}=18^\circ\text{C}$ (inverno) $T_{sp}=28^\circ\text{C}$ (estate) OUT • Egitto – Assuan: clima arido con inverno caldo • Marocco – Benguerir: clima semi-arido con inverno caldo • Tunisia – Tunisi: clima mediterraneo con estate calda	Il massimo risparmio energetico totale si ottiene nel clima arido al 10,5% e il valore più basso (2,75%) nel clima mediterraneo. Il PCM è più efficiente per il raffreddamento nel clima arido (7,3%) e il suo utilizzo nel clima sub-arido e in quello mediterraneo è più efficiente per il riscaldamento del 10,7%.
Wu et al.	2021	Sperimentale	PCM a base di idrocarburi, polimero a base di etilene (40%) e cera di paraffina (60%) ( $T_f=10^\circ\text{C}-28^\circ\text{C}$ ; $x=2.12$ mm)	Prima configurazione della parete • PCM • 2 strati di canapa-calce Seconda configurazione della parete • canapa-calce • PCM • canapa-calce Terza configurazione • 2 strati di canapa-calce • PCM	IN Prima configurazione della parete $26^\circ\text{C}\pm 0.4^\circ\text{C}$ Seconda configurazione della parete $27.1^\circ\text{C}\pm 0.8^\circ\text{C}$ Terza configurazione della parete $26.3^\circ\text{C}\pm 0.8^\circ\text{C}$ OUT $15^\circ\text{C}$ o $40^\circ\text{C}$	Il PCM influenza l'inerzia termica in modo diverso a seconda della sua posizione perché agisce anche come barriera al vapore. Il PCM posizionato sul lato esterno è stato consigliato dal punto di vista del risparmio energetico e del comportamento igrometrico dell'involucro.
Abbas et al.	2021	Sperimentale e numerica	Cera di paraffina ( $T_f=40^\circ\text{C}$ ) in piccole provette sigillate (diametro 29 mm × altezza 70 mm × spessore 0,4 mm)	Configurazione della parete • strato di malta • mattone cavo con PCM • strato di malta	IN Free-floating OUT Città di Diwaniya – Iraq: variazione di temperatura tra $30-49^\circ\text{C}$	Il PCM riduce la temperatura superficiale della parete sud e la temperatura dell'aria a circa $4,7^\circ\text{C}$ .

**Tabella 9. (Continua)**

Autori	Anno	Tipo di analisi	PCM	Stratigrafia (in →out)	Condizioni al contorno	Risultati
Arumugam et al.	2021	Sperimentale	Sale idrato (HS24) (T <sub>f</sub> =44°C; x=10 mm) Miscele di acidi grassi: • OM21: (T <sub>f</sub> =21°C; x=10 mm) • OM30: (T <sub>f</sub> =30°C; x=10 mm) • OM35: (T <sub>f</sub> =35°C; x=10 mm) • OM46: (T <sub>f</sub> =46°C; x=10 mm)	Tre posizioni di PCM all'interno del blocco di cemento: lato esterno, centro e lato interno. Il PCM è integrato nella parte superiore e inferiore delle tegole del tetto.	IN T <sub>sp</sub> =18°C  OUT Jodhpur: condizioni calde e secche Nuova Delhi: condizioni composite	La configurazione dell'edificio con OM30 PCM al centro del blocco di cemento e come strato esterno del tetto garantisce il massimo risparmio complessivo sui costi di condizionamento dell'aria (94,3 \$/anno in climi caldo-secchi e 96,9 \$/anno in climi composti) e la massima riduzione delle emissioni di carbonio, pari rispettivamente a 4,3 tonnellate di CO <sub>2</sub> /anno e 4,2 tonnellate di CO <sub>2</sub> /anno in climi caldo-secchi e composti.
Hamidi et al.	2021	Numerica	Paraffina RT22 (T <sub>f</sub> =22°C) Paraffina RT24 (T <sub>f</sub> =24°C) Paraffina RT26 (T <sub>f</sub> =26°C) Paraffina RT28 (T <sub>f</sub> =28°C) Paraffina RT30 (T <sub>f</sub> =30°C) Acido caprico (T <sub>f</sub> =32°C)	Muro di mattoni forati, ciascuno con otto fori (2,0 cm×2,5 cm), che possono essere caricati con PCM utilizzando contenitori in pellicola di plastica o con l'inserimento di macrocapsule di acciaio metallico.	IN Free-floating  OUT Regione mediterranea: • Al Hoceima (Marocco) • Malaga (Spagna) • Marsiglia (Francia) • Taher (Algeria) • Napoli (Italia) • Tripoli (Libia) • Ankara (Turchia) • Porto Said (Egitto).	PCM con T <sub>f</sub> = 22 °C, 30 °C e 32 °C portano a un risparmio energetico inefficiente in tutte le città. Il risparmio energetico con T <sub>f</sub> = 24 °C raggiunge valori fino all'8% per Al Hoceima (Marocco) e Marsiglia (Francia), e il 25% per Ankara (Turchia). Il risparmio energetico con T <sub>f</sub> = 26 °C raggiunge il 58%, 54%, 50%, 44%, 28% e 15% per Ankara (Turchia), Napoli (Italia), Al Hoceima (Marocco), Malaga (Spagna), Marsiglia (Francia) e Taher (Algeria), rispettivamente. Il risparmio energetico con T <sub>f</sub> = 28 °C non supera il 25% ad Ankara e il 10% ad Al Hoceima e Marsiglia.
Al-Yasiri et al.	2021a	Sperimentale	Cera di paraffina (T <sub>f</sub> =44°C)	Tetto Prima configurazione • Strato di finitura • PCM • Calcestruzzo • Malta di gesso Seconda configurazione • Strato di finitura • Calcestruzzo • PCM • Calcestruzzo • Malta di gesso Terza configurazione • Strato di finitura • Calcestruzzo • PCM • Malta di gesso	IN Free-floating  OUT Al Amarah (Iraq): sette giorni tra agosto e settembre 2020	La posizione vicina all'esterno ha raggiunto una riduzione massima della temperatura ambiente fino a 9°C. La riduzione del flusso di calore variava dal 24,4% al 49,9%, dal 13,5% al 41,7% e dal 7,8% al 29,3% rispettivamente per la 1a, 2a e 3a configurazione quando è stato utilizzato lo strato di finitura standard.

Tabella 9. (Continua)

<b>Autori</b>	<b>Anno</b>	<b>Tipo di analisi</b>	<b>PCM</b>	<b>Stratigrafia (in →out)</b>	<b>Condizioni al contorno</b>	<b>Risultati</b>
Al-Yasiri et al.	2021b	Sperimentale	Cera di paraffina ( $T_f=44^\circ\text{C}$ )	Tre mattoni in calcestruzzo con capsule PCM immerse durante la formatura ricavate da una barra di alluminio (spessore 1 mm).	IN Free-floating OUT Al Amarah (Iraq): settembre 2020	La riduzione più elevata della temperatura e del trasferimento di calore è del 156,5% e di circa il 61% con il mattone con 5 capsule e un'area di trasferimento di calore di 320 cm <sup>2</sup> . Il ritardo di tempo di riscaldamento più lungo è di 70-80 min.

**Tabella 9. (Continua)**

Per quanto riguarda il PCM microincapsulato, invece, è stata fatta una ottimizzazione numerica con lo scopo di progettare muri in calcestruzzo geopolimerico con materiali a cambiamento di fase.

La ricerca sui materiali innovativi per il miglioramento delle prestazioni degli edifici è di grande interesse in relazione agli obiettivi di risparmio energetico e riduzione dell'impatto ambientale pianificati dalla strategia europea. Il 14 luglio 2021, la Commissione europea ha adottato diverse misure importanti per raggiungere la neutralità climatica nell'UE entro il 2050, tra cui l'obiettivo intermedio di riduzione netta del 55% delle emissioni di gas serra entro il 2030 [73]. Le tecnologie dei materiali da costruzione sono la forza trainante per migliorare e potenziare l'efficienza energetica degli edifici e la funzionalità delle infrastrutture [74]. Tra i materiali più interessanti, ci sono i calcestruzzi geopolimerici e i materiali a cambiamento di fase (PCM). L'utilizzo di materiali riciclati in sostituzione di aggregati naturali per produrre calcestruzzo geopolimerico sta diventando una possibile alternativa per il riutilizzo di rifiuti di costruzione e demolizione con interessanti benefici ecocompatibili [75] e per supportare lo sviluppo sostenibile del settore delle costruzioni [76]. Sono stati proposti diversi tipi di applicazioni, come lo sviluppo di mattoni gommati utilizzando la gomma in granuli come unico aggregato fine nella produzione di mattoni autobloccanti geopolimerici [77]. Invece, Gerges et al. [78] hanno sottolineato che la miscela di calcestruzzo gommato ha generalmente una ridotta resistenza alla compressione ma anche una densità inferiore, una maggiore tenacità e una maggiore resistenza all'impatto rispetto al calcestruzzo convenzionale. Cui et al. [79] hanno introdotto due nuovi tipi di pannelli sandwich leggeri in composito geopolimerico; uno con strati di rivestimento in composito geopolimerico rinforzato con fibre e anima in schiuma di poliuretano, e un altro con foglio di polimero rinforzato con fibre di basalto. Longo et al. [80] hanno lavorato sul comportamento reologico, nonché sulle proprietà meccaniche e termiche, di una malta geopolimerica che incorpora ceneri volanti e aggregati di vetro espanso. Diversi articoli hanno indagato le caratteristiche termiche di diverse composizioni e pochi articoli forniscono indicazioni sui risparmi energetici affidabili durante l'uso dell'edificio. Colangelo et al. [81] hanno proposto di sostituire parte degli aggregati con rifiuti di plastica e di utilizzare un legante geopolimerico a base di ceneri volanti per la produzione di calcestruzzo a bassa conduttività. Wu et al. [82] hanno utilizzato la scoria di forno a ossigeno basico come materiale di raffreddamento radiativo nel rivestimento geopolimerico raggiungendo un'emissività di 0,95 nell'intervallo di 8-13  $\mu\text{m}$  e presenta inoltre un'elevata conduttività.

Il geopolimero di cenere volante schiumato è stato sintetizzato da Su et al. [83] per produrre calcestruzzo leggero geopolimerico. Per densità da 1200 a 600  $\text{kg/m}^3$ , la conduttività termica è diminuita da 0.70 a 0.22  $\text{W/mK}$ , il che è molto meglio di quello del normale cemento Portland. Parcesepe et al. [84] hanno scoperto che un calcestruzzo attivato con alcali può raggiungere caratteristiche meccaniche superiori a quelle del normale calcestruzzo Portland ma anche un miglioramento della capacità di isolamento termico. Dhasindrakrishna et al. [85] hanno sottolineato l'interesse per il calcestruzzo espanso geopolimerico, grazie alla loro struttura porosa che porta i meriti intrinseci di isolamento leggero, acustico e termico e resistenza al fuoco. Ad esempio, Zang et al. [86] hanno scoperto che la conduttività termica è in un intervallo di 0.15-0.48  $\text{W/m K}$ . Wang et al. [87] che per il calcestruzzo geopolimerico leggero a base di cenere volante, l'adozione dello 0-1% di fibre di polipropilene può aumentare la conduttività termica variando l'assorbimento di umidità. Secondo Henon et al.

[88], variando la frazione di volume dei pori in una schiuma geopolimerica tra il 65 e l'85%, la conduttività termica cambia tra 0.35 e 0.12 W/m K.

Le prestazioni di capacità termica dei calcestruzzi geopolimerici possono essere migliorate anche mediante materiali a cambiamento di fase microincapsulati (PCM). Una revisione degli ultimi risultati di ricerca relativi all'uso di PCM nei materiali geopolimerici è stata presentata da Łach et al. [89]. Il calore latente e la temperatura di fusione dei prodotti studiati sono solitamente compresi tra 96.1-230 J/g e 21.9-33.8 °C, rispettivamente [90].

Esistono diversi studi sulla caratterizzazione in laboratorio di nuovi compositi e prodotti; ad esempio, Hassan et al. [69] studiano le prestazioni termiche e strutturali di capsule di materiale a cambiamento di fase in schiuma di poliuretano rivestita con geopolimero/compositi di calcestruzzo geopolimero con risultati interessanti. Ramakrishnan et al. [70] hanno modificato un calcestruzzo geopolimero aerato/schiumato con una paraffina/perlite espansa idrofobica e hanno scoperto che l'incorporazione del 15% e del 30% di PCM può ridurre la temperatura interna di picco rispettivamente di 1.85 °C e 3.76 °C, migliorando al contempo la capacità di accumulo termico del 105% e del 181%. Hassan et al. [91] hanno testato nuove macrocapsule di materiale a cambiamento di fase in argilla espansa rivestita con geopolimero aggiunte al calcestruzzo geopolimero. Hanno osservato un decremento delle temperature superficiali massime di 8.0 °C rispetto a una miscela senza PCM e la trasmittanza termica è passata da 2.0 a 0.9 W/m<sup>2</sup>K mediante un modello numerico. Cao et al.[71] hanno utilizzato pareti multistrato integrando materiali a cambiamento di fase microincapsulati nel calcestruzzo geopolimerico e hanno riscontrato una riduzione annuale dell'energia del 28-30%. Pilehvar et al. [92] hanno sottolineato che l'aggiunta di PCM rallenta la velocità di reazione sia del geopolimero che della pasta di cemento Portland. I tempi di presa erano più rapidi quando la temperatura veniva aumentata. Tuttavia, il principale svantaggio dell'aggiunta di materiali a cambiamento di fase microincapsulati è la significativa diminuzione della resistenza alla compressione [93][94].

Come riportato nelle analisi precedenti, la letteratura recente è principalmente focalizzata sulla caratterizzazione delle proprietà termiche e strutturali della miscela per migliorare le proprietà termiche del calcestruzzo geopolimerico con materiali a cambiamento di fase. Invece, i documenti proposti analizzano il comportamento della combinazione tra PCM macro-incapsulato e micro-incapsulato e blocco di calcestruzzo geopolimerico con il materiale montato in serie come due strati diversi. Queste soluzioni potrebbero risolvere il problema del deterioramento delle prestazioni strutturali. Inoltre, la stima del potenziale risparmio energetico e il miglioramento del comportamento termico vengono solitamente eseguiti con un modello semplificato su brevi periodi e ci sono poche indicazioni sul comportamento energetico globale. A questo proposito, i documenti propongono un approccio completo per la valutazione del fabbisogno di riscaldamento ed energia nonché per l'energia primaria annuale, perché in alcuni climi può accadere che il PCM migliori l'edificio solo in una stagione, ad esempio l'estate, ma la riduzione dei guadagni solari potrebbe peggiorare le prestazioni invernali. Si tratta di un problema di ottimizzazione che richiede la considerazione delle variabili principali, come il punto di fusione, lo spessore e la posizione. In particolare, più in dettaglio, viene proposta un'indagine numerica per selezionare la configurazione ottimale di un innovativo pacchetto multistrato da installare nei

climi mediterranei. Dal punto di vista finanziario questo lavoro è stato supportato da Horizon 2020 con il progetto Green INSTRUCT (Green Integrated Structural Elements for Retrofitting and New Construction of Buildings). Questo progetto è focalizzato sullo sviluppo di un blocco strutturale modulare prefabbricato che è superiore ai pannelli prefabbricati in cemento armato convenzionali in virtù del suo peso ridotto, delle migliori prestazioni acustiche e termiche e delle molteplici funzionalità. In particolare, per quanto riguarda la parete con applicato PCM micro-incapsulato, lo studio descrive l'approccio progettuale e le valutazioni effettuate per selezionare i tipi e gli spessori dei materiali con l'obiettivo di migliorare le prestazioni energetiche e il microclima interno dello spazio abitativo in un clima tipico del Sud Italia. Le indicazioni ottenute e l'approccio metodologico introdotto possono essere utili per i progettisti e per i ricercatori per identificare il miglior layout complessivo di installazioni sperimentali innovative in condizioni esterne reali. Inoltre, i risultati discussi saranno utilizzati nei mesi successivi per confrontare le prestazioni attese con quelle sperimentali; mentre lo studio della parete con PMC macro-incapsulato discute il comportamento termodinamico considerando il monitoraggio a lungo termine (dal 1° maggio al 31 luglio) delle temperature superficiali all'interfaccia dei materiali principali e il flusso di calore in condizioni interne ed esterne reali. I dati raccolti, non disponibili da altri studi, consentono la caratterizzazione del ciclo di transizione del PCM in diverse combinazioni di condizioni esterne in termini di temperatura, radiazione solare e fenomeni ventosi e piovosi. Questa ricerca vuole dimostrare l'efficacia dell'adozione di PCM in un clima mediterraneo senza un approccio semplificato di analisi numerica e considerando tutte le possibili variabili per l'attivazione del materiale, a differenza dell'approccio in laboratorio.

Nei paragrafi successivi verranno mostrati i risultati ottenuti da questi studi.

### **3.1.1. Ottimizzazione numerica per la progettazione di pareti in calcestruzzo geopolimerico con materiali a cambiamento di fase nel clima mediterraneo**

In questo studio viene proposto un metodo di ricerca dettagliato per la progettazione ottimizzata di una nuova soluzione passiva considerando sia gli aspetti energetici che quelli di comfort interno. L'approccio si basa su due fasi principali: un'indagine parametrica preliminare seguita da un processo di ottimizzazione multiobiettivo vincolato, al fine di fornire il miglior compromesso di configurazioni.

Viene inoltre sviluppato uno studio di caso perché i risultati possono essere utili per altre ricerche nel campo delle soluzioni innovative o quando i progettisti devono selezionare i valori ottimali per le variabili di progettazione di un pacchetto di pareti con materiali PCM da installare nelle aree del Mediterraneo.

Il primo passo è uno studio parametrico con cui viene studiata l'influenza delle principali variabili di progettazione. In dettaglio, abbiamo variato lo spessore dell'isolamento, il tipo di intercapedine d'aria (ventilata o meno) e il suo spessore, e il tipo di PCM, considerando anche diversi metodi di integrazione e la posizione (lato interno, lato esterno ed entrambi i lati). Il confronto delle possibili configurazioni di progettazione si basa sulla valutazione del fabbisogno energetico di raffreddamento ( $E_C$ ) e riscaldamento ( $E_H$ ), della richiesta annuale di energia primaria ( $EP_{\text{yearly}}$ ) e del numero di ore di disagio ( $dH$ ).  $E_C$  ed  $E_H$  sono l'energia richiesta per garantire la temperatura operativa di comfort, rispettivamente, durante l'estate e l'inverno. Le condizioni di

comfort sono espresse secondo lo standard ASHRAE 55-2004 [95]. Per le stagioni di raffreddamento e riscaldamento, la resistenza degli indumenti deve essere impostata rispettivamente su 0.5 Clo e 1.0 Clo. L'efficacia delle configurazioni progettate è stata valutata attraverso la valutazione della percentuale di risparmio energetico primario annuo ( $\Delta EP$ ) e della percentuale di riduzione delle ore di disagio ( $\Delta dH$ ). L'ottimizzazione multi-obiettivo è il secondo passaggio per valutare la migliore configurazione di progettazione di compromesso tra le soluzioni più interessanti trovate con l'analisi parametrica. Lo strumento di ottimizzazione è stato utilmente applicato dagli autori anche in altri studi per la selezione di una configurazione di parete vivente nel clima mediterraneo [96]. Il problema di ottimizzazione necessita della definizione delle funzioni obiettivo che in questo caso sono la minimizzazione del fabbisogno energetico di riscaldamento e raffreddamento; infatti, l'adozione di soluzioni passive può variare i guadagni e le perdite di calore in tutto l'involucro edilizio e, quindi, una scelta appropriata può ridurre la domanda di energia primaria. Spesso, i problemi di ottimizzazione per l'involucro edilizio sono organizzati senza considerare l'aspetto del comfort termico [97]. Invece, in questo studio, le ore di disagio sono considerate un vincolo limitante per determinare le soluzioni del fronte di Pareto. Per il problema di ottimizzazione, le configurazioni più interessanti ottenute nell'analisi parametrica vengono valutate variando l'esposizione dell'installazione. Il risultato finale è il fronte di Pareto [98], che è l'insieme delle soluzioni non dominate.

### 3.1.2. Presentazione del caso studio

La sala prove MATRIX (Multi Activity Test-Room for Innovating<sup>X</sup>) del Dipartimento di Ingegneria dell'Università del Sannio è utilizzata come caso di studio perché è il sito di installazione per la campagna sperimentale. MATRIX si trova a Benevento (130 m sul livello del mare), una città della Campania nel sud Italia.

MATRIX (Figura 2a) è una sala prove di grandi dimensioni ( $36 \text{ m}^2$ ) con dimensioni lorde di  $6.00 \times 6.00 \times 5.50$  m. Basamento e tetti in legno e un telaio verticale in acciaio compongono la struttura dell'edificio. Pannelli di compensato, senza interruzioni, racchiudono tutti i bordi del cubo, al fine di evitare i ponti termici. MATRIX consente di testare facciate o componenti fino a 3.0 m di altezza e 5.0 m di larghezza perché è presente un sistema meccanico che consente di modificare tre delle quattro pareti verticali. Il calcestruzzo cellulare aerato e i pannelli isolanti sottovuoto sono gli elementi base della configurazione esistente con spessore di 14 cm e una trasmittanza termica complessiva ( $U$ ) di  $0.40 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . C'è una finestra con telaio in legno, doppio strato di vetro elettrotropico;  $U$  è  $2.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

Una descrizione dettagliata della sala prove è già stata presentata da Ascione et al. [99] che hanno anche costruito un modello numerico di MATRIX per mezzo di EnergyPlus [33], attraverso un programma di interfaccia, ovvero DesignBuilder [32]. Il modello numerico è stato simulato in condizioni reali, sia interne che esterne, ed è stato calibrato secondo le linee guida ASHRAE [100].

Nel presente studio, il modello di simulazione calibrato è stato modificato per essere un ufficio con un occupante. Il sistema di condizionamento è costituito da un impianto idraulico con ventilconvettori in ambiente

alimentati da un chiller raffreddato ad aria (rapporto di efficienza energetica nominale di  $3.5 W_{TH}/W_{EL}$ ) e da una caldaia a gas (efficienza nominale del 92%). Le condizioni al contorno adottate sono le seguenti:

- la temperatura di set-point di progetto dell'aria è di  $20^{\circ}\text{C}$  in inverno e  $26^{\circ}\text{C}$  in estate, secondo i requisiti di comfort [101] e le condizioni imposte dalla norma tecnica [102];
- Il periodo di riscaldamento va dal 15 novembre al 31 marzo e il periodo di raffreddamento dal 15 maggio al 30 settembre, e in entrambi i casi solo durante i giorni feriali, dalle 8:00 alle 20:00;
- Il tasso di ricambio dell'aria è pari a  $0.3 \text{ h}^{-1}$ .



Figura 2. (a) MATRIX layout. (b) Installazione del sistema in fase di ricerca per ulteriori studi

Per le simulazioni è stato creato il file meteo orario con dati monitorati da aprile 2014 a dicembre 2021 tramite la stazione climatica sul tetto del laboratorio. Secondo i valori monitorati, Benevento ha un clima tipicamente mediterraneo e rientra nella zona C secondo la classificazione di Köppen [103].

Il sistema multistrato analizzato è stato progettato nell'ambito del progetto Green INSTRUCT. È costituito da tre elementi principali: pannello interno, strato isolante in schiuma intermedio e pannello esterno. Questi pannelli sono tenuti insieme da un telaio in alluminio realizzato con rifiuti di costruzione e demolizione (CDW) per estrusione. Il pannello interno è costituito da un rivestimento in alluminio con uno strato di calcestruzzo a base di magnesio (MOC) seguito da uno strato di geopolimero, uno strato di schiuma di poliuretano riciclata, un'intercapedine d'aria, un altro strato di schiuma di PU e uno strato finale di geopolimero. I risultati degli esperimenti sulle proprietà meccaniche, come la resistenza alla compressione della sintesi del geopolimero, sono descritti nel rapporto tecnico [104]. Lo strato intermedio è costituito da 10 cm di isolamento ed è collegato al pannello interno mediante barre filettate che consentono la creazione di un'altra intercapedine d'aria.

La Tabella 10 mostra le caratteristiche di tutti i materiali coinvolti nella configurazione di progettazione di base: spessore ( $s$ ), conduttività termica ( $\lambda$ ) o resistenza termica ( $R$ ), densità ( $\rho$ ) e calore specifico ( $c_p$ ).

Materiali	s (m)	$\lambda$ (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	cp (kJ/kgK)
MOC	0.01	0.7	1100	1000
Geopolimero	0.015	1.0	1200	750
Poliuretano	0.04	0.025	100	1600
Intercapedine d'aria	0.06		R= 0.18 (m <sup>2</sup> K/W)	
Poliuretano	0.04	0.025	100	1600
Geopolimero	0.015	1.0	1200	750
Intercapedine d'aria	0.06		R= 0.18 (m <sup>2</sup> K/W)	
Poliuretano	0.10	0.026	100	1600

Tabella 10. Proprietà della configurazione di progettazione di base

La conduttività e la densità sono fornite dai produttori durante il progetto; le proprietà non disponibili sono tratte da standard internazionali [105][106][107].

La trasmittanza termica di questa configurazione è 0.13 W/m<sup>2</sup> K, la capacità termica è 66.8 kJ/m<sup>2</sup> K e la massa superficiale è 65.0 kg/m<sup>2</sup>. In base a questo valore, si può affermare che il livello di isolamento è molto elevato rispetto al patrimonio edilizio nella zona mediterranea ma anche con valori soglia considerati dal Decreto Ministeriale italiano [108]. Invece, le prestazioni estive potrebbero non essere buone perché il pacchetto è caratterizzato da una bassa massa termica (<230 kg/m<sup>2</sup>). Nell'analisi seguente, questa configurazione è considerata la configurazione di progettazione di base. Lo strato esterno è una scatola verde per la quale un'analisi di sensibilità relativa allo strato verde è già stata presentata dagli autori [96].

Partendo da questa proposta di progettazione, lo studio si concentra sulla selezione del PCM da accoppiare con i blocchi geopolimerici variando gli spessori degli strati principali della configurazione di progettazione di base. Più in dettaglio, le configurazioni alternative sono definite variando:

- lo spessore degli strati di poliuretano e dell'intercapedine d'aria per il pannello interno;
- lo spessore e il tipo di ventilazione dell'intercapedine d'aria nello strato intermedio;
- la posizione e il tipo di PCM.

La variazione dello spessore dell'intercapedine d'aria è anche legata a una variazione dello spessore del poliuretano esterno perché lo spessore totale è mantenuto costante (30 cm) così come la dimensione per il modulo interno (18 cm). L'inserimento dello strato con PCM è stato valutato sul lato interno del pacchetto di pareti descritto (Figura 3a), sul lato esterno (Figura 3b) e su entrambi i lati. I pannelli di rivestimento o gli intonaci con PCM microincapsulati sono stati considerati per l'applicazione interna al posto del MOC.

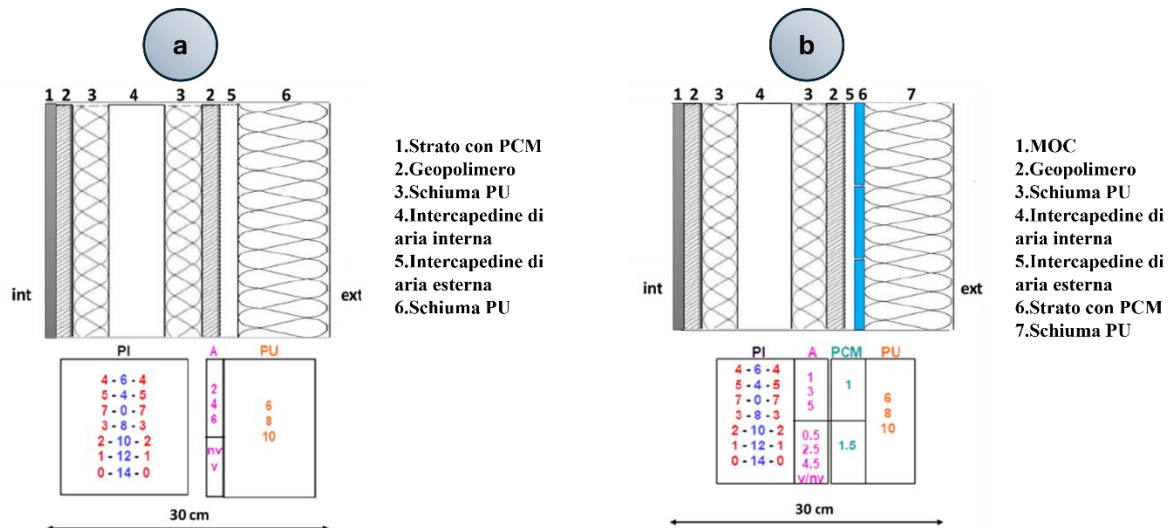


Figura 3. Schema delle configurazioni simulate: (a) PCM sul lato interno; (b) PCM sul lato esterno

I PCM macro-incapsulati sono stati presi in considerazione per gli inserimenti sul lato esterno e, in questo caso, il MOC era lo strato interno. Per facilitare il processo di solidificazione, il PCM è stato inserito tra l'intercapedine d'aria e il poliuretano esterno. Di conseguenza, con l'obiettivo di avere sempre lo stesso spessore totale, nelle applicazioni sul lato esterno lo spessore dell'intercapedine d'aria era inferiore al lato interno. Sono stati valutati due spessori per l'applicazione esterna dei PCM, ovvero 1.0 cm e 1.5 cm. Questi sono i valori commerciali più comuni e sono anche le dimensioni disponibili per il prodotto selezionato. Infine, sono state valutate 210 configurazioni con PCM sul lato interno, 504 configurazioni con PCM sul lato esterno e 60 configurazioni con PCM su entrambi i lati. Per la simulazione, la parete multistrato proposta è applicata sull'esposizione a sud perché i ricercatori più interessanti [109][110] indicano che la valutazione sperimentale dei PCM viene solitamente eseguita per questo lato, che è considerato il migliore.

È necessario sottolineare che il modello di simulazione adottato è stato validato con dati sperimentali per la configurazione attuale con pannello isolante sottovuoto. Invece, le configurazioni proposte nella Figura 3.2 non sono state verificate mediante dati sperimentali. Infatti, questo studio è stato eseguito con l'obiettivo di selezionare il tipo di PCM per la campagna sperimentale da condurre nell'ambito del progetto HORIZON. Nei mesi successivi, con i dati registrati, è stato poi effettuato un confronto tra variabili simulate e monitorate per discutere il problema della deviazione delle prestazioni in campo dei materiali a cambiamento di fase.

Inoltre, i risultati discussi sono stati utilizzati nei mesi successivi per confrontare le prestazioni previste con quelle sperimentali. Infatti, è in corso una campagna di monitoraggio per il pacchetto di parete descritto.

Nell'analisi proposta la nomenclatura di riferimento è

$$PI_{xyx}A_{zvy}PU_t$$

dove:

- PI è il pannello interno, “x” indica lo spessore (cm) del poliuretano e “y” indica lo spessore (cm) dell'intercapedine d'aria del PI;

- A è l'intercapedine d'aria del pannello intermedio, "z" indica lo spessore (cm), "v" indica la cavità ventilata (leggermente) e in, in alternativa, "nv" indica la cavità non ventilata;
- "t" è lo spessore (cm) del poliuretano dello strato intermedio (PU).

Tutte le soluzioni con materiale a cambiamento di fase sul lato interno sono state identificate dal nome del materiale prima della nomenclatura descritta. Invece, i PCM macro-incapsulati sono stati identificati con il nome e lo spessore del materiale a cambiamento di fase tra il termine  $A_{zv}$  e il termine  $PU_t$ . Infine, le soluzioni con PCM su entrambi i lati sono state connotate inserendo "in + out" prima dei criteri di identificazione descritti in precedenza.

### 3.1.3. Caratteristiche dei PCM selezionati

I PCM sono stati selezionati tra i prodotti commerciali disponibili per i quali è disponibile la curva di fusione e solidificazione. Per quanto riguarda i materiali da costruzione contenenti PCM microincapsulati, sono stati presi in considerazione i seguenti prodotti:

- Comfortboard<sup>®</sup> (pannello di rivestimento);
- Weber.mur clima<sup>®</sup> (intonaco interno);
- Dry Clay Plaster Trocken-Lehmputz-PCM<sup>®</sup> (intonaco interno);
- SmartBoard<sup>™</sup> (cartongesso);
- Enerciel<sup>®</sup> (materiale di finitura).

I primi tre materiali contengono lo stesso PCM microincapsulato (Micronal<sup>®</sup>), con una temperatura di fusione ( $T_f$ ) di 23 °C [111]. Può essere integrato con diversi sistemi nei materiali da costruzione. Il primo pannello di rivestimento esaminato è il prodotto Knauf Comfortboard<sup>®</sup> che contiene l'80% di gesso e il 20% di paraffina. Ha uno spessore di 12.5 mm, un punto di fusione pari a 23 °C e una capacità di accumulo termico (LHS) di 207 kJ/m<sup>2</sup>. Weber.mur clima<sup>®</sup> e Dry Clay Plaster Trocken-Lehmputz-PCM<sup>®</sup> sono due intonaci per applicazioni interne, prodotti rispettivamente da Weber Saint-Gobain e Pro Lehm Frauwallner KG. In particolare, il primo è una malta minerale secca a base di gesso, in cui le microcapsule Micronal<sup>®</sup> sono aggiunte con additivi minerali leggeri per una migliore lavorazione e per rafforzare il legame. Ai fini di questo studio, è stato considerato uno spessore dell'intonaco di 15 mm e quindi il PCM è del 20% in peso. Il secondo prodotto è un intonaco secco a base di argilla con il 30% in peso di Micronal<sup>®</sup> PCM; uno spessore di 10 mm è stato considerato nell'analisi seguente. In breve, tutte le informazioni necessarie per la modellazione del PCM in EnergyPlus sono state ottenute dall'app Web messa a disposizione dal produttore [112]. Grazie a questa applicazione, è possibile valutare la densità, la conduttività termica, la capacità termica latente ( $h_f$ ), la capacità termica ( $Q_f$ ) e la curva di fusione riportata nella Figura 4.

Lo SmartBoard<sup>™</sup> ha uno spessore di 15 mm e contiene il 26% di frazione di massa di Micronal<sup>®</sup> PCM con un punto di fusione di 26 °C. La capacità di accumulo di calore dello SmartBoard<sup>™</sup> è di 330 kJ/m<sup>2</sup>. In questo caso, la curva temperatura media cumulativa-entalpia (Figura 4d) è stata ottenuta grazie allo studio di Ozdenefe et al. [113].

Infine, Enerciel® è un rivestimento superficiale con PCM biologico microincapsulato (INERTEK 23 in forma di sospensione), 50% in peso, gesso (10-15%) e un legante di titanio. Il punto di fusione può variare da 23 °C a 26 °C. Il prodotto può avere uno spessore massimo di 3.0 mm ed è adatto per applicazioni interne su pareti e soffitti. In questo studio, vengono considerate una temperatura di fusione di 26 °C e una capacità di accumulo latente di 186.3 kJ/m<sup>2</sup>. La curva entalpia media cumulativa-temperatura è già disponibile nella libreria EnergyPlus.

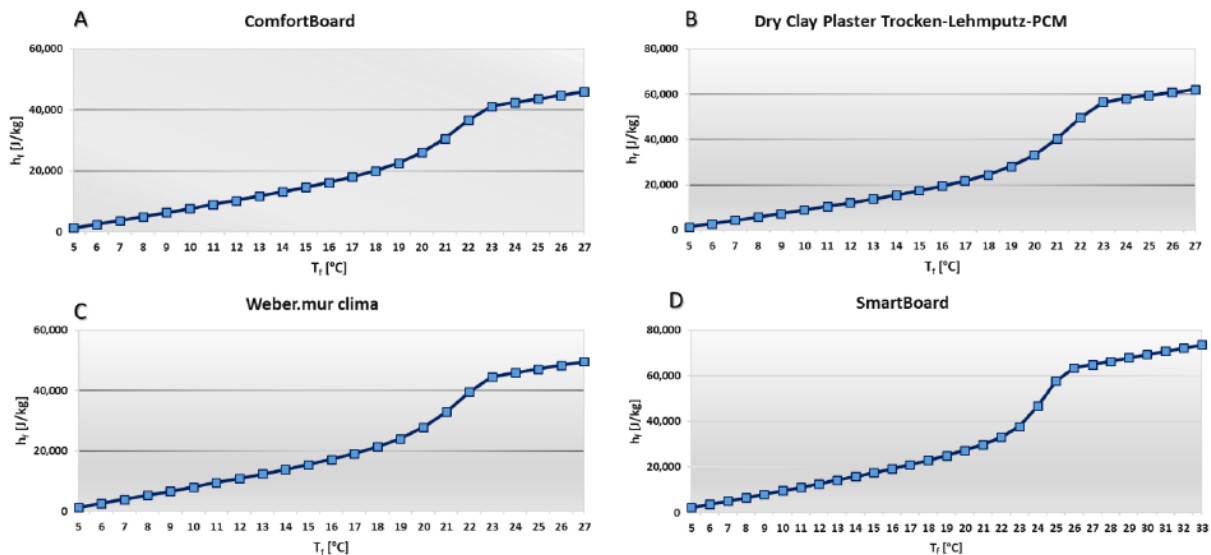


Figura 4. Funzione entalpia-temperatura: (A) Comfortboard®; (B) Weber.mur clima®; (C) Dry Clay Plaster; (D) SmartBoard™

La Tabella 11 riassume le principali caratteristiche dei materiali da costruzione con PCM microincapsulato.

	$T_f$ (°C)	s (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	$c_p$ (kJ/kg)	$h_f$ (kJ/kg)	LHS (kJ/m <sup>2</sup> )	$Q_f$ (kJ/m <sup>2</sup> K)
<b>Comfortboard®</b>	23	12.5	880	0.230	1170	18.90	207.9	12.87
<b>Weber.mur clima®</b>	23	15	1000	0.200	1380	20.70	205.3	20.70
<b>Dry Clay Plaster PCM®</b>	23	10	1100	0.400	2000	31.10	225.9	22.00
<b>Enerciel®</b>	23-26	3	832	0.148	2500	73.56	183.6	6.24
<b>SmartBoard™</b>	26.5	15	770	0.134	1200	28.57	330.0	13.86

Tabella 11. Proprietà dei materiali da costruzione con PCM microincapsulato

I materiali selezionati per l'applicazione esterna sono CSM (moduli di stoccaggio compatti) riempiti con PCM macroincapsulato [114]. I materiali di riempimento possono essere organici, indicati come RT®, o materiali inorganici, indicati come SP®, e questi assicurano un'ampia gamma di temperature a seconda delle applicazioni. I CSM sono disponibili nelle dimensioni di 450 × 300 mm<sup>2</sup> e per diversi spessori. La Tabella 12 riassume le caratteristiche principali dei prodotti selezionati e la Figura 5 mostra le curve di fusione; in questo caso, la gamma di curve è diversa perché sono state costruite con i dati disponibili dai produttori.

CSMs	$T_f$ (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	$c_p$ (kJ/kg)	$h_f$ (kJ/kg)	$Q_f$ (kJ/m <sup>2</sup> K)
<b>450x300 mm<sup>2</sup></b>						
RT26 <sup>®</sup>	26	880	0.2	2000	180 (19-34°C)	<b>17.6</b>
RT28HC <sup>®</sup>	28				250 (21-36°C)	
RT31 <sup>®</sup>	31				165 (23-28°C)	
SP26E <sup>®</sup>	26	1500	0.6		180 (17-32°C)	<b>30</b>
SP29Eu <sup>®</sup>	29	1550			200 (22-37°C)	<b>31</b>
SP31 <sup>®</sup>	32	1350			210 (23-28°C)	<b>27</b>

Tabella 12. Proprietà dei PCM macroincapsulati

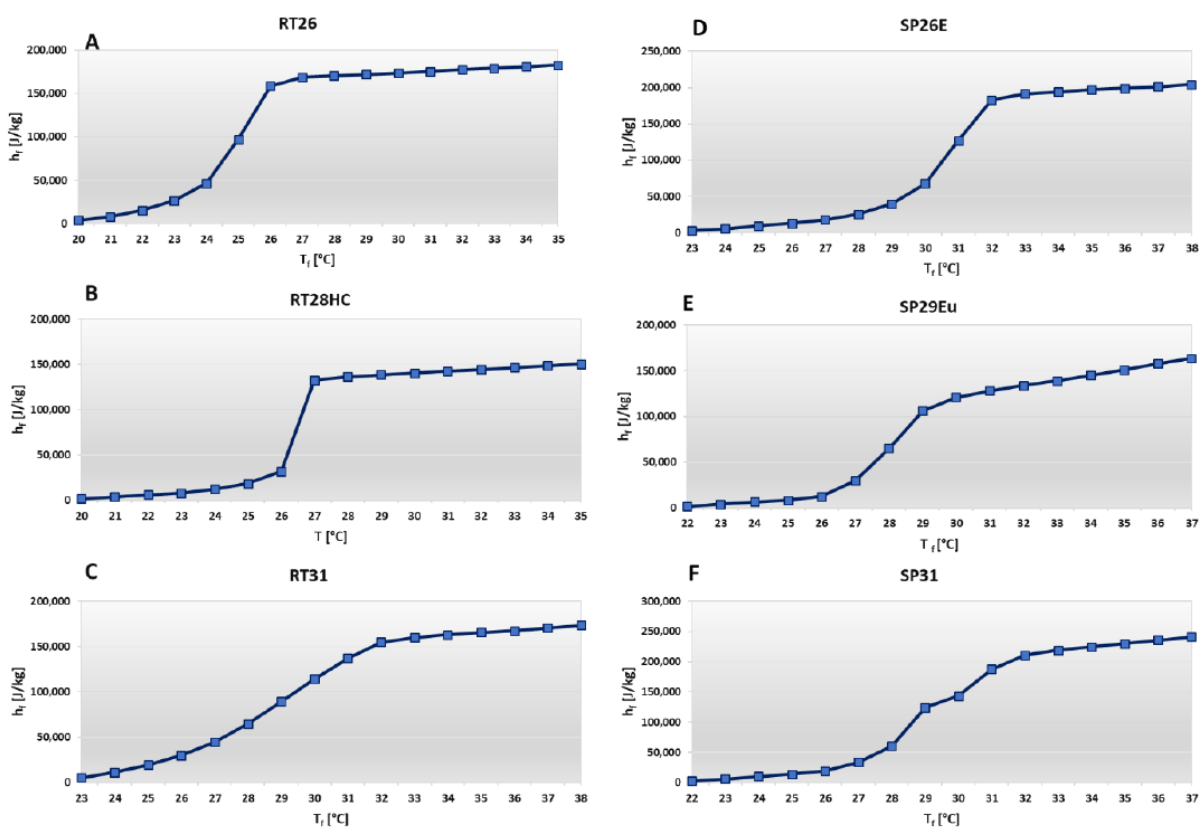


Figura 5. Funzione entalpia-temperatura di: (A) RT26<sup>®</sup>; (B) RT28HC<sup>®</sup>; (C) RT31<sup>®</sup>; (D) SP26E<sup>®</sup>; (E) SP29Eu<sup>®</sup>; (F) SP31<sup>®</sup>

Nella configurazione con lo strato di MOC contenente PCM microincapsulato, la curva di fusione è stata ottenuta mediante l'app Microtek [111] e, quindi, ipotizzando l'integrazione di Micronal PCM con una temperatura di fusione di 23 °C. Il MOC ha matrice cementizia con aggregati quali trucioli di legno riciclati da CDW e rinforzati da fibre di legno e polimeri termoplastici. Sulla base di queste informazioni, la composizione percentuale riportata in [115] è stata considerata idonea per il caso in esame, con il 60% in peso di composti cementizi e il 40% in peso di aggregati. Infine, è stata calcolata una percentuale di integrazione di

PCM del 9% effettuando una media ponderata delle percentuali di integrazione di PCM microincapsulato raccomandate dallo strumento Microtek per materiali cementizi e pannelli di fibra a media densità derivati dal legno. Le proprietà calcolate sono riportate nella Tabella 13 e la curva entalpia-temperatura cumulativa è riportata nella Figura 6.

	s (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	$c_p$ (kJ/kg)	LHS (kJ/m <sup>2</sup> )	Q <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> K)
MOC+ Micronal®	10	1089	0.65	1182	9.3	12.9

Tabella 13. Funzione entalpia-temperatura del MOC con Micronal PCM

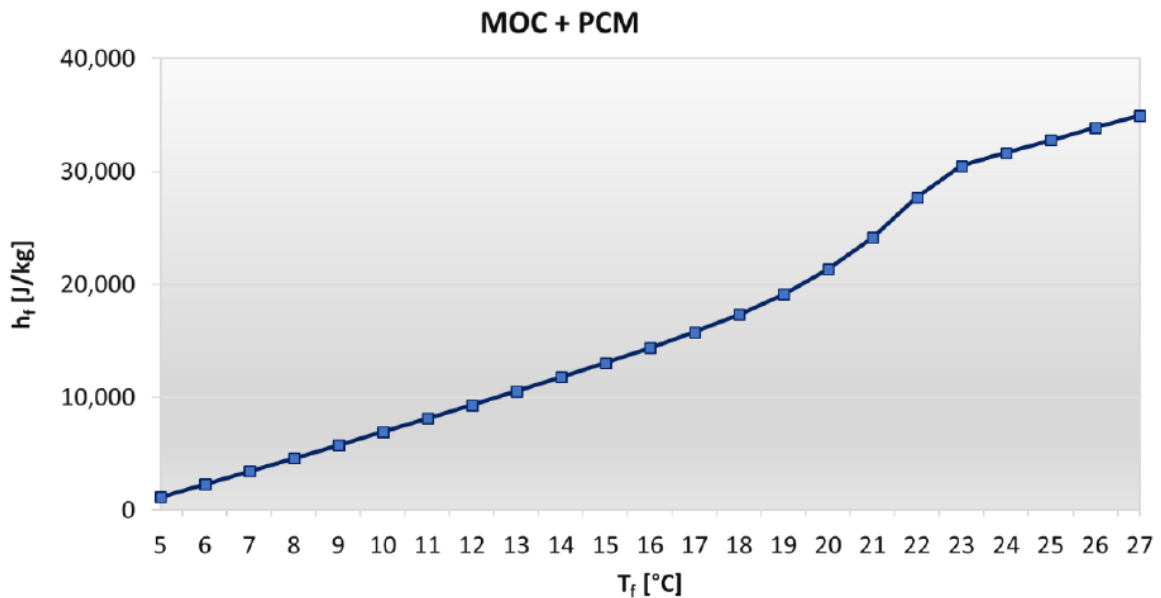


Figura 6. Funzione entalpia-temperatura del MOC con PCM integrato

### 3.1.4. Modello numerico

EnergyPlus tramite l'interfaccia DesignBuilder è lo strumento utilizzato per le simulazioni. Un algoritmo di differenza finita di conduzione monodimensionale (CondFD) può essere utilizzato per la simulazione di PCM [116]. L'algoritmo CondFD si basa sullo schema di differenza finita implicito ed è possibile scegliere tra Crank–Nicholson o completamente implicito. L'equazione su cui si basa il metodo di calcolo per lo schema completamente implicito all'interno di un materiale omogeneo è

$$c_p \rho \Delta X \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \lambda_w \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta X} + \lambda_\varepsilon \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta X} \quad (3.1)$$

dove:

- T è la temperatura;
- i è il nodo modellato; i+1 è il nodo adiacente all'interno della costruzione; i-1 è il nodo adiacente all'esterno della costruzione;
- j+1 è il nuovo passo temporale; j è il passo temporale precedente;
- $\Delta t$  è il passo temporale;
- $\Delta X$  è lo spessore dello strato a differenza finita;

- $c_p$  è il calore specifico del materiale;
- $\rho$  è la densità del materiale;
- $\lambda_w$  e  $\lambda_\varepsilon$  sono la conduttività termica per l'interfaccia tra il nodo  $i$  e il nodo  $i+1$  e tra il nodo  $i$  e il nodo  $i-1$ .

Se la conduttività termica è variabile, può essere definita nel seguente modo:

$$\lambda_w = \frac{\lambda_{i+1}^{j+1} - \lambda_i^{j+1}}{2} \quad (3.2)$$

$$\lambda_\varepsilon = \frac{\lambda_{i-1}^{j+1} - \lambda_i^{j+1}}{2} \quad (3.3)$$

Nell'algoritmo CondFD, tutti gli elementi vengono divisi o discretizzati automaticamente utilizzando l'equazione (3.4), che dipende da una costante di discretizzazione spaziale ( $c$ ), dalla diffusività termica del materiale ( $\alpha$ ) e dal passo temporale. È possibile selezionare il valore di discretizzazione spaziale predefinito di 3 (equivalente a un numero di Fourier (Fo) di 1/3) o è possibile selezionare altri valori di input.

$$\Delta_x = \sqrt{c \cdot \alpha \cdot \Delta t} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \Delta t}{Fo}} \quad (3.4)$$

Il metodo CondFD è abbinato a una funzione entalpia-temperatura che deve essere definita per aggiornare un calore specifico equivalente a ogni passo temporale. EnergyPlus offre due metodi di modellazione, per associare la curva entalpia-temperatura:

- base: dove la stessa curva temperatura/entalpia viene utilizzata sia per la fusione che per il congelamento;
- isteresi: dove i processi di fusione e congelamento seguono curve temperatura/entalpia diverse.

Per la simulazione del caso di studio, viene utilizzato il metodo base. La funzione entalpia-temperatura è stata definita tramite un set mediante una forma tabellare a partire dalle figure proposte in precedenza. La funzione tabellare solitamente considera l'intero intervallo di temperatura, da  $-20$  °C a  $60$  °C. Il limite per considerare materiale commerciale è l'indisponibilità di dati per definire il fenomeno di isteresi. Il modello adottato richiede anche un "coefficiente di temperatura per la conduttività termica". Questo viene utilizzato per introdurre il coefficiente dipendente dalla temperatura per la conduttività termica del materiale. Più in dettaglio, questa è la variazione di conduttività termica per unità di escursione di temperatura da  $20$  °C. Inoltre, vengono utilizzati intervalli di tempo all'ora pari a 12 e la costante di discretizzazione spaziale è impostata a 3. Sono state eseguite più di 1000 simulazioni. Tra le capacità del programma, vi è l'uso di un algoritmo genetico di ordinamento non dominato basato sul metodo NSGA-II [117], ampiamente utilizzato come metodo "multi-obiettivo veloce ed elitario" che fornisce un compromesso adeguato tra un set di soluzioni ben convergente e uno ben distribuito. Questo strumento è stato utilizzato per risolvere il problema di ottimizzazione. Per il nostro scopo, il numero massimo di generazioni è stato impostato su 200 ed era tipicamente compreso tra 50 e 500. Questo valore riflette la complessità dell'analisi. Il dominio computazionale è l'intero anno; quindi, le simulazioni vengono eseguite per tutti i mesi e sono disponibili risultati giornalieri o mensili; inoltre, l'intervallo di tempo tra due bilanci energetici consecutivi è stato fissato pari a 6 all'ora.

### 3.1.5. Analisi dei risultati della simulazione

#### 3.1.5.1. Analisi parametrica con PCM sul lato interno.

##### ANALISI DEI FABBISOGNI ENERGETICI DI RISCALDAMENTO E RAFFREDDAMENTO

La Figura 7 mostra i risultati in termini di fabbisogni energetici di riscaldamento e raffreddamento per le configurazioni con l'applicazione di PCM selezionati sul lato interno. Il punto giallo è rappresentativo della configurazione attuale di MATRIX con pannelli isolanti sottovuoto ed è stato denominato caso base (BC). L'altro punto per il confronto è denominato PI<sub>464</sub>A<sub>2v</sub>PU<sub>10</sub>; è rappresentato da un quadrato blu ed è la configurazione descritta nella Tabella 3.2 con lo spessore predefinito e senza PCM.

Considerando il BC, tutte le soluzioni proposte, anche se applicate solo su una parete, consentono una riduzione della domanda energetica sia di riscaldamento che di raffreddamento senza differenze significative quando la ventilazione a intercapedine d'aria viene confrontata con la stessa soluzione ma con intercapedine chiusa. Infatti, nella figura si può notare che ci sono sempre due punti abbastanza coincidenti per ciascuna soluzione. L'ultimo ramo del grafico in cui si trova PI<sub>464</sub>A<sub>2v</sub>PU<sub>10</sub> raccoglie tutti i risultati di simulazione delle configurazioni senza PCM. È evidenziata la soluzione che minimizza la richiesta di riscaldamento: è PI<sub>707</sub>A<sub>2nv</sub>PU<sub>10</sub> per cui  $E_C$  è 15.0 kWh/m<sup>2</sup>y ed  $E_H$  è 21.4 kWh/m<sup>2</sup>y. Questo pacchetto parete, rispetto alla soluzione di progettazione base (PI<sub>464</sub>A<sub>2v</sub>PU<sub>10</sub>), consente un leggero miglioramento delle prestazioni perché il risparmio energetico di raffreddamento ( $\Delta E_C$ ) è -0.43% e il risparmio di riscaldamento ( $\Delta E_H$ ) è -1.63%. Le soluzioni peggiori, i punti più alti della curva, sono PI<sub>0140</sub>A<sub>6nv</sub>PU<sub>6</sub> e PI<sub>0140</sub>A<sub>6v</sub>PU<sub>6</sub>, per i quali  $E_C$  è rispettivamente 16.5 e 16.6 kWh/m<sup>2</sup>y e  $E_H$  è rispettivamente 23.5 e 23.6 kWh/m<sup>2</sup>y.

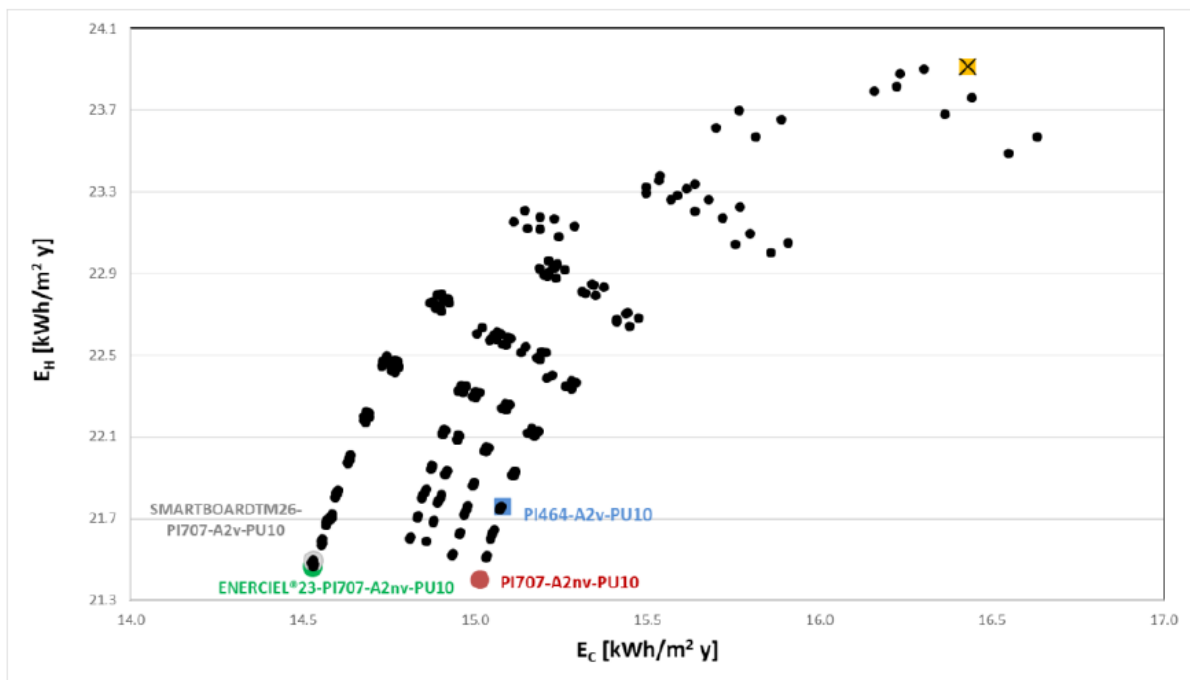


Figura 7. PCM sul lato interno: confronto basato sul carico di riscaldamento (EH) e di raffreddamento (EC)

Partendo invece da sinistra, si ha una prima sequenza di punti a partire dalla soluzione ENERCIEL<sup>®</sup>23-PI<sub>707</sub>A<sub>2nv</sub>PU<sub>10</sub>, caratterizzata dal minimo della richiesta di raffreddamento (14.5 kWh/m<sup>2</sup>y) e da un carico di riscaldamento di 21.5 kWh/m<sup>2</sup>y. Questo pacchetto di pareti, rispetto al BC, consente  $\Delta E_C$  di -11.6% e  $\Delta E_H$  di -10.2% e può essere considerato una soluzione redditizia per migliorare le prestazioni ottenibili con un sistema isolato con bassa massa termica. Considerando il contributo del materiale a cambiamento di fase, la valutazione della riduzione dei carichi di riscaldamento e raffreddamento rispetto al PI<sub>464</sub>A<sub>2v</sub>PU<sub>10</sub> indica che la temperatura di fusione selezionata contribuisce a migliorare leggermente le prestazioni termiche con  $\Delta E_C$  pari a -3.6%. Tuttavia, durante l'inverno, il pannello consente di aumentare l'utilizzo dei guadagni solari perché accumula l'energia e la rilascia durante il giorno, consentendo  $\Delta E_H$  di -1.4%. Gli altri punti sono rappresentativi della stessa soluzione ma con un livello di isolamento inferiore fino al punto estremo ENERCIEL<sup>®</sup>23-PI<sub>10140</sub>A<sub>6v</sub>PU<sub>6</sub>, per il quale  $E_C$  è 15.9 kWh/m<sup>2</sup>y ed  $E_H$  è 23.7 kWh/m<sup>2</sup>y. Questa soluzione non è migliore di PI<sub>464</sub>A<sub>2v</sub>PU<sub>10</sub> perché in entrambe le stagioni l'energia richiesta aumenta; nel frattempo, rispetto a BC,  $\Delta E_C$  è -3.3% e  $\Delta E_H$  è -1.1%. Pertanto, si può concludere che il livello di isolamento inferiore non è adatto al clima considerato e il PCM non è efficace quando incluso in questa configurazione. Sulla stessa linea, ci sono anche le soluzioni con SmartBoard<sup>™</sup>. In questo caso, il pacchetto che minimizza la richiesta di energia di raffreddamento è SMARTBOARD<sup>™</sup>26-PI<sub>707</sub>A<sub>2v</sub>PU<sub>10</sub>;  $E_C$  è 14.5 kWh/m<sup>2</sup>y ed  $E_H$  è 21.5 kWh/m<sup>2</sup>y. Con una temperatura di fusione più elevata, è possibile ottenere lo stesso risparmio energetico rispetto a BC ( $\Delta E_C$  -11.6%,  $\Delta E_H$  -10.1%) per ENERCIEL<sup>®</sup>23 PI<sub>707</sub>A<sub>2nv</sub>PU<sub>10</sub>. Ciò accade perché il prodotto ENERCIEL<sup>®</sup> ha l' $h_f$  più elevato di tutti i prodotti esaminati (73.56 kJ/kg), grazie alla percentuale più elevata di PCM; nel frattempo, SmartBoard<sup>™</sup> ha il punto di fusione più elevato, 26 °C, che è particolarmente adatto per combattere il surriscaldamento interno durante i mesi estivi. Gli altri prodotti forniscono meno benefici e i risultati della simulazione occupano gli altri rami del grafico. Ad esempio, con lo stesso livello di isolamento, la soluzione WEBER.MUR CLIMA<sup>®</sup>23-PI<sub>707</sub>A<sub>2nv</sub>PU<sub>10</sub> è caratterizzata da  $E_C$  di 15.0 kWh/m<sup>2</sup>y e  $E_H$  di 21.5 kWh/m<sup>2</sup>y.

#### *ANALISI DEL FABBISOGNO ENERGETICO PRIMARIO E DELLE ORE DI DISAGIO*

La Figura 8 mostra la distribuzione dei risultati della simulazione considerando la richiesta annuale di energia primaria ( $EP_{\text{yearly}}$ ) e il numero di ore di disagio (dH).

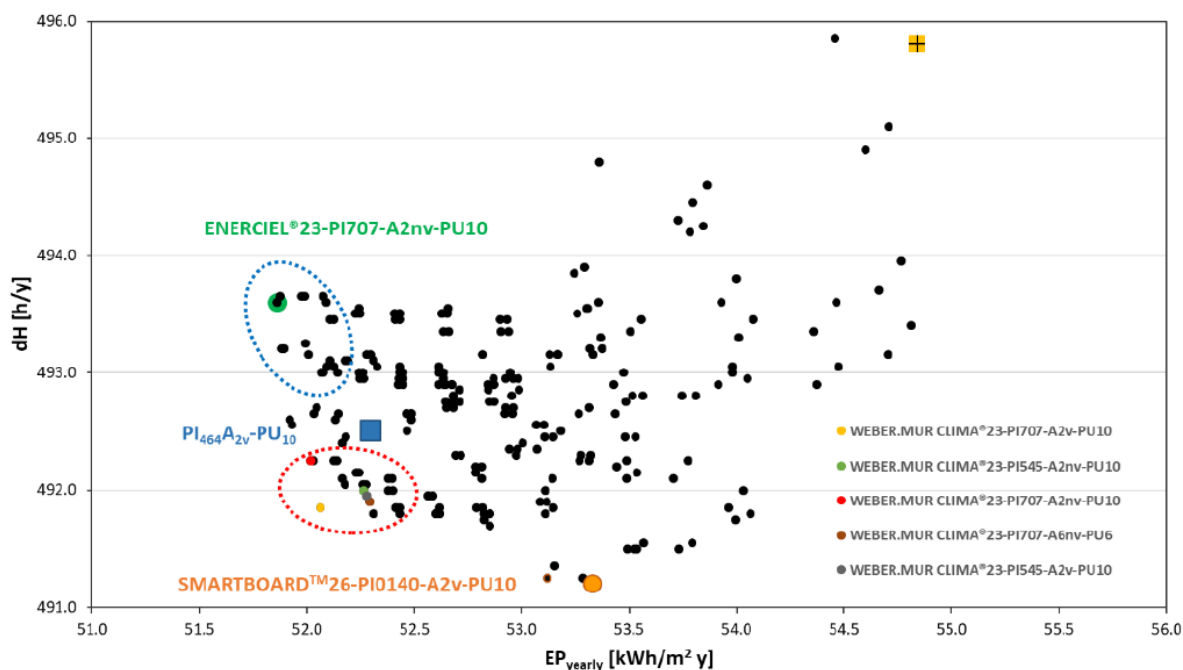


Figura 8. PCM sul lato interno: confronto basato sul fabbisogno energetico primario e sulle ore di disagio

Inoltre in questo caso non c'è un'influenza apprezzabile del regime di ventilazione dell'intercapedine d'aria. Per la configurazione di progettazione di base (PI<sub>464</sub>A<sub>2v</sub>PU<sub>10</sub>), EP<sub>yearly</sub> è 52.3 kWh/(m<sup>2</sup>y) e dH è uguale a 492.5 h/y, ed è una buona soluzione se confrontata con BC poiché ΔEP è -4.6% e la percentuale di riduzione delle ore di disagio è -0.7%.

La configurazione che minimizza il numero di ore di disagio è SMARTBOARD™<sub>26</sub>-PI<sub>0140</sub>A<sub>2v</sub>PU<sub>10</sub> (dH = 491.2 h/y), ma un risultato molto vicino si ottiene con WEBER. MUR CLIMA®-PI<sub>1121</sub>A<sub>2nv</sub>PU<sub>10</sub> (dH = 491.3 h/a). Allo stesso tempo, queste configurazioni non coincidono con quella con il più basso fabbisogno di energia primaria; in entrambi i casi il minor livello di isolamento, sul lato interno, incide negativamente sul fabbisogno di energia termica. Rispetto alla progettazione base, ΔEP è, rispettivamente, +2.0% e +1.6%; invece, rispetto a BC, il risparmio energetico ottenibile è, rispettivamente, -2.8% e -3.2%.

Nella Figura 3.7, i punti all'interno del cerchio rosso sono caratterizzati dall'adozione dell'intonaco Weber.mur clima® o del pannello Comfortboard® sul lato interno. Tra questi punti, la soluzione WEBER.MUR CLIMA®-PI<sub>707</sub>A<sub>2nv</sub>PU<sub>10</sub> ha il più basso fabbisogno di energia primaria totale (EP<sub>yearly</sub> = 1524.3 kWh/m<sup>2</sup>y), con ΔEP pari a -5.4% rispetto a BC. Al centro della figura (punti neri) sono distribuite le soluzioni senza PCM; qui è evidenziata la soluzione PI<sub>464</sub>A<sub>2v</sub>PU<sub>10</sub>. In questa zona, i punti più esterni sono relativi alle configurazioni con spessore massimo del poliuretano esterno e interno (quindi con un fabbisogno energetico inferiore per il riscaldamento). Infine, nella zona blu sono raccolte le soluzioni con Dry Clay Plaster, il pannello SmartBoard™ e la finitura ENERCIEL® con il massimo livello di isolamento termico. Il caso con valore minimo di fabbisogno energetico primario totale è ENERCIEL®<sub>23</sub>-PI<sub>707</sub>A<sub>2nv</sub>PU<sub>10</sub>, con ΔEP pari a -5.4% rispetto a BC, ma solo -0.8% rispetto a PI<sub>464</sub>A<sub>2v</sub>PU<sub>10</sub>. Questa soluzione beneficia dell'elevato livello di isolamento, mentre il PCM consente di ridurre la richiesta di raffrescamento rispetto a BC; tuttavia, considerando la differenza ridotta

con PI<sub>464</sub>A<sub>2v</sub>PU<sub>10</sub>, si può affermare che per il clima considerato e la temperatura di fusione selezionata, il PCM non è altamente efficace nel ridurre l'intera domanda di energia. In termini di  $EP_{\text{yearly}}$ , i casi peggiori con PCM sono caratterizzati da uno spessore di isolamento inferiore sui lati interno ed esterno, e questi sono COMFORTBOARD<sup>®</sup>23- PI<sub>0140</sub>A<sub>6v</sub>PU<sub>6</sub>, WEBER.MUR CLIMA<sup>®</sup>23-PI<sub>0140</sub>A<sub>6v</sub>PU<sub>6</sub> e DRY CLAY PLASTER PCM<sup>®</sup>23- PI<sub>0140</sub>A<sub>6v</sub>PU<sub>6</sub>; questi hanno lo stesso fabbisogno energetico di BC (circa 54.8 kWh/m<sup>2</sup>y) ma ore di disagio inferiori grazie all'effetto del PCM nel periodo più caldo. Invece, considerando la soluzione di progettazione di base,  $\Delta EP$  è +4.6%.

### 3.1.5.2. Analisi parametrica con PCM sul lato esterno

#### ANALISI DEI FABBISOGNI ENERGETICI DI RISCALDAMENTO E RAFFREDDAMENTO

Per quanto riguarda l'applicazione dei CSM sul lato esterno, la Figura 9 mostra la distribuzione dei risultati in termini di fabbisogno energetico per riscaldamento e raffreddamento. Qui, con marcatori diversi, vengono rappresentate le soluzioni senza PCM, così come i pannelli con diversi spessori di materiale a cambiamento di fase; va notato che tra questi, vengono considerati sei diversi materiali macroincapsulati (sei diversi punti di fusione). Per le simulazioni, i PCM sono posizionati nell'intercapedine d'aria esterna per favorire il processo di scarico durante la notte. Tuttavia, si osservano differenze trascurabili considerando il tipo di ventilazione dell'intercapedine d'aria. I punti con  $E_H$  inferiore sono caratterizzati dal valore massimo (14 cm) dell'isolamento termico sul lato interno.

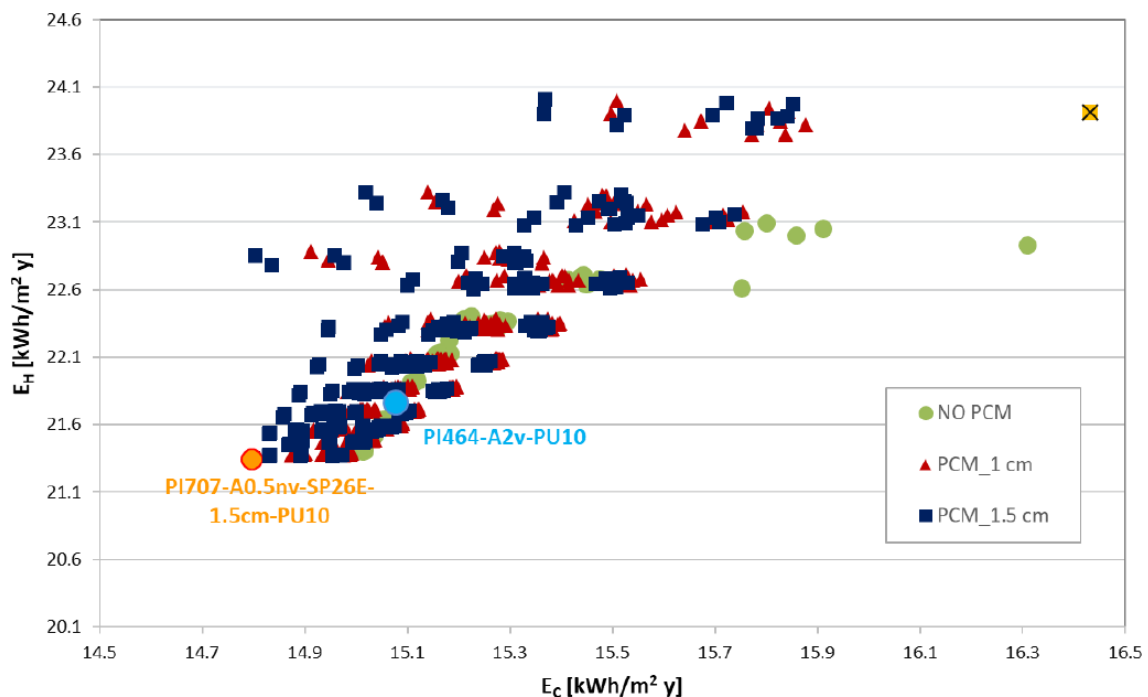


Figura 9. PCM sul lato esterno: confronto basato sul carico di riscaldamento e raffreddamento

Come previsto, i casi con spessore PCM di 1.5 cm offrono le maggiori riduzioni dei fabbisogni di raffreddamento. Per qualsiasi configurazione, il miglior materiale a cambiamento di fase da posizionare sul

lato esterno è quello indicato da SP e una temperatura di fusione di 26 °C con uno spessore di 1.5 cm. Probabilmente, per il clima considerato, temperature di fusione più elevate, seppur utili per fronteggiare condizioni meteorologiche estreme, non sono in grado di garantire un ciclo di carica e scarica continuativo del materiale e la transizione viene attivata meno volte. Aggiungendo alle caratteristiche sopra menzionate il massimo livello di isolamento termico fornito all'interno e all'esterno, si raggiunge il caso migliore sia in termini di  $E_C$  che di  $E_H$ . Nella Figura 3.8 questo è indicato con  $PI_{707}A_{0.5nv}SP26E-1.5cm-PU_{10}$ , con  $E_C = 14.8$  kWh/(m<sup>2</sup>y) ed  $E_H = 21.3$  kWh/(m<sup>2</sup>y). Rispetto al caso base,  $\Delta E_C$  è -9.95% mentre  $\Delta E_H$  è -10.8%. Inoltre, diversamente da quanto previsto, la configurazione migliore è caratterizzata da una cavità d'aria non ventilata con spessore minimo; ciò accade probabilmente perché l'elevato valore di isolamento sul lato esterno ha indotto un ritardo nella transizione di fase e la ventilazione della cavità d'aria non fornisce variazioni significative rispetto al caso non ventilato. Tuttavia, si può osservare che per il pacchetto di parete proposto, quando due PCM hanno la stessa temperatura di fusione e capacità termica latente anche con una diversa capacità termica, le prestazioni sono comparabili. Infatti, nel caso di studio proposto,  $PI_{707}A_{0.5nv}RT26E-1.5cm-PU_{10}$ ,  $E_C = 14.9$  kWh/(m<sup>2</sup>y) ed  $E_H = 21.4$  kWh/(m<sup>2</sup>y), e, quindi, rispetto al caso base,  $\Delta E_C$  è -9.4% mentre  $\Delta E_H$  è -10.6%. Considerando la stessa configurazione, con lo stesso PCM, l'incremento della temperatura di fusione non garantisce un maggiore risparmio energetico. Ad esempio, nei casi di  $PI_{707}A_{0.5nv}SP26E-1cm-PU_6$  e  $PI_{707}A_{0.5nv}SP31-1cm-PU_6$ , con riferimento al caso base,  $\Delta E_C$  è, rispettivamente, -8.68% e -8.28%; con  $PI_{707}A_{0.5nv}RT26E-1cm-PU_6$  e  $PI_{707}A_{0.5nv}RT31-1cm-PU_6$ ,  $\Delta E_C$  è, rispettivamente, -8.49% e -8.18%. Differenze comparabili si ottengono in tutti gli altri casi. Si può anche osservare che i prodotti con temperatura di fusione più elevata sono anche caratterizzati da una maggiore capacità termica latente; tuttavia, questa caratteristica sembra non migliorare le prestazioni energetiche per il pacchetto di parete proposto. Probabilmente, la scelta di una temperatura di attivazione di 26 °C è più vantaggiosa data la forzatura esterna della posizione considerata. Il livello di isolamento più elevato non consente la completa fusione del materiale oppure la scelta dello spessore dell'intercapedine d'aria non è sufficiente a garantire una regolare evacuazione del calore accumulato.

#### *ANALISI DEL FABBISOGNO ENERGETICO PRIMARIO E DELLE ORE DI DISAGIO*

Per l'applicazione dei CSM sul lato esterno, la Figura 10 mostra il confronto tra  $EP_{yearly}$  e dH.

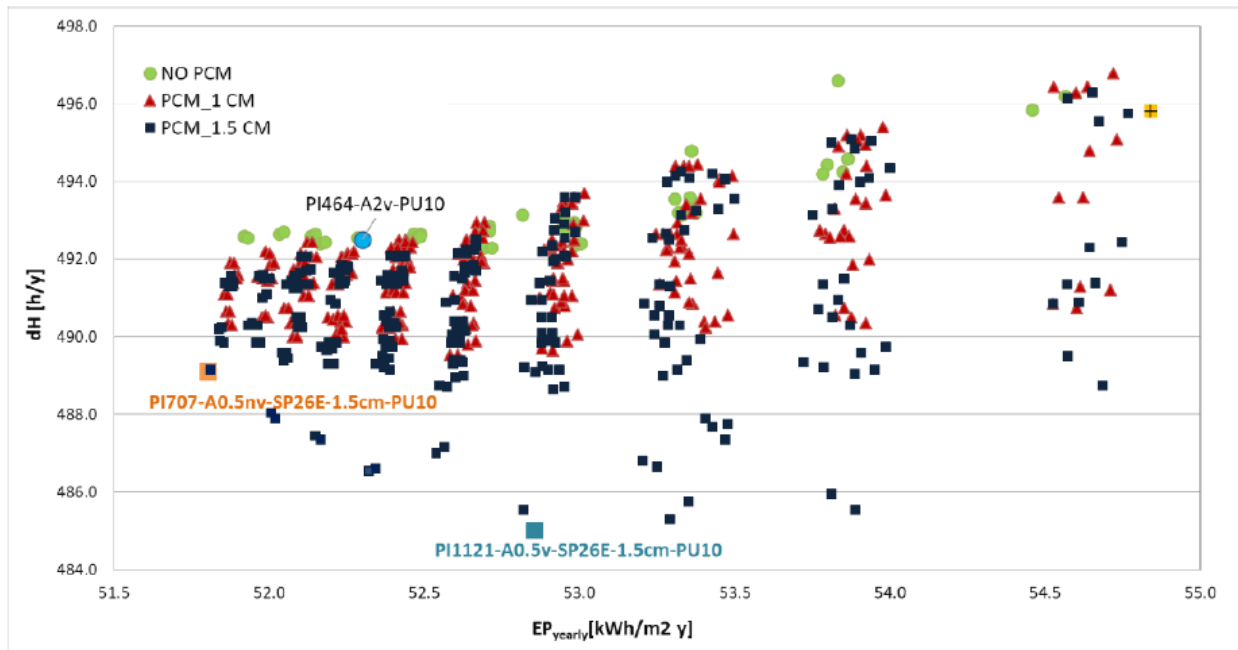


Figura 10. PCM sul lato esterno: confronto in base al fabbisogno energetico primario e alle ore di disagio

Le soluzioni sono organizzate in diverse distribuzioni verticali; ciascuna è caratterizzata dallo stesso livello di isolamento, ma le configurazioni con lo spessore maggiore di PCM si trovano solitamente in fondo a queste linee. Ad esempio, la prima distribuzione a destra, dove è evidenziato anche il caso base, è composta da tutte le soluzioni con il livello di isolamento inferiore sul lato interno ed esterno. Qui, c'è  $PI_{0140-A_{5nv}-RT26-1cm-PU_6}$  caratterizzato dal minor fabbisogno energetico ( $EP_{yearly} = 54.5 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ ) e  $dH = 490.8 \text{ h/y}$  e  $PI_{0140-A_{4.5nv}-SP26E-1.5cm-PU_6}$  con il minor numero di ore di disagio ( $dH = 489.5 \text{ h/y}$ ) e  $EP_{yearly} = 54.6 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ . In entrambi i casi, quando la temperatura di fusione aumenta, le ore di disagio aumentano e  $dH$  diventa, rispettivamente,  $496.5 \text{ h/y}$  e  $495.8 \text{ h/y}$ . Ciò conferma che il punto di fusione più adatto per la configurazione in valutazione è  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nella prima riga a sinistra, ci sono le soluzioni con gli alti livelli di isolamento (sia sul lato interno che esterno) e il minor fabbisogno energetico. Al package considerato vengono accoppiati diversi PCM: nel caso di  $1 \text{ cm}$  c'è un air gap di  $1 \text{ cm}$ , e le soluzioni migliori sono RT26, RT28HC e SP29Eu; con  $1.5 \text{ cm}$  e un air gap di  $0.5 \text{ cm}$ , le soluzioni migliori sono RT26, SP26E e SP29Eu. Tra queste, il minimo di  $EP_{yearly}$  si ottiene con la configurazione  $PI_{707}A_{0.5nv}SP26E-1.5cm-PU_{10}$ , con una diminuzione di  $\Delta EP$  pari a  $-5.54\%$  rispetto al caso base. Invece, se si considera  $PI_{464-A_{2v}}-PU_{10}$  come riferimento,  $\Delta EP$  è  $-0.95\%$ . Per la stessa configurazione ma adottando RT26,  $\Delta EP$  è  $-5.44\%$  e con SP31 è  $-5.42\%$ ; più in generale, c'è una differenza molto leggera con gli altri materiali a cambiamento di fase considerati e questo conferma che l'incremento della temperatura di fusione non garantisce prestazioni migliori.

Nella parte inferiore della figura, ci sono le configurazioni con il minor numero di ore di disagio. In questa regione è possibile identificare la configurazione con il minor numero di ore di disagio, ovvero quella identificata come  $PI_{1121}A_{0.5v}SP26E-1.5cmPU_{10}$  è caratterizzata da  $\Delta dH\%$  pari a  $-2.18\%$  e  $\Delta EP\%$  di  $-3.62\%$  rispetto al caso base. Ha una capacità termica pari a  $102.2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ , ovvero aumentata del  $78.6\%$  rispetto allo

stesso caso senza PCM e del 53% rispetto a PI<sub>464</sub>-A<sub>2v</sub>-PU<sub>10</sub>. Rispetto a questa configurazione di progettazione base,  $\Delta EP$  è +1.06% a causa del basso livello di isolamento termico sul lato interno della parete.

### 3.1.5.3. Applicazione di materiali PCM su entrambi i lati

#### ANALISI DELLE SIGENZE ENERGETICHE DI RISCALDAMENTO E RAFFREDDAMENTO

Le migliori configurazioni descritte nella sezione precedente sono state combinate per un'ulteriore analisi. La Tabella 14 riassume le caratteristiche di queste configurazioni e la Figura 11 mostra i risultati della simulazione, considerando sia la configurazione BC che quella di progettazione di base.

PCM sul lato interno	Pu-intercapedine di aria-PU	Intercapedine di aria-CSM-PU
Weber.mur clima <sup>®</sup>	7-0-7 cm	
ENERCIEL <sup>®</sup>	1-12-1 cm	A <sub>5v</sub> RT31-1cm-PU <sub>6</sub>
SmartBoard <sup>™</sup>	5-4-5 cm	A <sub>0.5nv</sub> SP26E-1.5cm-PU <sub>10</sub>
MOC with Micronal PCM	5-4-5 cm 4-6-4 cm	A <sub>0.5nv</sub> SP26E-1.5cm-PU <sub>10</sub>

Tabella 14. Soluzioni per l'analisi parametrica con PCM su entrambi i lati

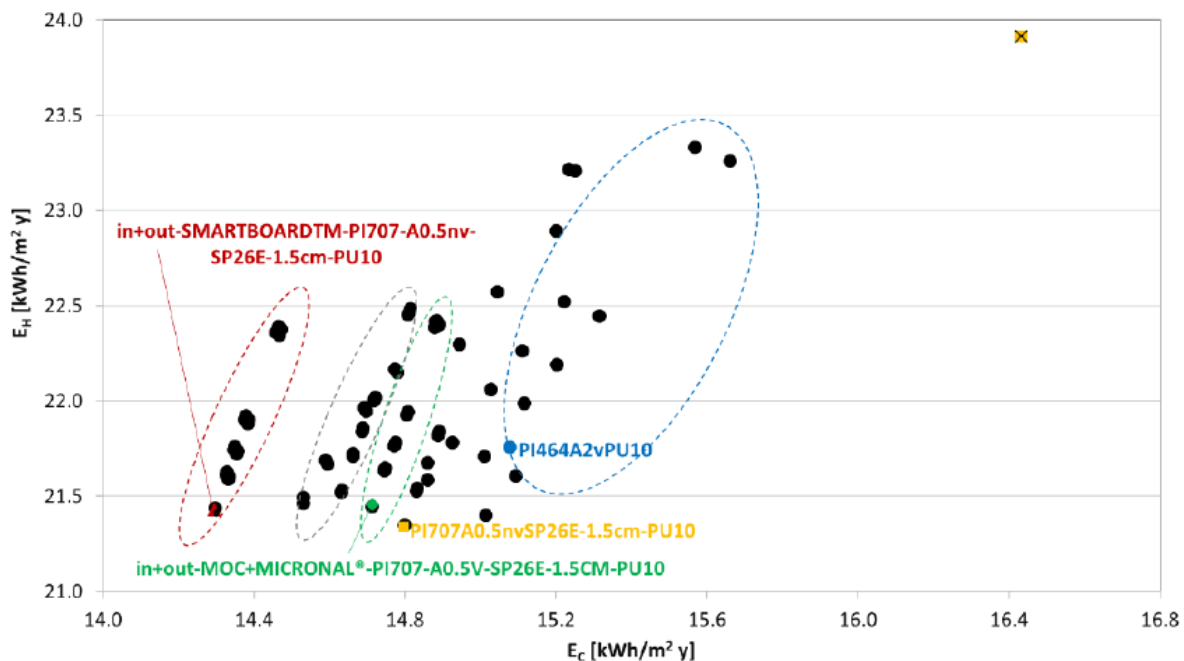


Figura 11. PCM su entrambi i lati: confronto basato sul carico di riscaldamento e raffreddamento

Poiché sono stati valutati meno casi, vi è una distinzione più netta tra i risultati ottenuti per le configurazioni esaminate. Partendo da sinistra, il primo ramo (area rossa) include configurazioni con SmartBoard<sup>™</sup> o ENERCIEL<sup>®</sup> combinate con 1.5 cm SP26E e 10 cm di poliuretano esterno. In quest'area, vi è la configurazione che minimizza l' $E_C$ , ovvero quella identificata come in + out-SMARTBOARD<sup>™</sup>-PI<sub>707</sub>-A<sub>0.5nv</sub>-SP26E- 1.5 cm-PU<sub>10</sub>. Rispetto al caso base,  $\Delta E_C$  è -13% ed è -5.2% rispetto a PI<sub>464</sub>-A<sub>2v</sub>- PU<sub>10</sub>. La sua capacità termica è pari

a  $124.26 \text{ kJ/m}^2$  e il fabbisogno energetico per il riscaldamento è ridotto di  $-10.4\%$  rispetto al caso base. Si osservano differenze trascurabili tra questa soluzione e quelle identificate come in + out-ENERCIEL<sup>®</sup>-PI<sub>707</sub>A<sub>0.5v</sub>SP26E-1.5cm-PU<sub>10</sub> e in+ out ENERCIEL<sup>®</sup>-PI<sub>707</sub>A<sub>0.5nv</sub>SP26E-1.5cm-PU<sub>10</sub> che sono incluse nello stesso ramo. La soluzione che minimizza l'E<sub>H</sub> è PI<sub>707</sub>A<sub>0.5nv</sub>SP26E-1.5cm-PU<sub>10</sub> ( $-10.8\%$  rispetto al caso base), ma in questo caso il fabbisogno energetico di raffreddamento è più alto, del  $+3.4\%$  rispetto a in + out-SMARTBOARD<sup>™</sup>-PI<sub>707</sub>-A<sub>0.5nv</sub>-SP26E-1.5cm-PU<sub>10</sub>; nel frattempo, il fabbisogno di riscaldamento è inferiore solo dello  $0.4\%$ . Nel secondo ramo (area grigia), i punti con il fabbisogno energetico più basso per il riscaldamento sono caratterizzati da SmartBoard<sup>™</sup> o ENERCIEL<sup>®</sup> e dallo spessore massimo del poliuretano esterno. Nella parte superiore, ci sono le configurazioni con Weber.mur clima<sup>®</sup> abbinato a 1.5 cm SP26E e 10 cm poliuretano esterno. Nel terzo ramo (area verde), c'è la soluzione migliore con MOC + Micronal PCM, indicata con in + out + MOC + MICRONAL-PI<sub>707</sub>A<sub>5v</sub>SP26E-1.5cm-PU<sub>10</sub>. Rispetto al caso base,  $\Delta E_C = -10.5\%$  e  $\Delta E_H = -10.3\%$ .

Infine, nel quinto ramo (area blu), ci sono la configurazione di progettazione di base e le configurazioni con 1 cm di RT31 combinato con 6 cm di poliuretano esterno sul lato esterno e MOC + MICRONAL o Weber.mur clima<sup>®</sup> sul lato interno.

Più in generale, si può osservare che il MOC con PCM microincapsulato ha prestazioni peggiori nella stagione di raffreddamento rispetto agli altri componenti valutati per l'applicazione interna di materiali a cambiamento di fase. Ciò è dovuto principalmente al basso calore latente di fusione ( $9.2 \text{ kJ/kg}$ ). Tuttavia, le altre caratteristiche e la temperatura di fusione rendono le prestazioni del MOC con PCM paragonabili all'intonaco con Weber.mur clima<sup>®</sup>. Ad esempio, considerando le combinazioni in + out + MOC + MICRONAL-PI<sub>545</sub>-A<sub>5v</sub>-RT31-1cm-PU<sub>6</sub> e in + out + WEBER.MUR CLIMA<sup>®</sup>-PI<sub>545</sub>-A<sub>5v</sub>-RT31-1cm-PU<sub>6</sub>, la richiesta di riscaldamento è, rispettivamente,  $15.1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ anno})$  e  $15.0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ anno})$ , e l'E<sub>C</sub> è  $22.0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ anno})$  e  $22.1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ anno})$ . Inoltre, questa analisi conferma anche che la combinazione di SmartBoard<sup>™</sup> e SP26 consente di ridurre al minimo il fabbisogno energetico per il raffreddamento.

#### *ANALISI DEL FABBISOGNO DI ENERGIA PRIMARIA E DELLE ORE DI DISAGIO*

Il confronto in termini di fabbisogno di energia primaria e ore di disagio indoor è riportato nella Figura 12.

Sono stati identificati tre gruppi di punti. Quello giallo include il caso base e le soluzioni con la maggiore richiesta di energia primaria. Tra queste, la soluzione in + out-ENERCIEL<sup>®</sup>-PI<sub>1121</sub>A<sub>5v</sub>-RT31-1cm PU<sub>6</sub> ha il più alto numero di ore di disagio ( $dH \approx 497 \text{ h/y}$ ), mentre la soluzione indicata da in + out-MOC + MICRONALPI<sub>1121</sub>A<sub>5v</sub>RT31-1cm-PU<sub>6</sub> implica il più alto EP<sub>yearly</sub>, pari a  $54 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ anno})$ .

Nella regione centrale si trova il caso di configurazione di progettazione base (area blu). Tutte le altre configurazioni sono caratterizzate dall'adozione di 1 cm di RT31 e 6 cm di isolamento sul lato esterno. Le combinazioni più interessanti, con  $\Delta EP$  del  $5.0\%$ , sono caratterizzate sul lato interno dall'adozione di MOC + MICRONAL o Weber.mur clima<sup>®</sup> con una piccola variazione delle ore di disagio ( $-0.7\%$ ).

La regione più interessante è evidenziata con un cerchio verde. Qui, ci sono soluzioni con SP26E e lo spessore massimo del poliuretano esterno e, nella maggior parte dei casi, con intonaco Weber.mur clima<sup>®</sup> sul lato interno.

Tuttavia, la soluzione in + out-ENERCIEL<sup>®</sup> PI<sub>707</sub>A<sub>0.5nv</sub>SP26E-1.5cm-PU<sub>10</sub> è quella che minimizza il fabbisogno energetico primario totale. Per questa soluzione,  $\Delta EP \approx -5.6\%$  e dH è 488 h/anno. La soluzione con il minor numero di ore di disagio (dH  $\approx 484$  h/anno) è in + out-WEBER.MUR CLIMA<sup>®</sup> PI<sub>1121</sub>A<sub>0.5v</sub>SP26E-1.5cm-PU<sub>10</sub>. In questo caso la trasmittanza termica è pari a 0.188 W/m<sup>2</sup> K e la capacità termica è pari a 112 kJ/m<sup>2</sup>K. Il consumo energetico aumenta e  $\Delta EP$  è +3.4% a causa del basso livello di isolamento termico sul lato interno.

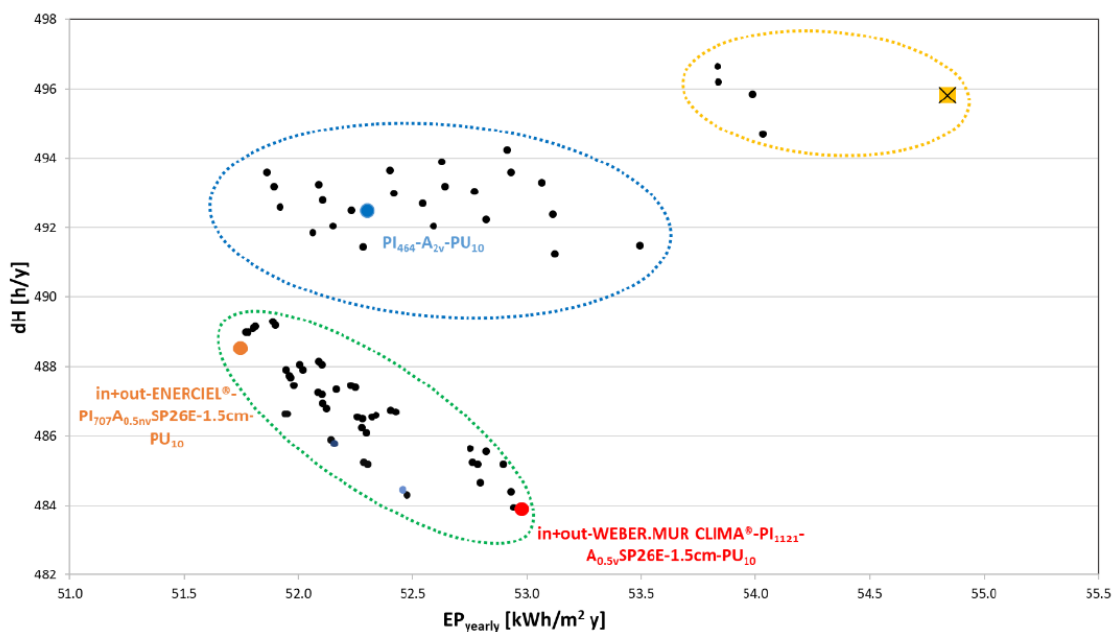


Figura 12. PCM su entrambi i lati: confronto basato sul carico di riscaldamento e raffreddamento

### 3.1.6. Soluzione dell'ottimizzazione multi-obiettivo

Il secondo passaggio dell'approccio proposto consiste nella soluzione di un problema di ottimizzazione multi-obiettivo per minimizzare il fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffreddamento variando l'orientamento della parete su cui è installato il pacchetto parete. Sulla base dei risultati ottenuti nelle sezioni precedenti, le migliori soluzioni da considerare sono in + out- ENERCIEL<sup>®</sup>-PI<sub>707</sub>A<sub>0.5nv</sub>SP26E-1.5cm-PU<sub>10</sub>, PI<sub>707</sub>A<sub>0.5nv</sub>SP26E 1.5cm-PU<sub>10</sub> e in + out-SMARTBOARD<sup>TM</sup>- PI<sub>707</sub>A<sub>0.5nv</sub>SP26E-1.5cm-PU<sub>10</sub>. A queste soluzioni sono stati aggiunti anche il caso base e la configurazione di base. Il vincolo è dH, pari a 491.3 h/anno (valore minimo secondo l'analisi parametrica). I risultati sono mostrati nella Figura 13; qui, i punti rossi rappresentano le soluzioni di Pareto. Nel dettaglio sono state osservate tre soluzioni ottimali, come riportato nella Tabella 15, dove è evidente che vi sono differenze trascurabili sia in termini di richiesta di riscaldamento che di raffrescamento.

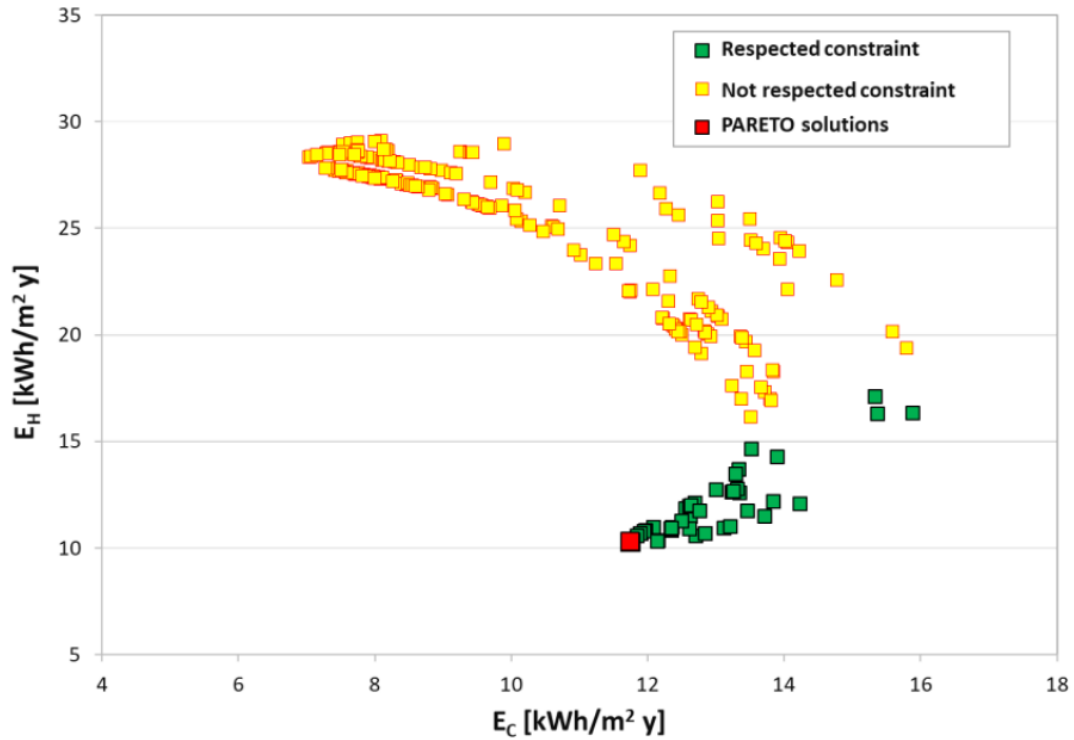


Figura 13. Ottimizzazione dei PCM: confronto basato sul carico di riscaldamento e raffreddamento

Configurazione	Orientamento (°)	Esposizione	$E_c$ (kWh/m <sup>2</sup> y)	$E_H$ (kWh/m <sup>2</sup> y)	dH (h/y)
in + out- ENERCIEL®- PI707A0.5nvSP26E-1.5cm-PU10	336	Nord-est	11.73	10.31	415
PI707A0.5nvSP26E 1.5cm-PU10	273	Nord	11.74	10.30	414
in + out-SMARTBOARD™- PI707A0.5nvSP26E-1.5cm-PU10	332	Nort-est	11.74	10.30	415

Tabella 15. Risultati delle configurazioni ottimali

I tre casi sono caratterizzati dal massimo isolamento termico sul lato esterno e interno della parete, che consente di minimizzare le perdite di calore ma può causare un incremento del surriscaldamento estivo; per questo motivo, è stato ricercato il miglior orientamento. Tutte le configurazioni sull'esposizione a sud sono caratterizzate dalla maggiore richiesta di riscaldamento e dal minore carico di raffreddamento. Ciò accade perché il PCM riduce l'utilizzo dei guadagni solari durante il periodo invernale. Tra quelle simulate, le configurazioni con applicazione interna ed esterna hanno il potenziale maggiore principalmente quando i prodotti ENERCIEL® e SmartBoard™ vengono applicati sul lato interno. Questi consentono di aumentare la capacità termica del pacchetto parete, mitigando le fluttuazioni termiche interne, riducendo il surriscaldamento e garantendo un maggiore comfort microclimatico. All'esterno, il modulo con SP26E e spessore di 1.5 cm consente risultati migliori. Infatti, la natura dei PCM incorporati (composti inorganici con calore latente di fusione più elevato rispetto ai composti organici) e il punto di fusione compatibile con la temperatura esterna media aiutano a contrastare il flusso di calore in entrata nella stagione di raffreddamento. Questo effetto limita i picchi di temperatura interna e garantisce un maggiore comfort microclimatico. L'orientamento a nord-est è

il migliore, probabilmente perché richiede un maggiore isolamento; nel frattempo, nei mesi estivi, i raggi solari colpiscono la parete perpendicolarmente al mattino e al pomeriggio e la parete richiede un materiale con una maggiore capacità di accumulo latente. Infatti, per questa esposizione, la componente vetrata della sala prove è orientata a sud-ovest ed è quindi esposta a un'intensa radiazione solare che aumenterebbe i guadagni solari. Per questo motivo, è necessario contenere il surriscaldamento nell'ambiente con il materiale in grado di accumulare più calore latente.

Un'altra conclusione interessante è che quando si seleziona l'esposizione a nord, l'adozione di un PCM come SP26E sul lato esterno è sufficiente per raggiungere gli obiettivi proposti.

In particolare, la soluzione  $PI_{707}A_{0.5nv}SP26E-1.5cm-PU_{10}$  fornisce il minor numero di ore di disagio rispetto alle altre soluzioni. Ciò accade perché l'esposizione a nord nella stagione di raffreddamento è il lato con la temperatura superficiale più bassa sulla parete.

In tutti e tre i casi, i carichi di riscaldamento e raffreddamento sono comparabili; in particolare,  $\Delta E_c$  è pari a circa -57% e  $\Delta E_H$  è prossimo a -29%, rispetto al caso base, e questi indici sono, rispettivamente, -22% e -53% rispetto alla configurazione di progettazione di base.

### **3.2. Pacchetto parete innovativo in materiale a cambiamento di fase macroincapsulato e calcestruzzo geopolimerico: analisi termica in campo per un clima mediterraneo**

L'obiettivo principale della ricerca è dimostrare l'efficacia di un innovativo design di pareti confezionate durante le attività del progetto Green INSTRUCT, ma tenendo in considerazione il contributo aggiuntivo del materiale a cambiamento di fase su una struttura massiccia. La soluzione testata è innovativa sotto diversi aspetti:

- utilizzo di rifiuti da costruzione e demolizione (CDW) nel settore della prefabbricazione e riciclabilità dei componenti, alla fine del ciclo di vita del prodotto, in un approccio Cradle-to-Cradle;
- riduzione al minimo del lavoro in loco attraverso lo sviluppo di un prodotto modulare, mirato a un assemblaggio facile e veloce, trasporto e stoccaggio semplici e, allo stesso tempo, manutenzione e smantellamento semplici alla fine del ciclo di vita del prodotto;
- effetti microclimatici positivi e maggiori proprietà acustiche e isolanti. La campagna sperimentale è stata condotta nel clima di Benevento (Latitudine 41°7' 55", Longitudine 14°46' 40" , Altitudine 135 m), una città del Sud Italia con un tipico clima mediterraneo con estati calde o calde e secche e inverni miti o freschi e umidi.

La campagna sperimentale è stata condotta nel clima di Benevento (Latitudine: 41°7'55"; Longitudine: 14°46'40"; altitudine: 135m s.l.m.), una città del Sud Italia con un tipico clima mediterraneo con estati calde o calde e secche e inverni miti o freschi e umidi. È all'interno della classe "C" secondo la classificazione di Koppen [103]. La caratterizzazione del sito secondo la norma UNI 10349 [118] indica che la temperatura esterna per i giorni di progetto invernali ed estivi è rispettivamente di -2 °C e 32 °C; inoltre, l'umidità relativa esterna è impostata rispettivamente al 48.8% e al 50%. È all'interno della zona climatica italiana "C", caratterizzata da 1316 gradi giorno di riscaldamento (linea di base, 20 °C) come riportato dal DPR n.142 [119].

A partire da marzo 2015 è in corso un'attività di monitoraggio di tutti i parametri climatici [120]. Questi dati indicano che la temperatura media mensile è estremamente variabile nell'arco dell'anno anche a causa dei cambiamenti climatici; ad esempio, a gennaio le temperature medie mensili estreme sono quelle relative agli anni 2018 e 2015, pari rispettivamente a 7.9 °C e 3.7 °C. Per il periodo estivo, luglio e agosto sono i mesi più caldi con il valore medio più elevato ottenuto rispettivamente nel 2015 (27.1 °C) e nel 2019 (26.8 °C).

Le elaborazioni dei dati acquisiti sono organizzate per dare una risposta a questi argomenti di ricerca: la caratterizzazione in situ del comportamento del PCM in condizioni reali interne ed esterne e il confronto tra le prestazioni di una parete in calcestruzzo geopolimerico con e senza il contributo della transizione di cambiamento di fase. Sono presentate le seguenti elaborazioni.

I. Comportamento termodinamico in campo del PCM:

- l'andamento delle temperature superficiali su entrambi i lati del PCM per fornire indicazioni in base alla temperatura di transizione dichiarata dal produttore, all'attivazione del materiale e a eventuali fenomeni di isteresi.

II. Prestazioni del pacchetto parete:

- differenza tra moduli progettati in base a confronti a lungo termine e anche giornalieri di flussi di calore e temperature superficiali;
- riduzione della sollecitazione esterna con la valutazione della temperatura superficiale;
- l'energia immagazzinata e rilasciata come calcolo integrale di accumulo/rilascio di calore secondo l'equazione (3.5) come approccio proposto da Wu et al. [64]:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} HF A dt \quad (3.5)$$

dove Q è il calore immagazzinato/rilasciato;  $t_1$  e  $t_2$  sono rispettivamente l'ora di inizio e fine del calcolo; HF è il flusso di calore monitorato; A è l'area dell'involucro; t è il tempo.

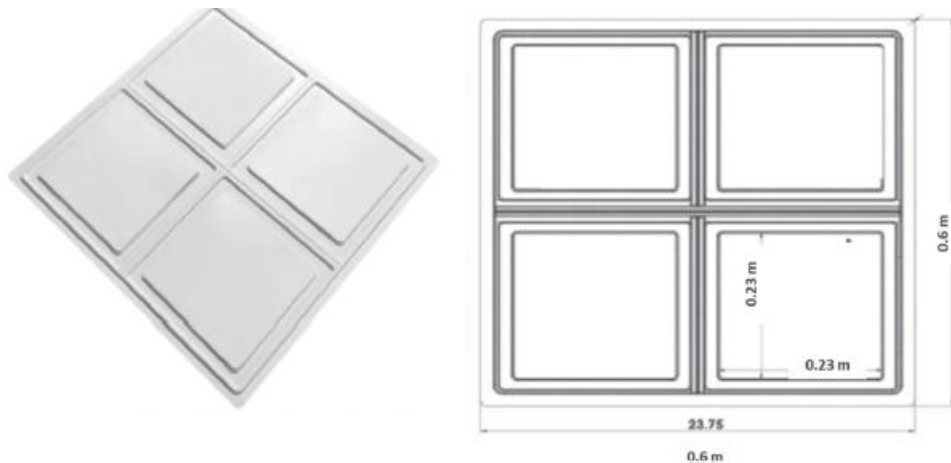
Nella seguente analisi, l'effetto combinato di temperatura e radiazione solare sarà espresso in termini di temperatura sole-aria esterna ( $T_{\text{sol-aria}}$ ) calcolata con il valore monitorato dalla stazione climatica disponibile [121].

### 3.2.1. Materiale a cambiamento di fase selezionato

Secondo diversi studi sulla selezione del materiale da accoppiare al pacchetto di pareti di progettazione, come descritto precedentemente [122] il materiale a cambiamento di fase installato è il pannello Templok, mostrato in Figura 14. Il pannello Templok (spessore di 6.4 mm e peso di 5.70 kg/m<sup>2</sup>) è stato studiato per applicazioni industriali e semi-industriali, agroindustria, allevamento e retrofitting su edifici per uffici. Può essere accoppiato ad altri isolanti statici e applicato in modalità cappotto o soluzione a secco.

La Tabella 16 mostra i principali dati tecnici; il macroincapsulamento è assicurato da un pannello in PVC semirigido e le composizioni chimiche dei sali idrati sono riportate nella Tabella 17. Il macroincapsulamento è assicurato da un pannello in PVC e lo spessore massimo della cella e del pannello è rispettivamente di 4.06 e 6.35 mm. Il pannello è progettato come una soluzione a tripla tenuta per garantire longevità e affidabilità.

Può essere installato stratificato in pareti asciutte o attrezzate, tetto o soffitto, all'interno dei controsoffitti o in alternativa ai pannelli esistenti.



**Figura 14. PCM installato con le sue dimensioni**

Permeabilità	4.6 ng/Ns	Certificato secondo ASTM E96
Conduktività termica	0.54 W/mK (fase liquida)	1.09 W/mK (fase solida)
Reazione al fuoco	Classe A1	Certificato secondo ASTM E84
Energia termica latente	2.32 J/g	
Calore specifico	3.14 kJ/kg/K	
Temperatura di transizione	25°C	

**Tabella 16. Dati tecnici del pannello Templok**

Cloruro di calcio	45-60%
Cloruro di potassio	>3%
Silicato di magnesio e alluminio	10-25%
Silicato idrato di sodio e calcio	1-5%
Acqua	35-60%

**Tabella 17. Composizione chimica dei sali idrati**

Il pannello Templok conferisce la massa termica necessaria agli edifici, ma senza la presenza di carbonio e a costi molto inferiori rispetto ad altri materiali da costruzione. Questo pannello è disponibile per diverse temperature di fusione, ovvero 18°C, 22°C, 25°C e 29°C, ma quello utilizzato per questo studio ha  $T_f$  di 25°C. Questa temperatura sembra essere quella ottimale secondo i risultati di ottimizzazione numerica discussi dagli autori [99]. In questo lavoro, si fanno variare la posizione del pannello, la temperatura di fusione e l'esposizione della parete della sala prove.

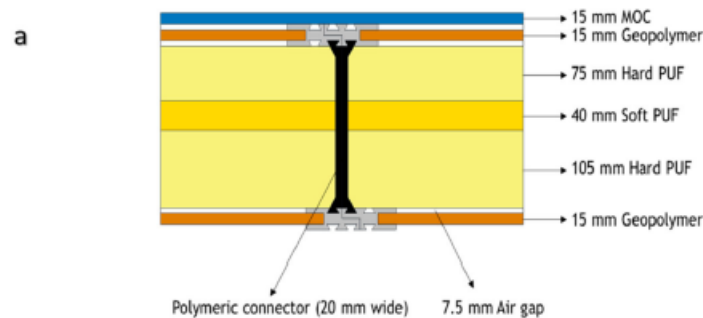
Come la ricerca precedente, anche questa attività sperimentale è stata condotta nella sala prove MATRIX. In particolare, negli ultimi tre anni questa sala prove è stata un sito dimostrativo per il progetto Green INSTRUCT (GI) finanziato dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea (nell'ambito dell'accordo di sovvenzione 723825). Il progetto consente di progettare un blocco strutturale modulare

prefabbricato adatto sia alla riqualificazione di vecchi edifici che di nuovi edifici; è costituito per oltre il 70% da rifiuti da costruzione e demolizione (CDW) in peso. Tutte le informazioni sul progetto e sul processo di progettazione sono disponibili sul sito Web ufficiale [123].

Il design del pannello GI si basa su un sistema di strati che è inserito tra diversi strati di materiali provenienti da CDW e non CDW. Ogni materiale ha determinate caratteristiche che consentono al pannello di essere innovativo ed efficiente dal punto di vista energetico in termini di caratteristiche termiche, nonché di riciclaggio e riutilizzo. I materiali selezionati per il modulo GI sono visibili di seguito:

- cemento di ossido di magnesio (MOC): finitura interna simile al cartongesso per conferire una finitura esteticamente gradevole;
- blocco geopolimerico: utilizzato per l'integrità strutturale del pannello (resistenza e resistenza al carico);
- schiuma di poliuretano (PUF): utilizzata per l'isolamento termico e composta da materiali CDW;
- alluminio: la struttura principale del pannello GI per tenere insieme il pannello e semplificare il processo di installazione.

Il design finale è costituito, dall'interno all'esterno, da uno strato MOC seguito da 2 strati di geopolimero. Tra gli strati di geopolimero è inserito uno spesso strato di schiuma PU. Il tutto è tenuto insieme da un profilo in alluminio estruso (come mostrato nella Figura 15(a)) e connettori in PVC. Questo comprende il pannello interno, mentre il pannello esterno è costituito da un sistema pannello/cassetta in alluminio che ospiterà la parete verde e i substrati. Il telaio in alluminio include 4 tubi (4 cm×4 cm) per stabilità strutturale e strutture. Per quanto riguarda gli isolamenti, la polvere di schiuma PU e le fibre di legno (2%) da CDW sono state incorporate in resina PU incontaminata per realizzare schiuma PU rigida (dura) (isolante termico) e la polvere di schiuma PU e le fibre di legno (1,5%) da CDW sono state incorporate in resina PU incontaminata per realizzare schiuma PU flessibile (morbida) (isolante acustico). Le proprietà delle schiume sviluppate (resistenza alla compressione, resistenza alla trazione, densità, capacità termica, conduttività termica) sono state testate dal partner del progetto. Per i blocchi geopolimerici, sono stati utilizzati rifiuti ceramici, come mattoni e piastrelle, che contengono elevate quantità di allumina-silice nella fase amorfa che deriva dalle attività di costruzione e demolizione. Come precursore per la produzione della soluzione di attivazione alcalina, è stato utilizzato vetro di scarto. Per sviluppare uno strato di geopolimero a bassa densità, sono stati incorporati nella matrice aggregati leggeri sotto forma di polistirene espanso, polistirene estruso o schiuma di poliuretano. Mattoni e piastrelle sono stati macinati ( $d_{50} = 20 \mu\text{m}$ ) per accelerare le reazioni di geopolimerizzazione. Il vetro di scarto è stato macinato ( $<56 \mu\text{m}$ ) per facilitare la fase di dissoluzione alcalina. EPS, XPS e PU sono stati frantumati e setacciati per ottenere particelle con dimensioni comprese tra 1 e 4 mm che si sono dimostrate le più appropriate per una dispersione soddisfacente nella matrice geopolimerica.



**b**

Material	x [mm]	$c_p$ [J/(kg K)]	$\lambda$ [W/(m K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
MOC	15	Not measured	0.31	1.05
Air-gap	7.5			
Geopolymer	15	0.9	0.45	1400
Air-gap	7.5			
Hard PUF	75	1174	0.0244	43.4
Soft PUF	40	868	0.0338	22.7
Hard PUF	105	1174	0.0244	43.4
Air-gap	7.5			
Geopolymer	15	0.9	0.45	1400

**Figura 15. (a) Disposizione del pannello GI; (b) caratteristiche termofisiche**

Nella sala prove è stato montato solo il pannello interno e le principali caratteristiche termofisiche sono illustrate nella Figura 15(b). I dati proposti per la caratterizzazione del materiale sono stati ottenuti da esperimenti in laboratorio durante il progetto di ricerca e per questo motivo per l'intercapedine d'aria è indicato solo lo spessore. Tuttavia, il comportamento di isolamento di tutti i moduli può essere descritto con una trasmittanza termica complessiva di  $0.11 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . La valutazione sperimentale della trasmittanza termica si basa sulle misurazioni del flusso di calore e delle temperature superficiali assumendo la conduttanza termica interna ( $h_{si}$ ) ed esterna ( $h_{se}$ ), rispettivamente  $7.7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  e  $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Il passo temporale di campionamento selezionato era di 1800 s e il valore U è stato calcolato secondo la metodologia del "Metodo medio ISO 9869" [171]. Le dimensioni del pannello testato sono (globalmente)  $1.2 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ . Per la sua installazione, è stata scelta la parete di prova con la finestra con esposizione a sud-ovest. I lavori di installazione sono consistiti nel praticare un foro nella parete di prova scelta e nel dimensionarla in modo da poter ospitare il prototipo e il telaio di protezione. Le caratteristiche dimensionali e i dettagli tecnici sono riportati nella Figura 16, che mostra le tavole di progetto 3D predisposte a tale scopo. Il prototipo GI è stato isolato utilizzando un telaio in legno, le cui caratteristiche geometriche sono illustrate nella Figura 17. Esso funge da collegamento tra il prototipo e la parete esistente. Inoltre, per una maggiore tenuta e isolamento termico, è stata utilizzata schiuma poliuretanicca nei grezzi. Il layout è presentato nella Figura 18(a). Sulla base di questa struttura, tre pannelli Templok sono stati applicati tramite adesivo sul telaio del modulo destro (Figura 18(b)) e mediante ispezione termografica è stato verificato che non si verificassero ponti termici. Quindi, i pannelli sono stati rivestiti con uno strato di cartongesso con uno spessore di 12.5 mm. In questo modo, è possibile confrontare, a parità di esposizione e di condizioni operative, il comportamento del pacchetto di parete progettato con e senza l'integrazione del materiale a cambiamento di fase.

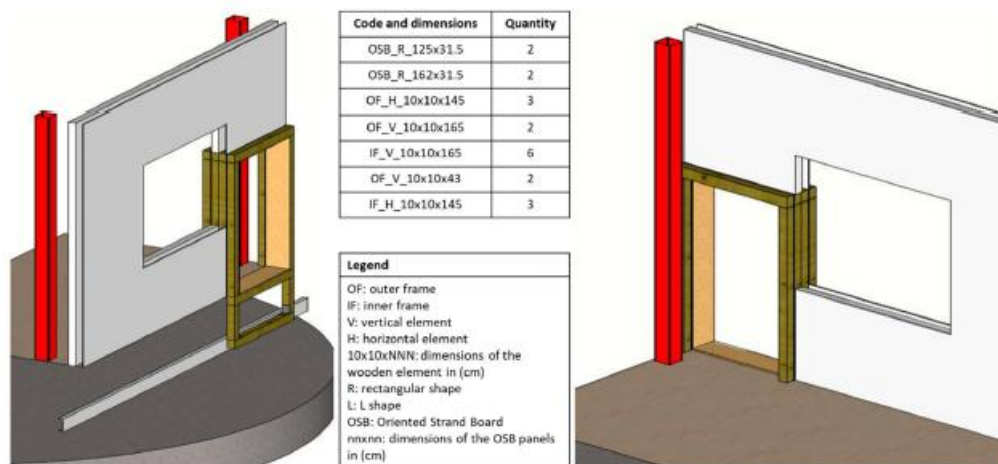


Figura 16. Vista 3D della parete di prova con il foro per ospitare il pannello GI

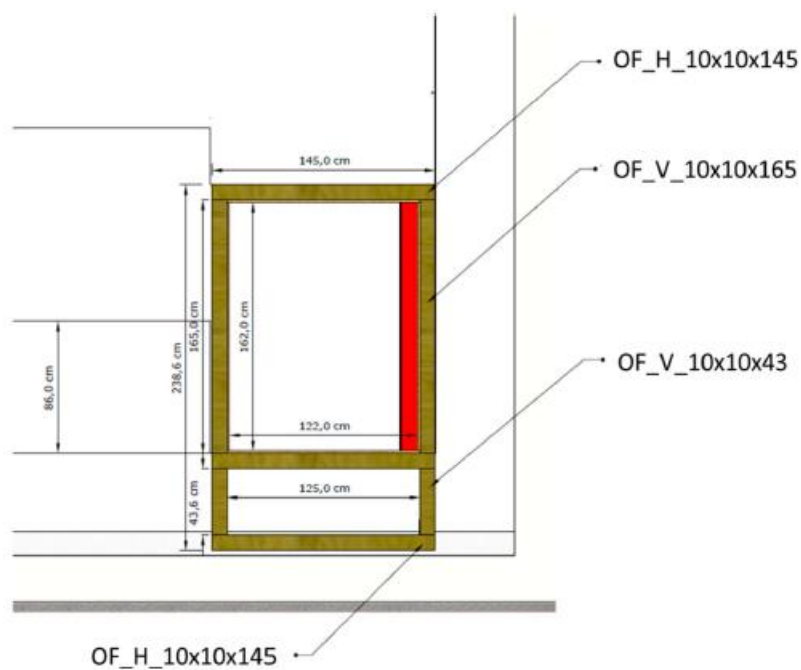


Figura 17. Caratteristiche dimensionali del giunto in legno



Figura 18. (a) Installazione completa di GI (novembre 2019); (b) lavoro per l'applicazione PCM (maggio 2021)

### 3.2.2. Impostazione dell'apparato sperimentale

L'area monitorata è divisa in due sottomoduli, uno per testare le prestazioni del blocco progettato e l'altro per testare l'efficacia dell'applicazione PCM; questi sono chiamati rispettivamente modulo GI1 e modulo GI2. I moduli sono stati dotati di diversi sensori, durante il periodo di installazione, e il monitoraggio è in corso dal 26 novembre 2019, ma il PCM è stato montato durante la primavera del 2021; pertanto, la ricerca proposta si concentra sui dati acquisiti da maggio 2021 a fine luglio 2021. Per quanto riguarda le condizioni interne, fino al 10 giugno il sistema di raffreddamento è stato spento quindi è stato acceso con una temperatura di set-point di 26 °C; questo è il valore suggerito dalle normative per il comfort e anche per il risparmio energetico.

Una rappresentazione schematica dei sensori sul cartongesso esterno è mostrata nella Figura 19(a) con la loro nomenclatura; due sensori di temperatura superficiale per ogni modulo consentono di verificare l'uniformità del campo termico (ad esempio il ponte termico centrale alla giunzione tra i due pannelli) e di garantire una doppia acquisizione contro possibili malfunzionamenti dei sensori che, sottoposti a condizioni esterne, potrebbero avere periodi di non acquisizione, malfunzionamenti o errori.

Inoltre, è presente un sensore di temperatura superficiale (quadrato nella Figura 20(a)) e un sensore di flusso termico (cerchio nella Figura 20(a)) su entrambi i moduli geopolymer e una temperatura superficiale (T) sul pannello PCM. Nelle analisi seguenti,  $T_{s\_B}$  indicherà la temperatura superficiale misurata sul blocco di geopolymer su cui è stato poi montato il PCM, mentre  $HF\_B$  è il flusso termico misurato sullo stesso lato.

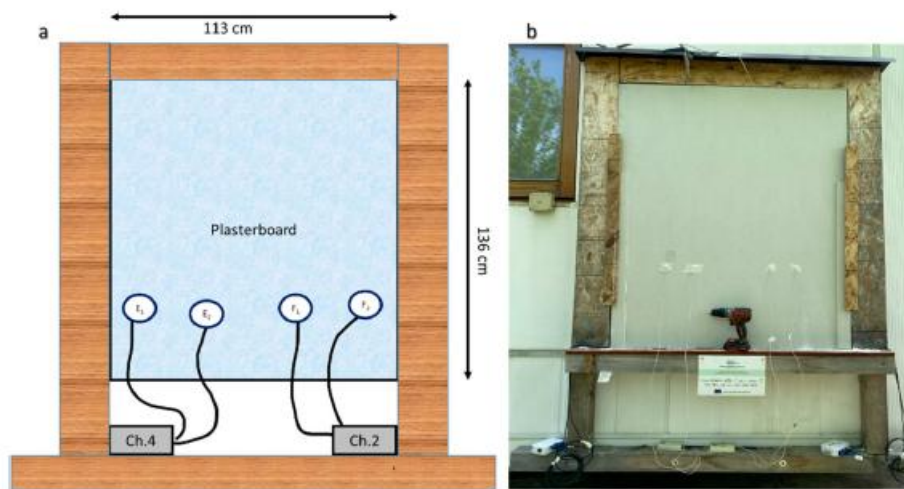


Figura 19. (a) Schema dei sensori esterni; (b) vista reale del cartongesso esterno

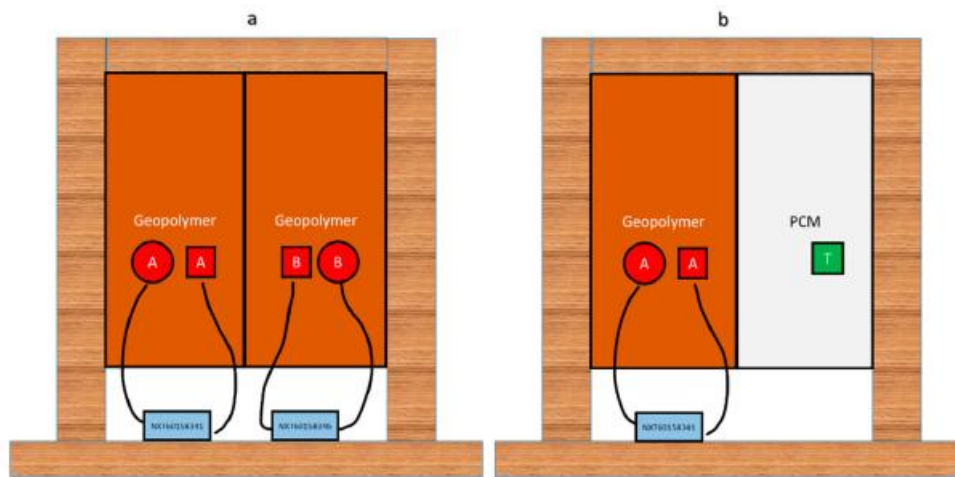


Figura 20. (a) Sensori su blocchi geopolimerici; (b) sensori su PCM

Sul lato interno di ogni modulo, e quindi all'interno della sala prove, sono stati montati il sensore di flusso termico e il sensore di temperatura superficiale; in questo caso,  $T_{s\_D}$  e  $HF\_D$  sono le variabili denominate GI2 e  $T_{s\_C}$  e  $HF\_C$  sono denominate GI1. Infine, sono stati installati all'interno della sala prove due sensori di temperatura ( $T_a$ ) e umidità relativa ( $RH_a$ ), uno al centro della sala per essere rappresentativo dell'intero volume e uno vicino al blocco geopolymer (30 cm dalla parete) per valutare possibili non uniformità vicino al pacchetto parete installato. La Tabella 18 mostra un riepilogo dei sensori, riportando anche le informazioni sulla precisione.

Nomenclatura	Sensore	Modello	Precisione
$T_{s\_A}, T_{s\_B}, T_{s\_E}, T_{s\_F}, T_{s\_T}$	Termoresistenza	Nesa ANS-TC-N (Pt100)	$\pm 0.1^\circ\text{C}$ a $0^\circ\text{C}$
$T_a, RH_a$	Sensore di umidità della temperatura dell'aria interna	ANS-UTAI-C	$-40 \div +60^\circ\text{C}; 0 \div 100\%$ RH
$HF\_A, HF\_B$	Sensore di flusso di calore	Hukseflux HFP01	$\pm 5\%$
$T_{s\_D}, T_{s\_C}$	Sensore di temperatura superficiale	Optivelox Thermozing	$\pm(0.10 \div 0.0017 t )^\circ\text{C}$
$HF\_C, HF\_D$	Sensore di flusso di calore	Optivelox Thermozing	$\pm 5\%$

Tabella 18. Specifiche tecniche dei sensori per il monitoraggio

Il sistema di monitoraggio si basa sull'impiego di due data logger multicanale, un processore RISC a 32 bit con a bordo un sistema operativo Embedded Linux (sensibilità per Tensione 300 nV a  $20^\circ\text{C}$  e Pt100 3/100 $^\circ\text{C}$  a  $20^\circ\text{C}$ ), uno per la centralina esterna e uno per la stazione interna, in grado di registrare fino a un intervallo di campionamento pari a 10 s. I dati sono stati trasmessi a un unico sistema di analisi remota, posto all'interno

del laboratorio, oppure possono essere controllati e trasmessi, tramite protocollo FTP su tecnologia Wi-Fi, agli uffici dei ricercatori e docenti coinvolti. La registrazione dei dati climatici è stata effettuata dalla stazione meteorologica centrale posta sul tetto del laboratorio, a circa 7.20 m di altezza dal suolo. Questa registra le condizioni meteorologiche più importanti quali la radiazione solare globale, la temperatura dell'aria esterna ( $T_{out}$ ) e l'umidità relativa, la velocità e la direzione del vento, oltre alla loro pressione. Inoltre, per la misurazione della quantità di pioggia, è stato installato un pluviometro con una capacità di 400 cm<sup>3</sup>. Infine, per la misurazione della radiazione solare infrarossa, sono installati sei pirgeometri su tutte le esposizioni, verticali e orizzontali. Inoltre, per la misurazione della radiazione solare globale su tutte le esposizioni verticali, sono stati posizionati quattro piranometri. Le loro specifiche tecniche sono riassunte nella Tabella 19.

Sensore	Tipo	Modello	Range	Precisione
Pluviometro	Corpo cilindrico da 400 cm <sup>3</sup>	NESA-ANS-PL400-N	0 ÷ 300 mm/h	±2%
Radiazione solare globale	Piranometro termopila di classe II	NESA-ANS-RSG-C	0 ÷ 2000 W/m <sup>2</sup> (0.3 ÷ 3µm)	<10% day <sup>-1</sup>
Radiazione solare infrarossa	Piranometro	DELTA OHM-LP PIRG 01	-300 ÷ 300 W/m <sup>2</sup> (5.5 ÷ 45 µm)	
Velocità del vento	Anemometro ad ultrasuoni	DELTA OHM HD52.3D	0 ÷ 60 m/s	±2%
Direzione del vento	Anemometro ad ultrasuoni		0 ÷ 359.9°	±2° RMSE 1.0 m/s
Temperatura dell'aria	Pt100		-40 ÷ 60°C	±0.1%
Umidità relativa	Trasduttore capacitivo		0 ÷ 100%	±1.5%RH a 15 ÷ 35°C
Pressione atmosferica	Trasduttore piezoresistivo		600 ÷ 1100 hPa	±0.5hPa a 20°C
Radiazione solare globale	Piranometro termopila di classe II		0 ÷ 2000 W/m <sup>2</sup>	<10% day <sup>-1</sup>

Tabella 19. Specifiche tecniche della stazione meteorologica

### 3.2.3. Risultati dell'attività sperimentale

#### 3.2.3.1. Comportamento termodinamico in campo del PCM

Il PCM installato ha una temperatura di fusione dichiarata di 25°C e il processo di transizione è stato verificato sotto sollecitazioni reali perché l'influenza delle condizioni esterne e della massa termica di altri materiali può influenzare il suo comportamento.

A questo scopo, gli andamenti orari per due settimane sono mostrati nelle Figure 21 e 22; qui  $T_{s\_T}$  e  $T_{s\_B}$  sono la temperatura superficiale monitorata sul pannello PCM e sul blocco geopolimero secondo la Figura 20,  $T_{s\_F}$

è la temperatura superficiale sul cartongesso esterno e  $T_{sol-air}$  fornisce lo stress esterno complessivo in termini di temperatura e radiazione misurata direttamente sulla parete.

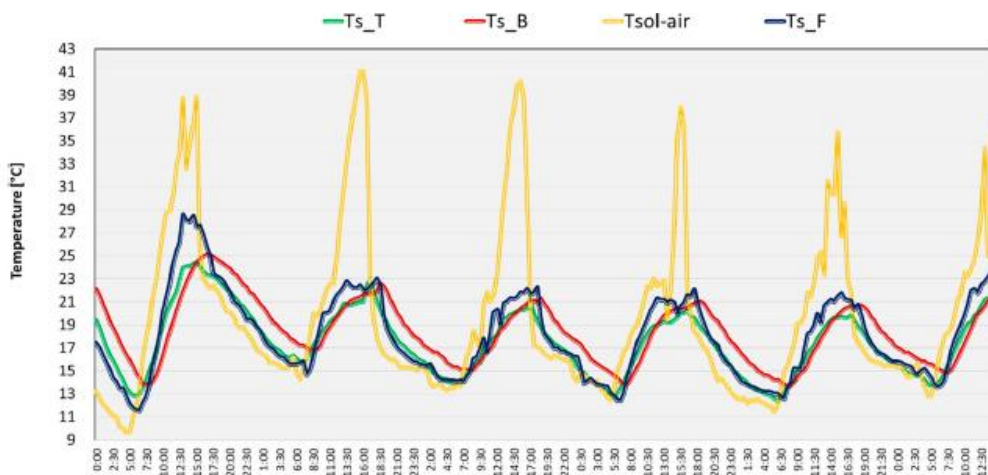


Figura 21. Andamento delle temperature superficiali all'interfaccia degli strati, 11-16 maggio

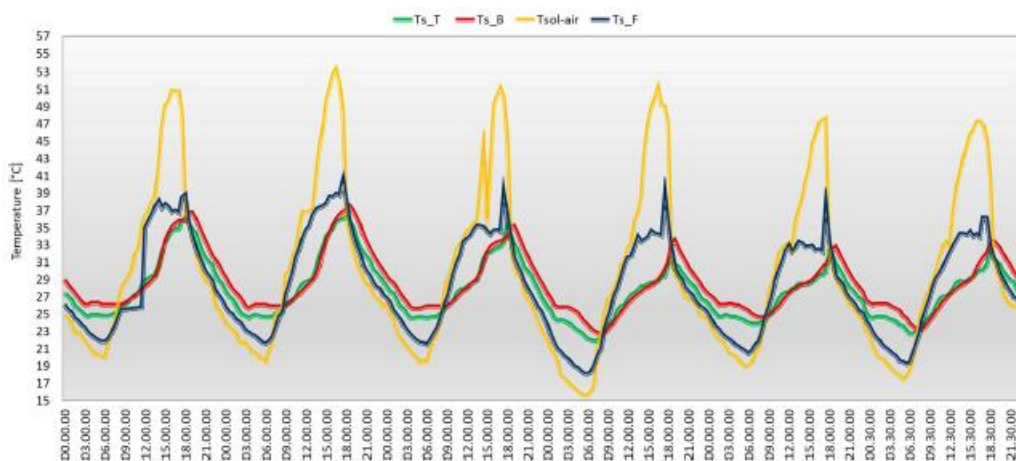


Figura 22. Andamento delle temperature superficiali all'interfaccia degli strati, 7-12 luglio

I giorni selezionati per maggio (Figura 21) sono caratterizzati da valori inferiori per la temperatura esterna ( $T_{out}$ ) e la radiazione solare per tutti i periodi di monitoraggio. In breve,  $T_{out}$  ha oscillato tra valori estremi di  $9.6^{\circ}\text{C}$  (4:30, 11 maggio) e  $29.7^{\circ}\text{C}$  (12:30, 11 maggio) con un valore medio giornaliero vicino a  $19^{\circ}\text{C}$ . Il giorno più caldo è stato l'11 maggio caratterizzato da un valore medio giornaliero di  $23.7^{\circ}\text{C}$  mentre la radiazione solare verticale più elevata (IV, valore di picco  $629\text{W}/\text{m}^2$ ) è stata monitorata durante il 12 maggio. Non si sono verificati eventi piovosi e la velocità del vento è variata tra 0.2 e 4.8 m/s.

Per quanto riguarda l'attivazione del PCM, la  $T_{sol-air}$ , solo durante le ore più calde, supera il valore di fusione, ma considerando la temperatura misurata sul cartongesso esterno il valore è sempre inferiore a  $25^{\circ}\text{C}$  quindi il materiale a cambiamento di fase non dovrebbe essere attivato, tranne durante il pomeriggio dell'11 maggio, quando  $T_{s\_F}$  raggiunge  $28.6^{\circ}\text{C}$ . Ciò è confermato dal confronto di  $T_{s\_T}$  e  $T_{s\_B}$  che hanno valori e andamento comparabili con  $T_{s\_F}$ .

La Figura 22 mostra i valori monitorati per la settimana più calda di luglio. La temperatura massima registrata è stata di 39°C (16:30 8 luglio) e considerando solo le ore diurne (dalle 6:00 alle 19:30), il valore medio del  $T_{out}$  giornaliero è di 29°C (11 luglio) a 33°C (8 luglio) e di conseguenza il valore medio di  $T_{sol-air}$  è stato vicino o superiore a 36°C ogni giorno. Non ci sono giorni di pioggia e la velocità del vento è stata solitamente inferiore a 0.2 m/s. L'Iv monitorato ha avuto valori di picco vicini a 430W/m<sup>2</sup> in tutti i giorni considerati tranne l'11 luglio, durante il primo pomeriggio, quando ha raggiunto 524W/m<sup>2</sup>. Queste sollecitazioni esterne causano l'attivazione del processo di fusione durante la mattinata, come è evidente guardando  $T_{s\_T}$ ; il processo di fusione è abbastanza isoterma e poi la temperatura aumenta ma i valori di picco vengono raggiunti in tarda serata e poi, a partire dalle 21:00 inizia il ciclo di scarica. La temperatura sulle interfacce PCM è abbastanza uguale e negli ultimi tre giorni di monitoraggio probabilmente il ciclo di scarica non è completo poiché la temperatura diminuisce e aumenta rapidamente. In queste condizioni, il PCM ha un comportamento molto importante perché consente di spostare e diminuire le ondate di calore. È chiaro con il confronto tra  $T_{s\_B}$  e  $T_{s\_F}$ , per cui la differenza, a partire dalle 12:00 aumenta; ad esempio, il 7 luglio è di 8.15 °C alle 13:30 o 8.68 °C alle 17:30 dell'11 luglio.

Un'indicazione sull'attivazione del PCM può essere trovata nell'analisi cumulativa della temperatura superficiale del pannello, considerando l'indice  $time_M\%$  definito come la percentuale di tempo (riferita al passo temporale di acquisizione) durante la quale  $T_{s\_T}$  è all'interno, al di sotto o al di sopra dell'intervallo di fusione assunto 24-26°C. Questo intervallo di fusione è stato selezionato per prendere in considerazione l'inizio del processo di fusione e la fusione completa o quasi completa del materiale. Infatti, l'elaborazione dei dati indica che il valore di  $T_{s\_T}$  è uguale alla temperatura di transizione nominale (25°C) solo per il 3% di tutto il tempo di monitoraggio, quindi si può concludere che come previsto e indicato da altri studi sperimentali, non esiste un punto di transizione fisso, ma un intervallo appropriato dovrebbe essere indicato anche dalla scheda tecnica. Per il materiale indagato, verrà sviluppata una futura caratterizzazione in laboratorio. La Figura 23 riporta l'elaborazione di tutti i dati acquisiti considerando separatamente il giorno dalle 6:30 alle 19:30 e la notte, per tenere conto dell'effetto della radiazione solare. I dati indicano che per le condizioni esterne del sito, nel mese di maggio, il PCM si attiva raramente poiché durante il giorno la  $T_{s\_T}$  è superiore a 24°C solo per il 13% dei dati monitorati, altrimenti il ciclo di scarico viene solitamente completato durante la notte poiché il  $time_M\%$  è del 97%. Ciò è confermato dall'analisi della moda del set di dati di maggio; è di 20.8°C per il giorno e 15.3°C per la notte. I valori massimi registrati sono invece rispettivamente di 27.8°C e 25.7°C. Considerando il giorno, a giugno i valori monitorati oscillano tra 11.6°C e 37.5°C con la moda pari a 24°C; tuttavia, questo mese è caratterizzato da condizioni che consentono un'attivazione più frequente poiché il  $time_M\%$  è del 46% considerando i valori inferiori a 24°C. Durante la notte, nei giorni più caldi, il PCM non riesce a completare il ciclo di scarico poiché il  $time_M\%$  è del 19% considerando i valori superiori a 24°C. Inoltre, c'è un ampio intervallo di variazione per i valori con minimo e massimo registrati rispettivamente 13,7°C e 33,3°C. A luglio, la temperatura di solito supera il valore di fusione, con una variazione mensile di 18.3°C e 36.3°C e un valore modale di 27.8°C. Il materiale è completamente fuso per il 59% del tempo durante il giorno e per il 28% durante la notte, considerando che il  $T_{s\_T}$  è superiore a 26°C. Infine, considerando i valori ottenuti per luglio,

quando lo stress esterno aumenta in termini di temperatura e radiazione solare incidente, l'attivazione è più frequente. Probabilmente l'adozione di una temperatura di fusione più elevata potrebbe ridurre il  $time_M\%$  nell'intervallo della fase liquida ma l'attivazione potrebbe essere meno frequente. L'indice proposto sembra suggerire che il PCM selezionato è soggetto a frequenti cicli di carica e scarica ed è adatto alle condizioni climatiche di Benevento.

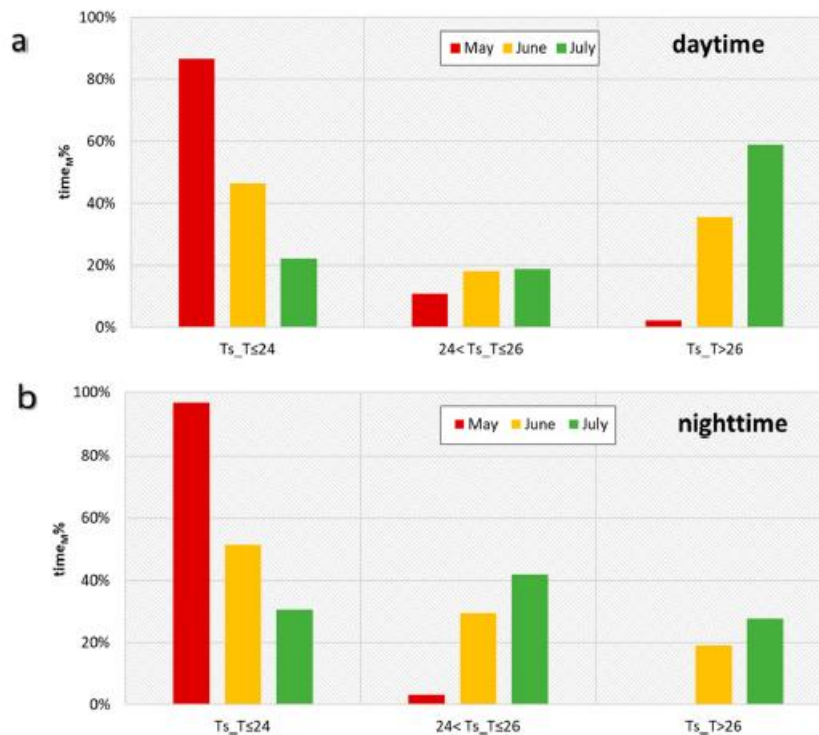


Figura 23.  $time_M\%$  – percentuale di tempo nell'intervallo di fusione: (a) giorno; (b) notte

### 3.2.3.2. Prestazioni del pacchetto parete

Per comprendere l'effetto del PCM sul comportamento del pacchetto parete, viene proposto un confronto tra i moduli denominati GI1 e GI2. Questo confronto si baserà sul confronto delle temperature superficiali e del flusso di calore e sull'analisi dell'ampiezza dello stress termico.

#### *ANALISI DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE E CONFRONTO DEL FLUSSO DI CALORE*

Le differenze di temperatura superficiale ( $\Delta Ts$ ) vengono calcolate, per ogni acquisizione, tra le temperature misurate dal sensore posizionato sul cartongesso esterno e quello sul lato interno dei pannelli GI. Considerando la Figura 3.18, i sensori esterni sono indicati con le lettere E ed F per i moduli, rispettivamente senza e con PCM; nel frattempo, A e B hanno registrato le temperature sul lato interno. Queste differenze possono indicare quanto il PCM può ridurre lo stress sul pannello in calcestruzzo geopolimerico e possono anche essere correlate alla sua capacità termica.

La Figura 24, per la settimana di monitoraggio 10-16 maggio, riporta la differenza di temperatura sul lato con PCM con andamento nero e sul modulo GI1 con andamento verde. Innanzitutto, si può osservare che le

differenze di temperatura positive sono relative alle ore di sole e, globalmente, indicano un flusso di calore in entrata mentre, solitamente a partire dalle 17:00, la differenza di temperatura è negativa, quindi il flusso è diretto all'esterno.

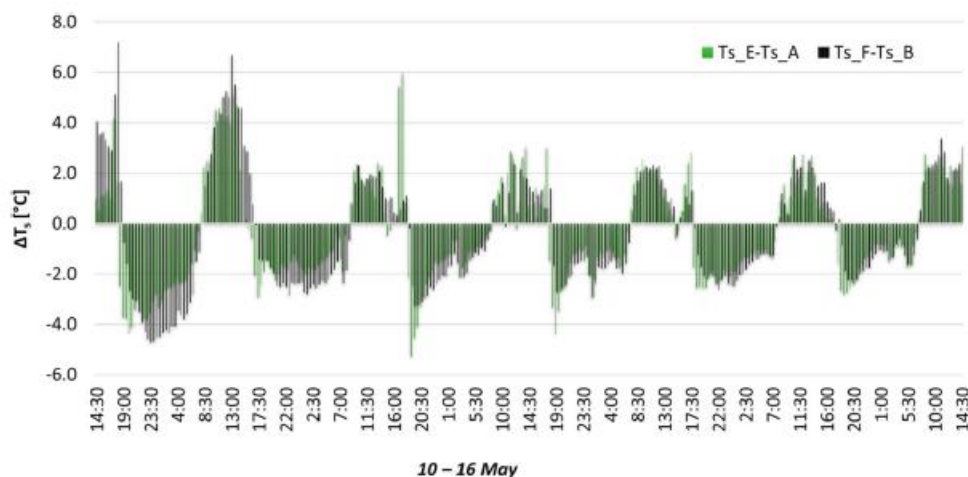


Figura 24. Differenza di temperatura superficiale sui pannelli GI: 10–16 maggio

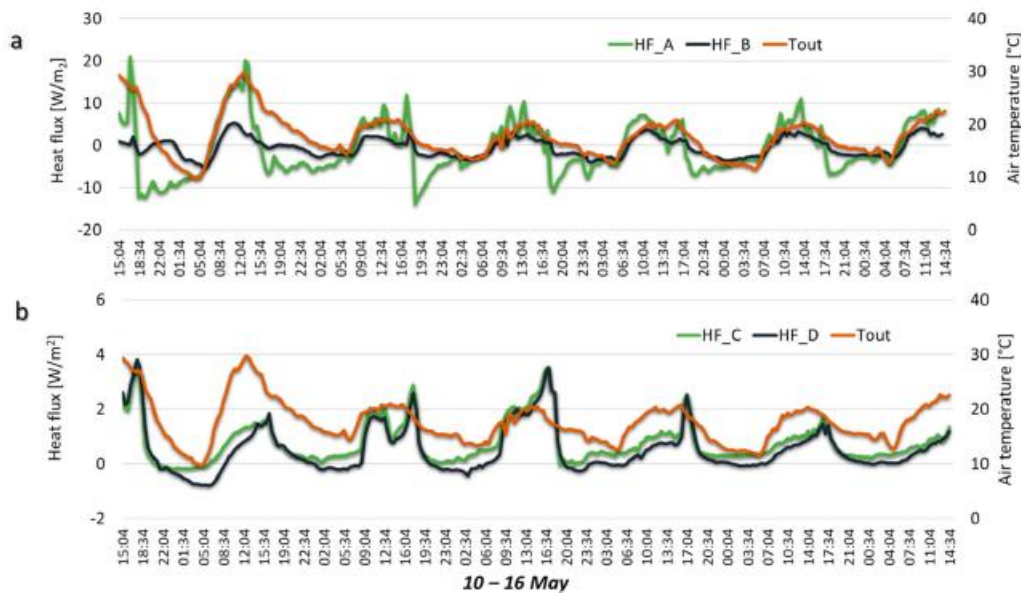
Questa differenza di temperatura è solitamente molto più elevata per il modulo con PCM, durante le ore più calde del giorno e durante la notte. Ciò indica che durante il giorno, il blocco geopolimero rimane più freddo rispetto al caso senza PCM e, in effetti, nel periodo considerato  $T_{s\_B}$  variava da 13.6 °C a 26.5 °C, mentre  $T_{s\_A}$  tra 12.5 °C e 31.3 °C. Questo comportamento può essere attribuito alla transizione di cambiamento di fase poiché i pannelli sono sottoposti alle stesse forzature interne ed esterne. Più specificamente, gli andamenti sembrano suggerire che anche sotto sollecitazioni esterne che non indicano condizioni di attivazione (Figura 23), il PCM fornisce il suo contributo alla riduzione del flusso di calore in entrata. Questo risultato rileva un possibile fenomeno di isteresi, non dichiarato dal produttore, e, pertanto, anche se la temperatura di attivazione nominale è di 25°C, esiste un intervallo di attivazione più ampio che al momento non è noto.

Per migliorare l'analisi dei risultati, sono state calcolate le sollecitazioni massime e minime sul blocco interno e riportate nella Tabella 24; queste sono intese come la differenza di temperatura superficiale misurata sul calcestruzzo geopolimerico e sul pannello interno, considerando i valori massimi e minimi registrati nell'arco della giornata. Ad esempio, nel caso del modulo GI2, queste sono denominate  $\Delta T_{s\_DBmax}$  e  $\Delta T_{s\_DBmin}$ .

	PCM (GI2)		NO PCM (GI1)	
	$\Delta T_{s\_DBmax}$	$\Delta T_{s\_DBmin}$	$\Delta T_{s\_CAmax}$	$\Delta T_{s\_CAmin}$
10/05	-1.3	1.1	-5.6	4.2
11/05	-0.2	9.5	-3.1	11.1
12/05	1.8	6.6	-0.7	7.4
13/05	3.4	7.6	1.5	8.2
14/05	2.6	8.4	1.0	9.1
15/05	1.7	7.8	0.4	8.2
16/05	0.1	6.2	-1.2	6.7

Tabella 20. Differenza di temperatura massima e minima sul blocco geopolimer: 10–16 maggio

La Tabella 24 suggerisce che il PCM contribuisce a ridurre lo stress termico dello strato interno e a ridurre il flusso di calore. Considerando, ad esempio, l'11 maggio, caratterizzato da una temperatura sole-aria variabile tra 9.6°C (4:30) e 39°C (15:00), la temperatura massima raggiunta sul lato interno è di 25.1°C nel caso con PCM e di 28.3°C per GI1. Il  $\Delta T_{s\_DBmax}$  indica che il PCM sta contenendo il calore termico e l'aumento di temperatura è di soli 0.2°C; d'altra parte, nel caso di  $\Delta T_{s\_CAmax}$ , a causa del flusso di calore in arrivo, la temperatura aumenta di 3.1°C.



**Figura 25. Flusso di calore, 10-16 maggio: (a) strato geopolimerico; (b) strato interno**

I risultati precedenti sono confermati dall'analisi del flusso termico. La Figura 25(a) mostra il valore monitorato dai sensori montati sul blocco geopolimero e la Figura 25(b) i flussi misurati sul cartongesso interno. I valori positivi indicano un flusso termico in ingresso.

HF\_A, posizionato sul lato della parete GI senza PCM, mostra un andamento con valori più alti e più variabili rispetto a HF\_B dietro il materiale a cambiamento di fase. La differenza nei valori di picco durante il pomeriggio o la tarda mattinata, ancora una volta, suggerisce che la transizione è avvenuta. Infatti, l'11 maggio, alle 10:00 HF\_A era più alto di HF\_B a 5.1 W/m<sup>2</sup> e alle 15:00 di circa 16.4 W/m<sup>2</sup>. La differenza è minore durante le giornate non molto soleggiate, come il 14 maggio, quando il T<sub>out</sub> varia tra 19.3°C e 20.8°C nel periodo 10:00–16:30 e il T<sub>sol-air</sub> tra 21.1°C e 36.2°C. In queste condizioni, la differenza dai flussi di calore raggiunge il massimo (3.7W/m<sup>2</sup>) alle 11:00. Durante la sera e la notte, il flusso di calore monitorato sul modulo GI2 è solitamente più alto, a causa del ciclo di scarica; ad esempio, HF\_B è più alto di HF\_A di circa -6.5W/m<sup>2</sup> alle 21:30 dell'11 maggio. La Figura 3.24(a) mostra anche l'andamento della temperatura esterna. Si può vedere come l'andamento del sensore A segua quello di T<sub>out</sub>. Ciò significa che a differenza del materiale a cambiamento di fase, lo strato esterno di GI non è in grado di attenuare il flusso di calore in arrivo. La figura 25(b) mostra l'andamento del flusso monitorato sul lato interno. In entrambi i casi si nota un piccolo ritardo tra il momento

in cui la temperatura esterna raggiunge il suo picco e il massimo del flusso termico che, tuttavia, coincide per i due settori. Questi andamenti invece non sono adatti a descrivere il comportamento del PCM poiché sono fortemente influenzati dalle condizioni indoor e dalla ridotta estensione della superficie monitorata che non è in grado di influenzare anche le condizioni all'interno della sala prove. Inoltre, poiché il pacchetto parete è già massiccio, sembrerebbe che il PCM non influenzi il ritardo temporale. Tuttavia, con riferimento agli ultimi tre giorni, si riscontra una differenza nel flusso inferiore a  $1\text{W/m}^2$  per ogni step temporale di monitoraggio.

La Figura 26 mostra la differenza nelle temperature superficiali monitorate nel periodo 14-20 giugno, quando, con condizioni esterne più estreme, il PCM viene attivato frequentemente. Ciò è evidente considerando la differenza nelle  $\Delta T_s$  calcolate. Nelle ore più calde, il modulo GI2 è caratterizzato da differenze di temperatura superficiale superiori al modulo GI senza materiale a cambiamento di fase. Ciò significa che il modulo GI1 non è in grado di attenuare il flusso di calore in ingresso. Per il settore con PCM, la differenza di temperatura massima ( $12.4\text{ }^\circ\text{C}$ ) è stata registrata alle 18.00 del 15 giugno, quando la temperatura aria-sole variava da  $49\text{ }^\circ\text{C}$  (17:30) a  $35\text{ }^\circ\text{C}$  (18:30) e, quindi, il PCM era attivo. Allo stesso tempo,  $T_{s\_E}-T_{s\_A}$  era pari a  $1.94\text{ }^\circ\text{C}$ .

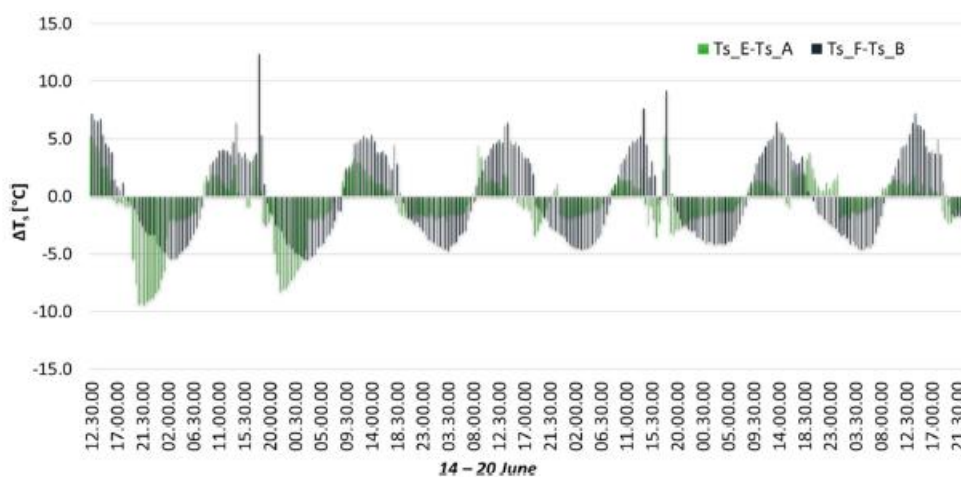


Figura 26. Differenza di temperatura superficiale sui pannelli GI: 14-20 giugno

Un altro giorno interessante è il 20 giugno poiché è stato caratterizzato da valori di radiazione solare monitorati sulla superficie verticale molto bassi con un picco di  $264\text{ W/m}^2$  alle 15:00 ma valori più alti di  $T_{out}$  variavano da  $35.3\text{ }^\circ\text{C}$  alle 15:00 a  $23.7$  alle 23:30. In queste condizioni, il PCM assicura  $T_{s\_B}$  sempre inferiore a  $30^\circ\text{C}$ , e pari a  $28.1^\circ\text{C}$  durante le sollecitazioni esterne estreme; allo stesso tempo  $T_{s\_A}$  era di  $33.1^\circ\text{C}$ . Durante la notte, il valore più alto della differenza per il modulo GI2 testimonia il ciclo di scarica.

La Tabella 21 riporta gli indici introdotti per la settimana esaminata. Anche in questo caso, la differenza tra il massimo registrato è inferiore nel modulo con PCM, ciò significa che sia lo strato interno che quello geopolimerico sono mantenuti a condizioni simili a causa della transizione del materiale a cambiamento di fase; nel frattempo, nel modulo GI1, si verifica una maggiore variazione delle condizioni durante il giorno con maggiore stress termico per gli strati. Considerando ad esempio il 15 giugno, nel valore massimo registrato si riscontra solo una differenza di  $-2.1^\circ\text{C}$ , che diventa  $-6.7^\circ\text{C}$  senza PCM. In entrambi i casi, le differenze sono

negative perché la temperatura raggiunta dallo strato geopolimerico è superiore a quella interna. Invece, la differenza tra il valore minimo è sempre positiva poiché il blocco geopolimero diventa più freddo durante la notte. Tuttavia,  $\Delta T_{s\_DBmin}$  è sempre inferiore a  $\Delta T_{s\_CAmin}$ ; ciò è dovuto alle temperature più elevate del blocco geopolimero al di sotto del PCM che viene attraversato da un'aliquota del flusso termico durante il ciclo di scarica.

	PCM (GI2)		NO PCM (GI1)	
	$\Delta T_{s\_DBmax}$	$\Delta T_{s\_DBmin}$	$\Delta T_{s\_CAmax}$	$\Delta T_{s\_CAmin}$
14/06	-1.3	7.3	-3.1	8.9
15/06	-2.1	6.6	-6.7	9.3
16/06	-1.7	7.0	-4.4	9.4
17/06	-2.1	5.4	-5.0	7.4
18/06	-2.4	3.6	-5.6	6.1
19/06	-2.4	4.0	-5.8	6.5
20/06	-4.1	1.8	-7.6	5.0

**Tabella 21. Differenza di temperatura massima e minima sul blocco geopolymer: 14–20 giugno**

La Figura 27 mostra i flussi di calore per i punti di misura disponibili. Rispetto alle settimane precedenti, si notano picchi positivi più evidenti nel caso del modulo GI senza materiale a cambiamento di fase e questo perché la temperatura esterna è aumentata. Per tutti i giorni, l' $HF_B$  è attenuato e il suo andamento è più regolare; i valori variano tra  $-6.13$  e  $4.37 \text{ W/m}^2$  invece senza PCM  $-11.2$  e  $16.8 \text{ W/m}^2$ . Ad esempio, il 15 giugno, l' $HF$  diventa entrante contemporaneamente alle 8:00 ma alle 10:00 è  $3.07 \text{ W/m}^2$  nel pannello GI2 e  $10.4 \text{ W/m}^2$  senza PCM. In questo giorno il massimo per il settore senza PCM è stato di  $15.4 \text{ W/m}^2$  e si è verificato alle 17:30 invece nel settore con PCM era di  $3.24 \text{ W/m}^2$  alle 10:30. Considerando il 20 giugno, durante la tarda mattinata e il pomeriggio,  $HF_B$  variava tra  $0.62$  e  $5.63 \text{ W/m}^2$  mentre  $HF_A$  variava tra  $8.67$  e  $12.4 \text{ W/m}^2$ . Secondo i sensori interni (Figura 3.26(b)), gli andamenti sono comparabili e, come nella settimana selezionata di maggio, c'è una piccola differenza di circa  $1 \text{ W/m}^2$  in tutte le condizioni.

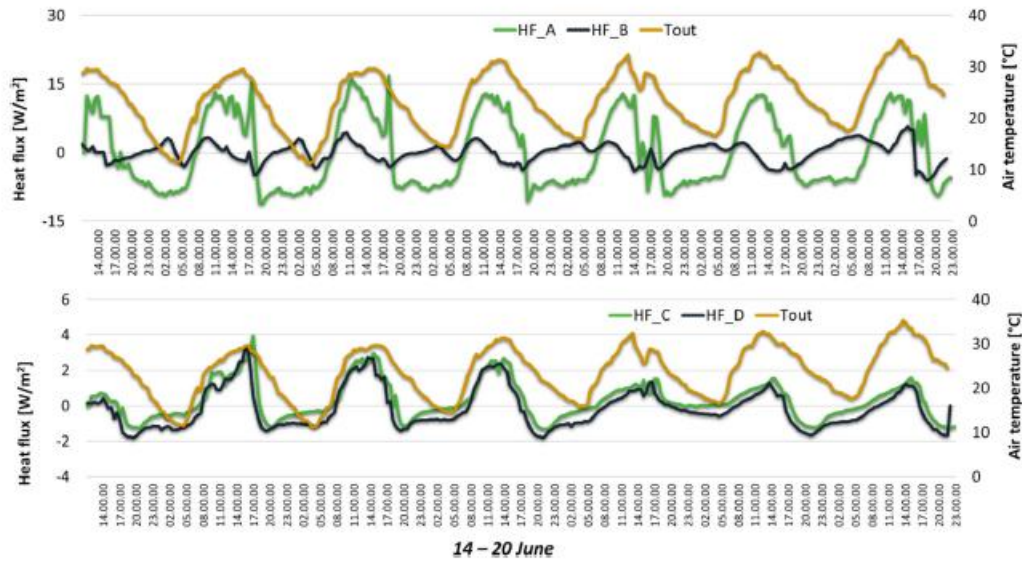


Figura 27. Flusso di calore, 14-20 giugno: (a) strato geopolimerico; (b) strato interno

La quarta settimana di luglio è stata riportata nella Figura 28; il 19 luglio è stato più freddo degli altri giorni, con  $T_{out}$  nell'intervallo 17.0–27.1 °C, cielo nuvoloso e radiazione solare massima monitorata sul muro di 167  $W/m^2$  alle 17:30. Durante questa giornata, la temperatura superficiale  $T_{s,T}$  ha raggiunto un valore massimo di 24.8 °C e potrebbe suggerire una mancata attivazione del processo di transizione. Ciò è parzialmente confermato nella Figura 26, perché le differenze calcolate sono comparabili, al mattino, ma a partire dalle 14:00 il modulo GI2 è caratterizzato da  $\Delta T_s$  più elevate e ciò è in accordo con l'analisi proposta a maggio. Il PCM è caratterizzato da un intervallo di attivazione più ampio.

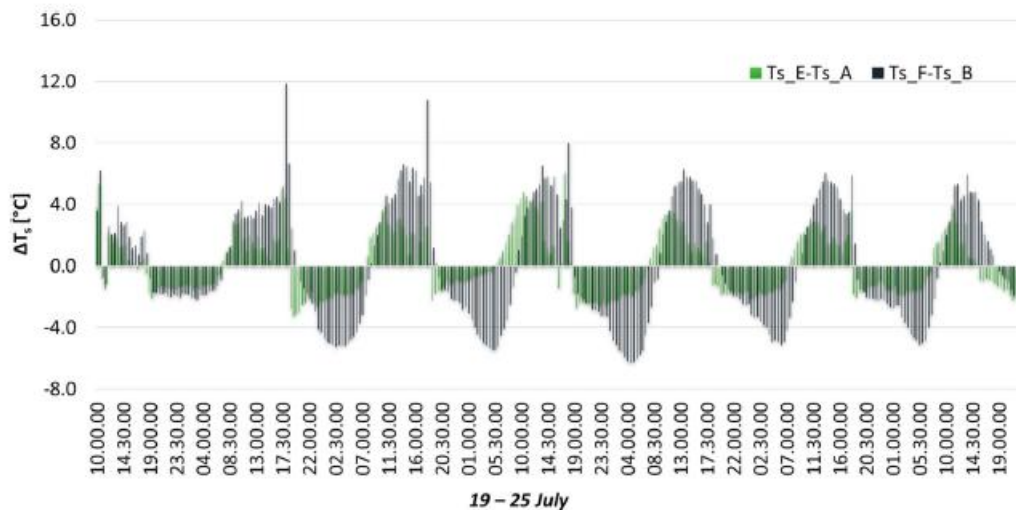


Figura 28. Differenza di temperatura superficiale sui pannelli GI: 19–25 luglio

Gli altri giorni sono stati caratterizzati dalle condizioni più calde, con temperature solitamente superiori a 33 °C nella tarda mattinata e nel pomeriggio e un valore di picco di 35.9 °C alle 14:30 del 21 luglio che ha determinato una  $T_{sol-aria}$  di 52 °C. L'attivazione del PCM consente di contenere il flusso di calore in arrivo con

$T_{s\_B}$  che aumenta solo fino a 27.7 °C; nel frattempo,  $T_{s\_A}$  era di 31.7 °C. Il ciclo di scarica inizia durante la notte e, grazie a questo fenomeno, lo strato interno rimane più caldo fino al mattino successivo, quando alle 9:00,  $T_{s\_B}$  era di 24.9 °C con  $T_{s\_T}$  pari a 24.2 °C e  $T_{s\_A}$  era di 22.3 °C.

La Tabella 22 riporta i valori estremi di  $\Delta T_s$  introdotti in precedenza. Anche in questo caso, il PCM contribuisce a ridurre la variabilità della temperatura durante il giorno, aiutando a prevenire lo stress termico per il pacchetto di parete.  $\Delta T_{s\_DBmax}$  e  $\Delta T_{s\_CAmax}$  sono abbastanza confrontabili quando l'attivazione è meno frequente (19 luglio) invece nel giorno più caldo diventano rispettivamente -6.6 °C e -11.7 °C. Ciò conferma l'effetto positivo del clima analizzato dei materiali a cambiamento di fase. L'efficacia del PCM è confermata anche da  $\Delta T_{s\_DBmin}$ ; in alcuni giorni la temperatura interna è sempre inferiore alla temperatura dello strato geopolimerico ( $T_{s\_B}$ ) e quindi si hanno valori negativi perché l'energia termica è immagazzinata dal PCM e c'è una condizione più stabile all'interno della stanza. Invece, per il modulo GI1  $\Delta T_{s\_CAmin}$  è sempre positivo come per le altre settimane analizzate.

	PCM (GI2)		NO PCM (GI1)	
	$\Delta T_{s\_DBmax}$	$\Delta T_{s\_DBmin}$	$\Delta T_{s\_CAmax}$	$\Delta T_{s\_CAmin}$
19/07	-1.6	3.0	-2.7	3.5
20/07	-4.0	3.0	-9.2	3.6
21/07	-6.6	1.6	-11.7	4.2
22/07	-7.8	-1.7	-10.9	2.4
23/07	-6.0	-0.3	-8.8	3.4
24/07	-7.8	-1.9	-9.9	1.7
25/07	-6.7	-2.1	-8.8	1.6

**Tabella 22. Differenza di temperatura massima e minima sul blocco geopolymer: 19–25 luglio**

La Figura 29 mostra i flussi di calore monitorati che confermano le osservazioni precedenti. Durante la giornata più fredda, il 19 luglio, c'è stata un'attivazione parziale del PCM e  $HF\_A$  e  $HF\_B$  sono confrontabili; tuttavia, durante il pomeriggio, il valore di picco senza il PCM è stato di 10.7 W/m<sup>2</sup> e del modulo GI2 è stato di 3.83 W/m<sup>2</sup>. Negli altri giorni, il flusso di calore è attenuato e c'è anche un ritardo tra le condizioni critiche esterne e  $HF\_B$ , con cicli di carica e scarica più evidenti. Nel giorno più caldo, il 21 luglio,  $HF\_A$  durante la tarda mattinata varia tra 7.13 e 14.7 W/m<sup>2</sup> mentre  $HF\_A$  non sale fino a 4.4 W/m<sup>2</sup>; quindi, c'è un possibile ciclo di scarica con una nuova transizione in serata, quando il valore di picco del flusso termico è 18.7 W/m<sup>2</sup> nel settore senza PCM. Per quanto riguarda i flussi termici indoor, nella Figura 29(b), gli andamenti sono confrontabili, con la stessa differenza sui casi preziosi.

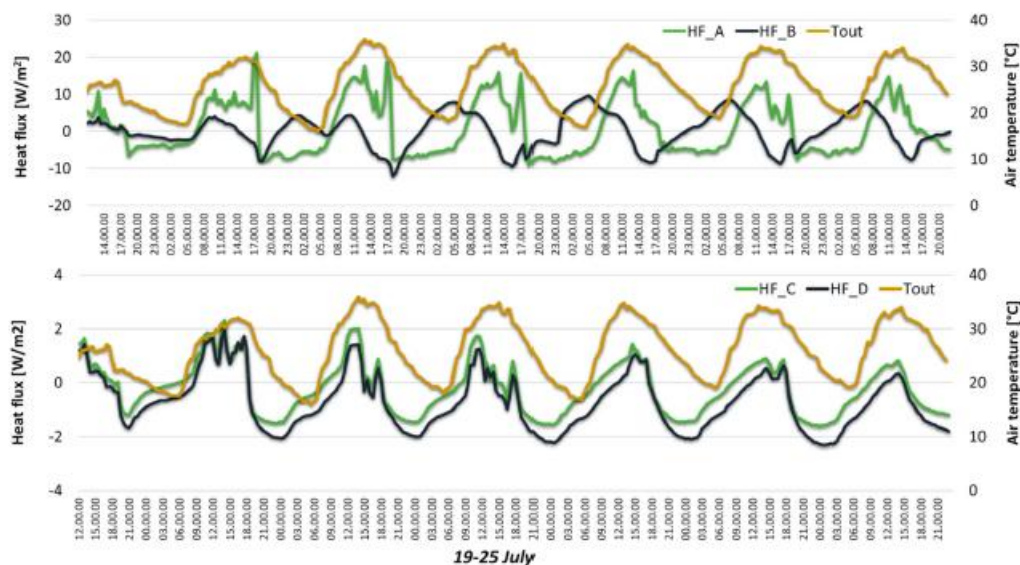
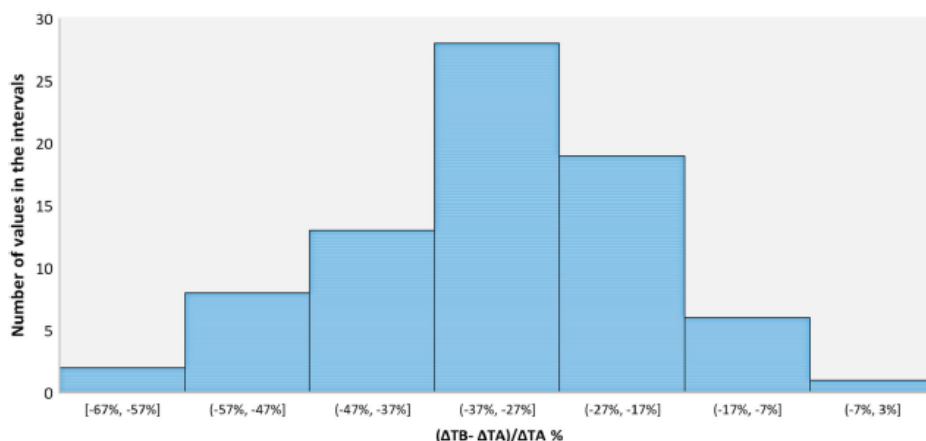


Figura 29. Flusso di calore, 19-25 luglio: (a) strato geopolimerico; (b) strato interno

### 3.2.3.3. Attenuazione dello stress termico

L'indice di attenuazione dello stress termico è stato introdotto per valutare l'attitudine del PCM installato a ridurre la variazione giornaliera della temperatura superficiale. Partendo dalla temperatura superficiale massima e minima monitorata, è stata calcolata la differenza; ad esempio,  $\Delta T_{s\_B}$  è la differenza tra la temperatura massima giornaliera e quella minima misurata sul blocco geopolimero e quindi dietro il PCM,  $\Delta T_{s\_A}$  è la differenza calcolata per il modulo senza PCM. Quindi, la variazione tra queste differenze è calcolata per stimare la riduzione dell'ampiezza dello stress termico. Più alto è questo valore, maggiore è la capacità del PCM di ridurre lo stress termico. I risultati dell'indice di stress termico sono riportati nella Figura 30 in termini di distribuzione e quindi di numero di valori in alcuni intervalli caratteristici di variazione. Globalmente, l'indice introdotto è più frequentemente nell'intervallo da  $-37\%$  e  $-17\%$ , solo a volte assume valori più estremi; tuttavia, i risultati cumulativi indicano che il PCM adottato è adatto alle condizioni climatiche di Benevento e lo strato geopolimerico è altamente protetto da una grande variazione di temperatura. La riduzione dello stress termico dovrebbe garantire una maggiore durata del materiale e il mantenimento delle caratteristiche prestazionali come il valore di conduttività.



**Figura 30. Distribuzione dell'indice di attenuazione dello stress termico sullo strato geopolimerico**

$\Delta T_{s\_A}$  varia da 3.9°C a 19.0°C con un valore modale vicino a 16°C; ciò indica che lo strato geopolimerico è soggetto a frequenti variazioni estreme di temperatura. Invece nel caso del modulo PCM, la differenza varia tra 2.5°C e 15.1°C, ma il valore modale è 7.2°C. L'indice introdotto è più alto a luglio quando c'è un'attivazione più frequente del PCM; considerando i giorni precedentemente selezionati, durante quello più freddo (19 luglio), l'indice di stress termico è -24%, mentre diventa -45% per quello più caldo (21 luglio). Maggio è caratterizzato da un valore comparabile dell'indice di stress termico, che di solito è inferiore al -30%; è del -28% nella giornata soleggiata dell'11 maggio ed è del -23% nella giornata nuvolosa del 14 maggio.

#### **3.2.3.4. Energia immagazzinata e rilasciata**

Per dare qualche indicazione in termini di riduzione del consumo energetico in un edificio reale, è stato calcolato e riportato, per tutti i periodi di monitoraggio, l'accumulo/rilascio di calore nella Figura 31.

L'accumulo/rilascio di calore sul lato ambiente è presentato nella prima parte della figura. Imita il guadagno/perdita termica tra l'ambiente interno e l'involucro, che è direttamente proporzionale al carico di raffreddamento dell'edificio. Globalmente, il modulo GI2 consente di aumentare la capacità di accumulo di energia di circa l'89%; nel frattempo, il PCM riduce di circa il 33% i guadagni di calore durante il periodo di monitoraggio. Pertanto, questa configurazione può far risparmiare il consumo energetico in un edificio reale. Considerando i risultati mensili, un grande contributo è dato a luglio, quando il rilascio di calore è ridotto del 48%.

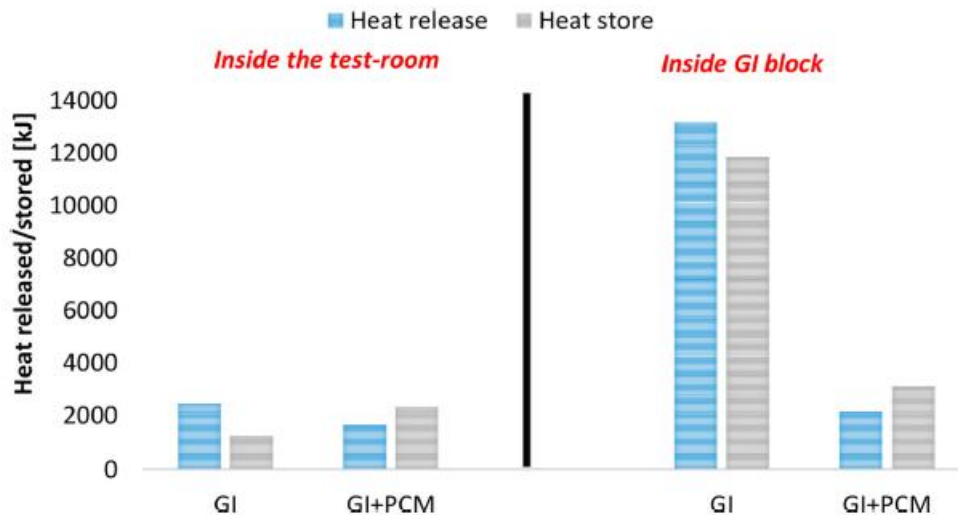


Figura 31. Accumulo/rilascio di calore tramite la superficie laterale dell'ambiente e lo strato di geopolimero

Nella seconda parte, c'è lo stesso calcolo ma considerando i flussi di calore monitorati sullo strato geopolymer, e quindi questi rappresentano l'accumulo/rilascio di calore nel modulo GI. Con questi dati, viene sottolineato il contributo del PCM; in effetti, l'energia immagazzinata durante la transizione di fase consente di ridurre i guadagni di calore di circa -84%, il che significa che lo strato dietro il PCM è rimasto più freddo per tutta l'estate. Questo fenomeno è particolarmente intenso durante giugno, quando il calore rilasciato è di 4393 kJ per il modulo GI1 e solo 21 kJ per il modulo GI2. Inoltre, l'energia immagazzinata è ridotta di circa -74%; ciò è dovuto alla quantità di energia immagazzinata durante la fase di transizione. Questa riduzione varia tra -68% (giugno) e -81% (luglio).

Questi dati confermano che i carichi di raffreddamento sarebbero effettivamente diminuiti quando il PCM con una temperatura di fusione nominale di 25 °C fosse posizionato sul lato esterno. Questo contributo è principalmente attribuibile all'utilizzo del calore latente. In effetti, lo spessore molto limitato del PCM è anche associato a un calore specifico elevato, il che assicura che tra i due moduli non vi sia una differenza sostanziale nella massa termica quando il PCM è in fase solida. Tuttavia, per migliorare l'analisi, un'ulteriore linea di ricerca sarà focalizzata sul confronto con il muro di riferimento tradizionale disponibile sul lato opposto o sotto la finestra. Il muro di riferimento è composto da blocchi di calcestruzzo cellulare aerato, pannelli isolanti sottovuoto, un'intercapedine d'aria, pannelli in fibrocemento e un rivestimento esterno in quarzo con elevata riflettività solare. Questo tipo di muro ha una massa termica inferiore rispetto al pacchetto di pareti proposto in questo articolo e con questo confronto, è più appropriato nella valutazione del contributo di massa termica dovuto all'adozione dei blocchi geopolimerici.

### 3.3. Componenti trasparenti innovativi

La progettazione degli elementi vetrati dell'involucro edilizio è un problema critico sia per gli edifici nuovi che per quelli ristrutturati, se si considerano gli effetti del cambiamento climatico e le condizioni di surriscaldamento previste. Le finestre influenzano il bilancio energetico dell'edificio e l'illuminazione naturale

influisce anche sul comfort visivo e sul consumo di illuminazione. Le finestre, infatti, influenzano fortemente le perdite termiche e gli apporti solari diretti con rischio di surriscaldamento [124]. L'attenzione della comunità scientifica è principalmente focalizzata sullo studio delle cosiddette finestre intelligenti o dinamiche. Queste soluzioni, rispetto alle tradizionali finestre statiche, hanno il potenziale per migliorare le prestazioni energetiche dell'edificio anche fronteggiando gli effetti del cambiamento climatico. Tuttavia, la diffusione degli smart glass richiede il superamento di alcune importanti criticità (costi elevati, velocità di commutazione, dominante cromatica e gamma cromatica) [125]. Invece, le soluzioni statiche si basano sul controllo esclusivo dell'apporto solare o della perdita di calore [126]. Sebbene nei nuovi edifici a energia quasi zero (nZEB) i sistemi di vetratura possano svolgere un ruolo fondamentale, non sono disponibili molti articoli su questo argomento per la progettazione di edifici resilienti a energia quasi zero (nZEB). Ad esempio, in [127] è stato osservato che la combinazione dell'installazione di pellicola solare con doppi vetri retrofit riduce il consumo energetico annuale HVAC fino al 20%, ma nelle attuali condizioni climatiche. Come riportato da D'Agostino et al. [128] la progettazione NZEB è diversa in uno scenario di cambiamento climatico rispetto a quanto stimato dalle condizioni meteorologiche attuali, con livelli di isolamento leggermente inferiori, involucro, tenuta all'aria e attrezzature migliorati, superfici di colore più chiaro con tetto e pareti a maggiore riflettanza e un migliore controllo solare dalle finestre (fattore G inferiore) per ridurre le esigenze di raffreddamento. Combinando queste misure, è stato dimostrato che un nZEB a Stoccolma potrebbe essere configurato come un edificio a energia positiva che mostra una riduzione del 40% della domanda di energia per riscaldamento e raffreddamento in uno scenario a lungo termine. In attesa di ulteriori progressi sulle vetrate dinamiche, la principale lacuna nella comunità scientifica su questo argomento è rappresentata dalla mancanza di studi sull'effetto a lungo termine delle soluzioni di progettazione statica. Questo tema riguarda l'analisi di resilienza di un nZEB poiché, alla luce del cambiamento climatico previsto, non è chiaro quale sia la migliore strategia progettuale da adottare per un nuovo edificio e per un intervento di riqualificazione energetica. La novità introdotta da questo studio è quella di fornire al progettista un criterio di analisi basato su un duplice punto di vista progettuale (nuovo edificio e riqualificazione energetica) per quanto riguarda gli effetti presenti e futuri di soluzioni vetrate efficienti. Con riferimento agli nZEB in un tipico clima mediterraneo, sono stati esaminati 8 tipi di vetrate in condizioni climatiche attuali e future. Sono state generate due proiezioni climatiche (anni 2050 e 2080) per Benevento, una piccola città nel sud Italia.

### **3.3.1. Impatto del sistema di vetratura sulla prestazione energetica di un edificio nZEB in scenari di cambiamento climatico**

Ai fini del presente lavoro, il caso di studio scelto è un edificio a energia quasi zero situato in un tipico clima mediterraneo. Nel dettaglio, l'edificio è stato costruito a Benevento (Figura 32a). È stato possibile fare riferimento a questo caso di studio poiché si tratta di un vero e proprio laboratorio sperimentale dell'Università degli Studi del Sannio a Benevento.

L'involucro edilizio è realizzato in legno lamellare incrociato con due strati di isolamento in fibra di legno a densità diversa; le finestre sono dotate di sistema a doppio vetro con intercapedine riempita di argon e rivestimento basso emissivo e telai in PVC.

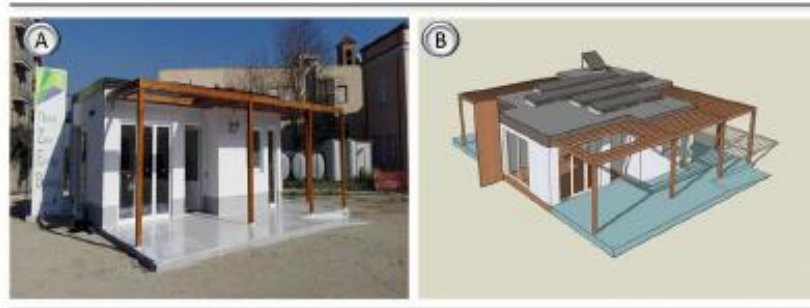


Figura 32. a) Studio di caso reale; b) Modello di simulazione dell'edificio

Una pompa di calore aerotermica può fornire riscaldamento, raffreddamento, acqua calda sanitaria e ventilazione meccanica, con un filtro interno e un recupero di calore termodinamico attivo.

Una descrizione dettagliata delle soluzioni tecniche è stata già proposta da Ascione et al. [129]. Gli autori hanno anche presentato la costruzione e la validazione del modello numerico (Figura 32b) dell'nZEB. In breve, Design Builder [32] è stato utilizzato per la costruzione grafica e poi è stato simulato con EnergyPlus [33]. L'output della simulazione è stato confrontato con i dati monitorati (sia i consumi che i parametri indoor) seguendo l'approccio proposto dalle Linee Guida M&V [31].

Per il caso di studio, un file meteo (.epw extension) è costruito direttamente dai dati meteorologici monitorati tra il 2015 e il 2020 dalla stazione meteorologica posizionata sul tetto della sala prove MATRIX ad un'altezza di circa 7.20 m dal livello del suolo [99], situata nel centro urbano di Benevento. Come riportato in [120], con questi dati è stato definito un anno meteorologico tipico (TMY) utilizzando il metodo Sandia [130]. Inoltre, sono definite due proiezioni climatiche future, a partire dal TMY. È stato utilizzato il generatore meteorologico *CCWorldWeatherGen* [131], messo a disposizione dall'Università di Southampton. Sono state generate una proiezione climatica a medio termine e un'altra a lungo termine, con riferimento ai periodi 2041-2070 ("anni '50") e 2071-2100 ("anni '80"). Rispettivamente, queste sono denominate CC\_MT e CC\_LT.

L'obiettivo principale del presente documento è valutare come l'edificio reagisce ai livelli attuali e futuri di radiazione solare variando il sistema di vetratura. Vengono esaminati otto modelli di vetratura, considerando sia vetri doppi che tripli con argon o aria, trasparenti o colorati e con comportamento statico o dinamico (Tabella 23).

ID	Descrizione
Caso base	Doppi vetri trasparenti a bassa emissività, 3/13/3, Argon: $U_g \approx 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $g=0.58$
D_C 3-13 Arg	Doppi vetri trasparenti, 3/13/3, Argon: $U_g \approx 2.56 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $g=0.76$
D_B 6-13 Arg	Doppi vetri colorati (blu), 6/13/6, Argon: $U_g \approx 2.51 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $g=0.49$
D_LESSC 6-13 Arg	Vetrocamera trasparente a bassa emissività e selettiva spettrale, 6/13/6, Argon: $U_g \approx 1.34 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $g=0.42$
D_CLI 3-13 Arg	Doppi vetri trasparenti a basso contenuto di ferro, 3/13/3, Argon: $U_g \approx 2.56 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $g=0.83$
T_C 3-13 Arg	Tripla vetro trasparente, 3/13/3/13/3, Argon: $U_g \approx 1.62 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $g=0.69$
T_LEC 3-13 Arg	Tripli vetri trasparenti a bassa emissività, 3/13/3/13/3, Argon: $U_g \approx 1.06 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $g=0.58$
T_LEFC 3-13 Aria	Tripla vetro basso emissivo con pellicola in poliestere (88), 3/13/3/13/3, Aria: $U_g \approx 1.30 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $g=0.58$
Termocromico	Tripla vetro termocromico 6/6/6/6/6, Aria: $U_g \approx 2.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ , trasmissione solare da 0.68 (a 24°C) a 0.33 (a 75°C)
Interno	Tenda a lamelle ad alta riflettività con programmazione stagionale
Esterno	Sporgenze orizzontali, 1.0 m di sporgenza

**Tabella 23. Variabili di progetto**

Innanzitutto, per i risultati con TMY, i confronti vengono effettuati in termini di fabbisogno energetico per riscaldamento e raffreddamento e variazione percentuale del consumo totale di energia primaria dell'edificio ( $\Delta EP$ ). Per i risultati con proiezioni climatiche future, i confronti dei fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento vengono proposti sulla base di una duplice visione del progettista e in particolare per la progettazione di un nuovo edificio a energia quasi zero ( $\Delta H_n$  e  $\Delta C_n$ ) e per un intervento di retrofit sullo stato di fatto ( $\Delta H_r$  e  $\Delta C_r$ ).

Nel primo caso, per ciascuna soluzione alternativa, vengono esaminati i fabbisogni energetici negli scenari di medio e lungo termine rispetto alla stessa configurazione edilizia simulata con TMY. Nel secondo caso, i confronti vengono effettuati rispetto allo stato di fatto (Caso Base) valutato nelle attuali condizioni climatiche (TMY).

### 3.3.2. Risultati

La Figura 33 mostra i risultati della simulazione con sostituzione del tipo di vetro nelle condizioni attuali (file TMY). In termini di richiesta di riscaldamento e raffreddamento energetico, le variazioni più importanti

rispetto al caso base (con vetrocamera basso emissivo) si osservano con le soluzioni identificate come D\_B 6-13 Arg, D\_LESSC 6-13 Arg e ThermoChromic.

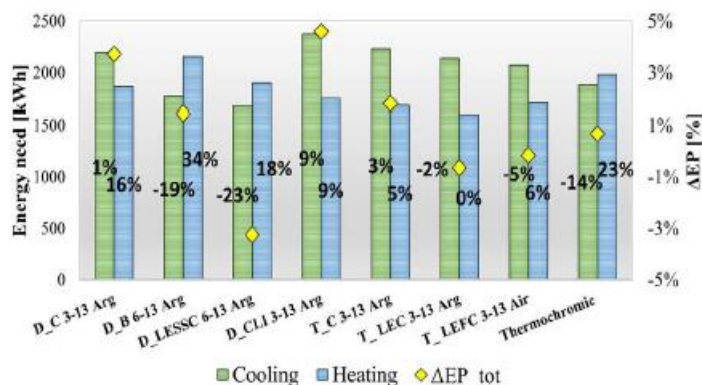


Figura 33. Risultati della simulazione energetica con file climatico attuale (TMY)

Come riportato nella Tabella 23, il vetro camera colorato (D\_B 6-13 Arg) è particolarmente opaco alla radiazione solare ( $g=0.49$ ). Inoltre, ha un valore di trasmittanza termica elevato, pari a  $2.51 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Pertanto, i ridotti guadagni solari in arrivo e il basso livello di isolamento termico causano il maggiore aumento percentuale del fabbisogno energetico per il riscaldamento (+43%). Rispetto al caso base, la variazione percentuale dell'energia primaria totale è trascurabile.

Il rivestimento termocromico cambia colore variando la sua struttura cristallina al di sopra di una particolare temperatura ambiente. Nel dettaglio, la trasmissione solare di questo vetro varia tra 0.68 a  $24^\circ\text{C}$  e 0.33 a  $75^\circ\text{C}$ . I risultati osservati mostrano che le superfici vetrate, nelle attuali condizioni climatiche (TMY), sono caratterizzate, a causa della loro esposizione, dalla radiazione solare in arrivo per molte ore anche nei mesi invernali. Di conseguenza, il rivestimento termocromico si attiva anche nel periodo di riscaldamento e ostacola l'accumulo solare. Il fabbisogno energetico per il riscaldamento aumenta del 29% e quello per il raffreddamento diminuisce del 14%. Queste variazioni percentuali hanno un effetto trascurabile sul fabbisogno energetico primario totale dell'edificio.

Il vetro doppio selettivo spettrale, a differenza del vetro termocromico, è una soluzione statica. Tuttavia, nelle condizioni climatiche in esame, la soluzione D\_LESSC 6-13 Arg minimizza il guadagno solare nel periodo di raffreddamento, poiché è caratterizzata dal valore inferiore del fattore solare ( $g=0.42$ ). Inoltre, la trasmittanza termica di questa soluzione è pari a  $1.13 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$  e comporta un minore aumento del fabbisogno energetico per il riscaldamento, rispetto al vetro termocromico. Rispetto al caso base, il fabbisogno energetico per il riscaldamento aumenta di circa il +18% e il fabbisogno energetico per il raffreddamento diminuisce del -23%. Di conseguenza, su base annua, si osserva una riduzione complessiva dell'energia primaria totale di circa il 3%.

Il vetro doppio a basso contenuto di ferro (D\_CLI 3-13 Arg) è un tipo di vetro ad alta trasparenza realizzato in silice con una quantità di ferro molto bassa. Questo tipo di vetro consente il passaggio della radiazione luminosa e i guadagni solari. Infatti, con l'applicazione di questo componente, si osserva il massimo incremento del fabbisogno energetico per il raffreddamento, rispetto al Caso Base (+9%). Allo stesso tempo, nonostante il

valore massimo del fattore solare ( $g=0.83$ ), questo vetro risente del suo basso livello di isolamento termico ( $U_g= 2.56 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ) e porta ad un incremento del 12% del fabbisogno energetico per il riscaldamento. Le soluzioni con triplo vetro non portano a significativi miglioramenti o peggioramenti del fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento. Tuttavia, la soluzione identificata come T\_LEC 3-13 Arg è l'unica che porta ad una variazione trascurabile del fabbisogno energetico per il riscaldamento, con una diminuzione percentuale del fabbisogno energetico per il raffrescamento, pari a circa -2%. In termini di energia primaria totale, il massimo incremento percentuale, rispetto al Caso Base, è stato osservato con la soluzione identificata come D\_CLI 3-13 Arg (+5%). Pertanto, le variazioni osservate sono comparabili ma con un impatto minore con i vetri basati sul controllo dei guadagni solari. Questo effetto, seppur minimo, è positivo in quanto la transizione verso un clima dominato dal raffreddamento è prevedibile per Benevento in futuro. In particolare, la resilienza dell'edificio in relazione a possibili futuri cambiamenti climatici è stata valutata sulla base di due punti di vista, sia per un edificio di nuova costruzione che per il retrofit energetico di un edificio esistente. Nel primo caso, per ciascuna soluzione simulata con CC\_MT (2050s) e CC\_LT (2080s), sono state valutate le variazioni percentuali dei fabbisogni energetici, rispettivamente  $\Delta H_n$  e  $\Delta C_n$ , rispetto alla stessa soluzione simulata con TMY. Nel secondo caso, tutte le soluzioni alternative simulate con le proiezioni climatiche future sono state confrontate con il caso base simulato con TMY.

I risultati sono mostrati in Figura 34 e Figura 35 rispettivamente per lo scenario a medio e lungo termine.

Dal punto di vista delle nuove costruzioni e della riqualificazione energetica, il cambiamento climatico favorisce la resilienza dell'edificio nella stagione invernale con tutti i tipi di vetrate considerati.

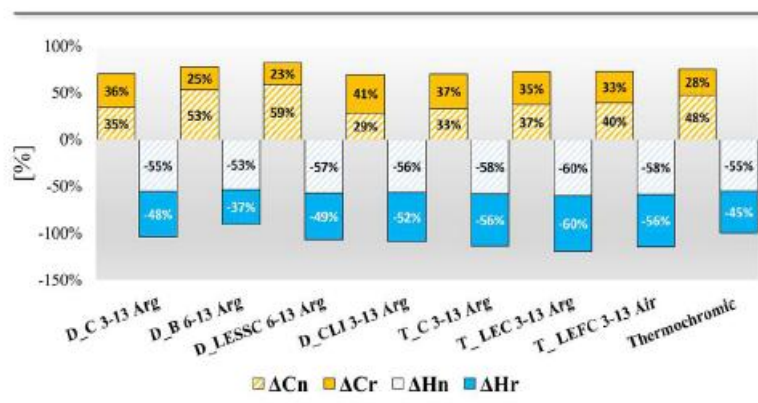


Figura 34. Variazioni percentuali del fabbisogno energetico per riscaldamento e raffreddamento - CC\_2050

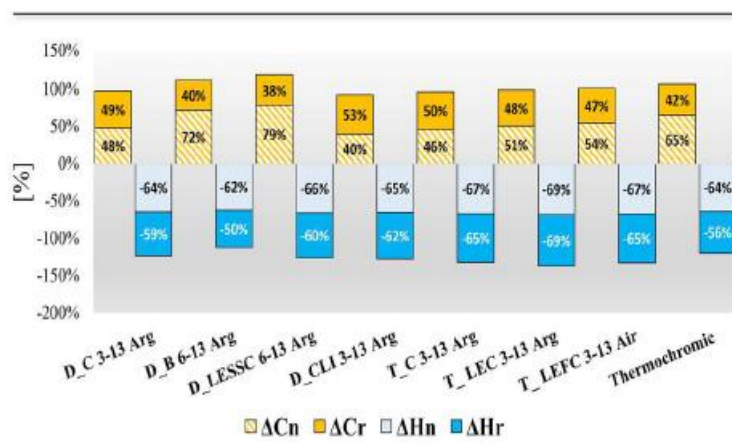


Figura 35. Variazioni percentuali del fabbisogno energetico per riscaldamento e raffreddamento - CC\_2050

Dal punto di vista delle nuove costruzioni e della riqualificazione energetica, il cambiamento climatico favorisce la resilienza dell'edificio nella stagione invernale con tutti i tipi di vetrate considerati.

In media, con CC\_MT e CC\_LT, sia  $\Delta H_n$  che  $\Delta H_r$  sono pari rispettivamente a -56% e -66%. Si possono fare alcune osservazioni interessanti in termini di fabbisogno energetico per il raffreddamento. Innanzitutto, nessuna soluzione ha un comportamento adattivo rispetto al cambiamento climatico. Tuttavia, sono stati riscontrati diversi effetti mitiganti dell'aumento del surriscaldamento interno. In questo senso, il vetro termocromico sorprende più di tutti. Questa componente dinamica, rispetto alle attuali condizioni climatiche (TMY), si dimostra non ancora in grado di migliorare l'ostruzione di ulteriori guadagni solari dovuti a livelli più elevati di temperatura e radiazione solare in futuro.

Inoltre, il progettista potrebbe fare scelte diverse a seconda del punto di vista adottato. Infatti, sebbene l'obiettivo sia quello di ridurre al minimo il fabbisogno energetico e, quindi, l'energia primaria totale dell'edificio, si possono fare diverse osservazioni in termini di resilienza delle soluzioni alternative proposte rispetto al cambiamento climatico previsto. Nella prospettiva di progettazione di un nuovo edificio,  $\Delta C_n$  è di circa +42% e +57% con CC\_MT e CC\_LT, rispettivamente. In particolare, l'aumento percentuale massimo è stato osservato con le soluzioni identificate come D\_LESSC 6-13 Arg e D\_B 6-13 Arg, con cui  $\Delta C_n$  è di circa 59% e 53%, rispettivamente, al 2050.

Come mostrato in Figura 36, questo risultato è confermato anche in termini di fabbisogno energetico per il raffreddamento ( $\Delta E_c$ ). Prendendo come riferimento l'orizzonte temporale al 2050, il valore massimo è osservato con il sistema selettivo spettrale (+995 kWh). Il secondo aumento più elevato è quello con la finestra colorata (+944 kWh), mentre l'aumento minimo è stato osservato con la soluzione denominata D\_CLI 3-13 Arg (+687 kWh). La spiegazione di queste osservazioni potrebbe risiedere nel fatto che le soluzioni ottimizzate per favorire i guadagni solari sono meno influenzate dalla transizione verso un clima dominato dal raffreddamento. Al contrario, il cambiamento climatico sembrerebbe penalizzare i vetri statici più opachi alla radiazione solare, come quelli selettivi spettrali e quelli bicolori. Questo risultato consente di comprendere l'importanza della resilienza degli edifici.

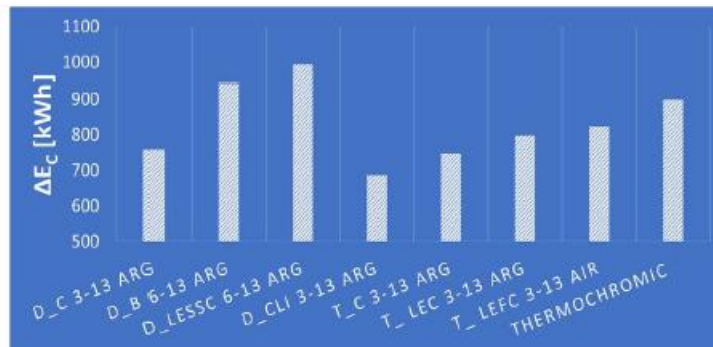


Figura 36. Differenza (kWh) nel fabbisogno energetico per il raffreddamento

Gli stessi risultati portano a conclusioni diverse quando l'obiettivo è la progettazione del retrofit energetico. Prendendo come riferimento il caso base simulato con TMY, con CC\_MT il fabbisogno energetico per il raffreddamento aumenta del 9% con D\_LESSC 6-13 Arg e del 10% con D\_B 6-13 Arg.

Queste sono le differenze percentuali più basse osservate. L'aumento percentuale massimo è stato osservato con doppi vetri a basso contenuto di ferro con basso contenuto di ferro. Lo stesso vale per CC\_LT. In questo caso il fabbisogno energetico per il raffreddamento aumenta del 15% e del 16%, rispettivamente con D\_LESSC 6-13 Arg e D\_B 6-13 Arg. Invece, con l'applicazione di D\_CLI 3-13 Arg l'aumento percentuale massimo della domanda di energia di raffreddamento diventa approssimativamente del 40%. Con riferimento all'involucro trasparente di un vero nZEB, la rilevanza globale dei principali risultati osservati è che l'analisi della resilienza dell'edificio rispetto al cambiamento climatico potrebbe non sempre favorire la scelta della soluzione più efficiente per ridurre la domanda di energia. Una soluzione più efficiente nelle attuali condizioni climatiche potrebbe avere prestazioni peggiori a causa del cambiamento climatico. Tuttavia, sebbene le legislazioni dei Paesi europei impongano l'obiettivo nZEB per i nuovi edifici, l'obiettivo di decarbonizzazione dipende principalmente dal retrofitting degli edifici esistenti. In questo senso, lo studio mostra che, se la soluzione è un vetro statico, gli effetti del cambiamento climatico potrebbero avere meno influenza sull'analisi delle migliori soluzioni. Tuttavia, sono necessari ulteriori progressi nella modellazione numerica dei vetri dinamici per poter effettuare confronti affidabili con le soluzioni statiche.

### 3.4. L'incidenza del sistema di illuminazione sulla sensazione di comfort termico: valutazione sperimentale

La transizione energetica pulita nell'Unione Europea passa attraverso il risparmio energetico negli edifici, considerando che sono responsabili del 36% delle emissioni di gas serra e del 40% circa del consumo energetico totale europeo [19]. Nel 2022 la riduzione dei consumi energetici negli edifici si fa sentire maggiormente a causa della crisi di approvvigionamento dei combustibili fossili. Ciò ha portato all'attuazione di una serie di misure sul risparmio energetico a livello legislativo. Ad esempio, in Italia per l'inverno 2022/2023 sono stati ridotti il periodo di accensione degli impianti di riscaldamento e gli orari di funzionamento giornalieri [132]. In alcune aziende o edifici pubblici, la temperatura di set point è stata abbassata di 1÷2°C rispetto alle stagioni passate. Secondo Hoyt et al. [133] la riduzione del set point di

riscaldamento da 21°C a 20°C potrebbe far risparmiare in media il 34% di energia in un edificio per uffici, considerando sette diverse aree climatiche. Ci si chiede, tuttavia, cosa può accadere alle condizioni di benessere degli occupanti dell'edificio. In particolare questo studio mira a verificare se le condizioni di comfort termoisometrico siano influenzate solo dalla temperatura ambiente di set-point o anche da altri fattori.

Buratti et al. [134] hanno condotto una campagna sperimentale e hanno dimostrato che l'importanza dei diversi aspetti ambientali era del 34.5% per il termico, del 35.7% per l'acustico e del 30.1% per la sensazione visiva. Mentre secondo i risultati condotti da Frontczak e Wargocki [135] il comfort termico è classificato come avente maggiore importanza rispetto al comfort visivo, acustico e alla qualità dell'aria. Frontczak et al. [136] hanno sviluppato anche uno studio basato su 2499 questionari su comuni abitanti di case. Le risposte hanno indicato che il controllo manuale dell'ambiente interno è altamente preferito per la soddisfazione del comfort, senza trovare una correlazione con l'illuminazione o altri parametri. Anche Ricciardi et al. [137] hanno sviluppato un questionario per valutare il comfort ambientale in 7 aule universitarie in Italia fornendo scale a 7 e 13 valori, scoprendo che il 55% degli occupanti ha sovrastimato le condizioni di comfort utilizzando la scala a 13 valori. Krüger et al. [138] hanno testato 16 uomini per 9 giorni totali in una camera climatica e hanno scoperto che nonostante le diverse configurazioni di luce naturale c'erano condizioni termiche stabili all'interno della stanza. Secondo Xue et al. [139] il comfort luminoso dipende dalle condizioni di luce naturale e anche dai modelli comportamentali. In generale, l'uso per molte ore al giorno di illuminazione artificiale potrebbe comportare una riduzione del comfort luminoso. Castaldo et al. [140] hanno evidenziato che i livelli di accettazione tra gli occupanti sono maggiori rispetto agli standard del punto di vista del comfort visivo e termico. Ad esempio, anche se i livelli di illuminazione erano inferiori a 413 lux il 74% degli occupanti ha dichiarato una sensazione visiva neutra. Considerando il comfort termico, il PMV calcolato, circa  $0.44 \pm 0.40$  è diverso dalla sensazione termica risultante dai questionari ( $0.10 \pm 0.11$ ). Gli autori concludono che questa discrepanza potrebbe dipendere dall'estetica piacevole e dall'architettura gradevole del posto di lavoro che aumentano la soddisfazione dei lavoratori. Lo studio [135] evidenzia come le caratteristiche degli utenti dell'edificio, come quella psicologica, quindi fattori estranei all'ambiente interno, possano influenzare la valutazione dell'ambiente interno del comfort. Andar-gie e Azar [141] hanno dimostrato che sia le condizioni ambientali come temperatura e umidità relativa, illuminamento e livello di rumore che le caratteristiche personali degli utenti influenzano il comfort degli occupanti e le capacità cognitive. Inoltre, fattori demografici come genere ed età sono determinanti nella metrica del comfort. Laurentin et al. [142] hanno dimostrato che le condizioni termiche non influenzano il comfort visivo.

Lo studio condotto da Fakhari et al. [143] ha coinvolto sei edifici per uffici e più di 100 persone, ha dimostrato che la correlazione tra livello di illuminazione e soddisfazione per il microclima ha un valore R2 molto basso e pari a 0.015. Gli autori concludono che il livello di illuminamento ha un impatto poco significativo sulla sensazione termica. Inoltre, concludono che le risposte degli occupanti alle condizioni di illuminazione variano in base all'età delle persone e non tanto in base al genere o all'ora del giorno. Nel presente lavoro, invece, a parità di illuminamento, gli autori vogliono trovare una correlazione tra diversi scenari di illuminazione e la sensazione termica espressa dagli utenti in relazione al microclima.

Dalla precedente panoramica emerge che:

- esiste una discrepanza tra la valutazione mediante misure standardizzate e quella fornita dagli utenti, poiché le norme non considerano anche fattori che entrano in gioco nella sensazione di comfort termico, come l'aspetto psicologico;
- si ha una sensazione diversa se l'utente può variare personalmente le condizioni termiche dell'ambiente circostante;
- i fattori fisiologici e psicologici possono influenzare la soddisfazione delle sensazioni di comfort termico umano;
- il sistema di illuminazione potrebbe interferire con la sensazione di comfort termico, dato che l'ambiente luminoso influenza il benessere psicofisico.

Questi aspetti, anche se indagati, non sono facili da riscontrare in un unico studio con misure in campo. Il presente lavoro si propone di analizzare come i possibili scenari di illuminazione possano influenzare la sensazione termica che l'occupante ha nei confronti del microclima, considerando anche diverse temperature ambiente di set-point. In questo contesto, il lavoro riguarda un'analisi sperimentale all'interno di un edificio a energia zero in scala reale situato a Benevento, nel sud Italia. L'edificio è stato progettato per essere la migliore pratica esistente di un nuovo modo di vivere, riducendo le richieste dei sistemi energetici attivi e coprendo l'intero fabbisogno energetico con un uso intensivo delle energie rinnovabili, con l'obiettivo di chiudere a zero il bilancio energetico annuale. La struttura è un prototipo di casa indipendente con una superficie abitabile di circa 70 m<sup>2</sup>. L'analisi è stata condotta per circa un mese tra gennaio e febbraio 2022.

Lo studio è condotto nel living lab concepito come casa per due studenti universitari. La zona termica in questione è la camera da letto, in cui uno studente trentenne svolge il lavoro di studio utilizzando il computer portatile nel pomeriggio. L'occupante è per lo più seduto a una scrivania di fronte alla finestra, dalle 15:00 alle 19:00.

Vengono monitorati tutti i parametri microclimatici al fine di definire il Voto Medio Previsto (PMV) e la percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) seguendo la norma internazionale ISO 7730 [101] che implementa il modello di Fanger. Vengono inoltre misurate le temperature superficiali e i flussi termici attraverso i vari componenti dell'edificio e le condizioni climatiche esterne. Per la valutazione dell'indice di comfort l'attività metabolica per tutti i giorni analizzati è posta pari a 70 W/m<sup>2</sup>. Considerando che l'uomo, per tutti i giorni di misurazione, ha indossato indumenti invernali costituiti da pantaloni, maglione, scarpe e calze, la resistenza termica degli indumenti è valutata pari a 0,135 m<sup>2</sup>K/W.

Lo studio prevede quindi l'analisi di diversi scenari di illuminazione (temperatura colore e tipologia di controllo) e diverse condizioni termiche interne. Nel dettaglio sono stati implementati:

- 2 diverse temperature colore per l'impianto di illuminazione;
- 2 diverse logiche di controllo;
- 3 diverse condizioni termiche.

La temperatura colore si riferisce alla temperatura colore calda o fredda delle luci, rispettivamente WARM o COLD. Anche le logiche di controllo utilizzate per l'impianto di illuminazione sono due, la prima, denominata

ON-OFF, in cui l'utente accende o spegne le lampade in base alle proprie esigenze; la seconda, denominata LUX, prevede l'accensione della lampada se il livello di illuminamento, sul piano di lavoro, è inferiore a 250 lux. Per quanto riguarda l'impianto di riscaldamento, vengono scelte tre temperature di set-point: 18°C, 20°C e 22 °C. Tutte le possibili combinazioni di questi scenari vengono implementate e analizzate una al giorno, per un totale di 12 giorni di misurazioni.

L'utente viene sottoposto ad un questionario in cui esprime, per ogni ora, la sensazione termica su una scala graduata di 7 valori, che vanno da molto freddo (-3) a neutro (0) a molto caldo (+3). L'occupante dell'edificio fornisce giudizi ad ogni ora, sia medie orarie che istantanee.

Questo studio è stato condotto presso il living-lab dell'Università del Sannio, edificio classificato come edificio a energia quasi zero (Figura 37a).



**Figura 37. Vista esterna (a) e planimetria (b) dell'nZEB**

L'edificio presenta una pianta pseudo-quadrata di circa 71 m<sup>2</sup> di pavimento condizionato, distribuiti su un piano (alto 3.6 m) con cucina, bagno, soggiorno e due camere da letto oltre a locale tecnico (Figura 37 b). Il rapporto finestrato/opaco è pari al 22.5% mentre il rapporto superficie-volume (S/V) è pari a 1.03 m<sup>-1</sup>. La struttura è caratterizzata da struttura in legno lamellare incrociato (X-LAM) con isolamento in fibra di legno (9.5 cm per la parete esterna e 12 cm per la copertura). La trasmittanza termica per pareti esterne, tetto e pavimento è rispettivamente di 0.17 W/m<sup>2</sup> K, 0.23 W/m<sup>2</sup> K e 0.25 W/m<sup>2</sup> K. Le finestre sono in vetrocamera riempite di Argon e con telaio in PVC. L'nZEB è dotato di una pompa di calore aria-aria per riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria e servizi di ventilazione meccanica, con filtrazione elettronica. La potenza termica nominale è di 3.18 kW e quella di raffrescamento di 2.14 kW. Il sistema HVAC è integrato con un campo geotermico verticale (2 m sottoterra) e un collettore solare termico evacuato (2.16 m<sup>2</sup>). Sul tetto è presente anche un impianto fotovoltaico (5.3 kWp) con accumulo elettrico di 6.5 kWh.

I quattro parametri ambientali sono stati misurati mediante una stazione microclimatica portatile "400 IAQ and comfort kit" del produttore Testo (Figura 38a). È composta da un datalogger (Figura 38 b) e sensori di: temperatura dell'aria (chiamata T<sub>a\_in</sub>), umidità relativa (chiamata RH<sub>in</sub>), velocità dell'aria (chiamata AS) e temperatura del globo (T<sub>g</sub>). Le principali caratteristiche tecniche sono riportate nella Tabella 24.

La temperatura radiante media (T<sub>r</sub>) è calcolata in base a T<sub>g</sub> e T<sub>a\_in</sub> secondo l'equazione (3.5).

$$T_r = \sqrt[4]{(T_g + 273)^4 + \frac{0.25 \cdot 10^8}{\varepsilon_g} \sqrt{\frac{|T_g - T_{a\_in}|}{D}} (T_g - T_{a\_in})} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.5)$$

dove:

D = diametro del globo (150 mm);

$\varepsilon_g$  = emissività del globotermometro (0,95);

$T_g$  = temperatura del globotermometro,

$T_{a\_in}$  = temperatura dell'aria.

Il periodo di monitoraggio è andato dal 18 gennaio al 12 febbraio 2022 con un passo di acquisizione di 1 min. Sono implementati diversi scenari termici e di illuminazione interni come descritto nella sezione metodologica. Nelle Figure 3.37 b e c è mostrato lo scenario di illuminazione CALDO e FREDDO. Lo studio considera solo un singolo uomo in una singola stanza quindi può portare a un campione molto piccolo che non consente conclusioni precise, ma è uno studio preliminare che verrà ripetuto in futuro per altri utenti e altre stanze.

Sonda	Range	Precisione
$T_{a\_in}$	0 ÷ 50 °C	±0.5°C
RH <sub>in</sub>	5 ÷ 95%	±3% (10 ÷ 35% RH); ±2% (35 ÷ 65%RH); ±3% (65 ÷ 90% RH)
AS	0 ÷ 5m/s	± (0.03 m/s +4% di m.v.)
$T_g$	0 ÷ 120°C	Classe di tolleranza 1, EN 60584-2

Tabella 24. Dati tecnici dei sensori utilizzati

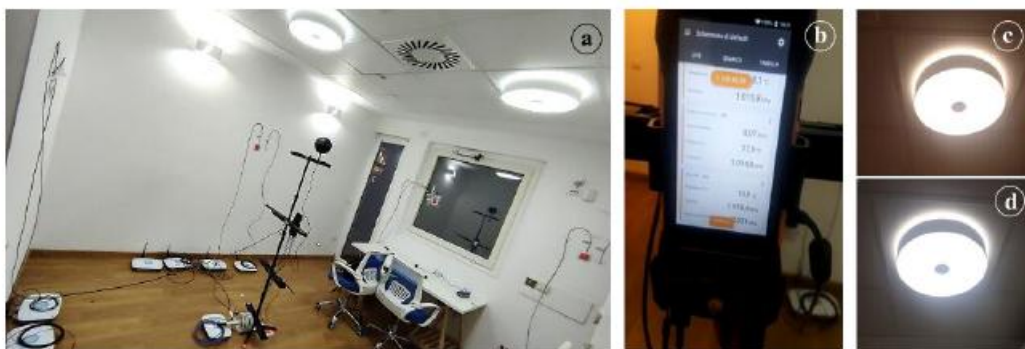


Figura 38. Posizionamento della stazione microclimatica (a); datalogger (b) lampada con temperatura colore calda (c) e fredda (d)

### 3.4.1. Risultati

La Figura 39a raffigura la valutazione media oraria del microclima fornita dall'utente, con punti rossi, e il PMV calcolato tramite misure di campo, con barre verdi. L'area evidenziata in verde chiaro è l'intervallo in cui, secondo la norma UNI EN 7730, l'occupante avverte una sensazione di comfort termico neutro. Corrisponde a  $-0.5 < PMV < 0.5$ , con un valore massimo di PPD del 10%. In generale, si può notare che i voti forniti dall'utente

sono superiori a quelli calcolati con il modello numerico, ovvero l'utente giudica l'ambiente più caldo di quanto descritto se si utilizza un modello di comfort termico. Per i primi quattro giorni di prova, quando il set-point è 18 °C, per il 75% delle ore i valori di PMV sono inferiori a -0.5 ("abbastanza freddo") mentre l'occupante valuta l'ambiente prevalentemente come termicamente neutro. Ciò dimostra che una temperatura dell'aria interna inferiore a 20°C, in questo caso pari a 18°C, può garantire il comfort termico per l'occupante, e questa condizione non è sempre descritta da modelli di comfort come quello di Fanger. Per i quattro giorni in cui il set point è 20°C, il PMV è all'interno della zona di neutralità termica per l'80% delle ore, mentre l'occupante esprime di sentirsi "abbastanza caldo" o "caldo" per il 55% delle ore. Infine, per gli ultimi quattro giorni analizzati, i valori del PMV per tutte le ore sono all'interno della zona di comfort, mentre l'occupante esprime "abbastanza caldo" o "caldo" per il 75% delle ore.

Per quanto riguarda l'incidenza degli scenari di illuminazione, deve essere valutata su giudizi soggettivi, poiché il modello di comfort numerico non ne tiene conto. Considerando la temperatura di colore, impostando una logica di controllo, ad esempio ON-OFF, e con lo stesso set-point, variando solo la luce di colore, il voto termico non cambia, tranne che per un'ora del secondo giorno, quando si sente più freddo con luce fredda. Nel caso della logica LUX si possono notare alcune piccole differenze tra CALDO e FREDDO, in particolare sembrerebbe che l'utente senta più freddo quando la luce è calda. Ad esempio, durante i giorni con LUX 20°C variando la temperatura di colore da CALDO a FREDDO la valutazione aumenta di un'unità verso la sensazione più calda per l'80% delle osservazioni e di due unità per il 20% delle osservazioni. Questo comportamento si riscontra anche nel caso di LUX 22°C ma solo per le prime due ore di analisi, dopodiché una luce più fredda dà una sensazione termica più fredda. L'incidenza della temperatura di colore nei giudizi orari medi dell'utente non può essere dedotta in modo chiaro e inequivocabile. Considerando invece l'incidenza della logica di controllo, a parità degli altri parametri, non si ha una risposta univoca nel voto termico, che presuppone nessuna incidenza della logica di controllo luci sulla sensazione termica verso l'ambiente.

Considerando la valutazione istantanea (Figura 39b), quando la logica è ON-OFF a 20°C e 22°C variando la temperatura colore, il giudizio non cambia mentre a 18°C, per il 40% delle osservazioni, l'utente sente più freddo con luci fredde. Nel caso della logica automatica, invece, sente più caldo con luci fredde, a 18°C e 20°C, mentre più freddo con luci fredde a 22°C. Non è possibile identificare una risposta univoca variando i parametri di illuminazione ma se l'occupante si trova a una temperatura più bassa e deve scegliere quando attivare il sistema di illuminazione, è maggiormente influenzato dalla temperatura colore nella valutazione istantanea della sensazione di comfort termico. Fissando invece la temperatura colore, ad esempio WARM e variando la logica di controllo, si nota che a 18°C con la logica LUX si sente più freddo rispetto alla logica ON-OFF, a 20°C non cambia nulla e a 22°C si ha anche una sensazione più fredda. Impostando lo scenario COLD a 18°C e 20°C l'utente sente più freddo con ON-OFF, mentre a 22°C più freddo con LUX. Si potrebbe ipotizzare che a basse temperature, se si hanno luci calde, è preferibile che siano controllate dall'utente, mentre se si hanno luci fredde, siano controllate in automatico.

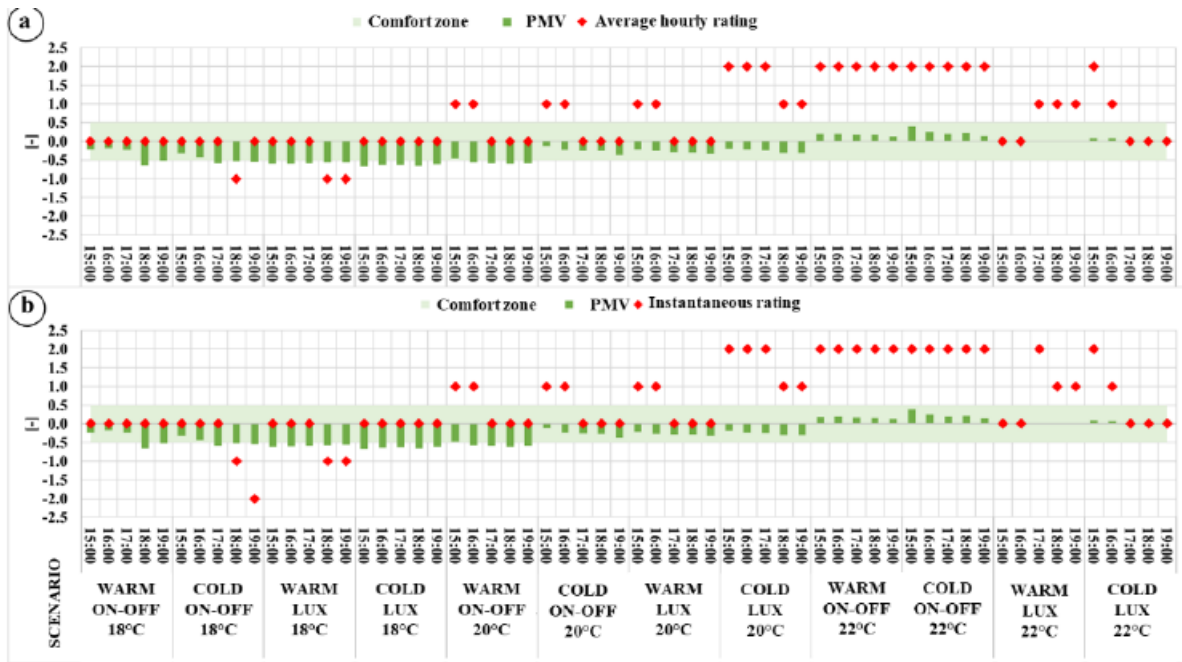


Figura 39. Calcolo del PMV e media oraria del voto degli occupanti (a) e istantanea (b)

## **CAPITOLO 4: La sostenibilità energetica e il management delle strutture ospedaliere**

### **4.1. L'importanza di investire nella riqualificazione energetica degli ospedali: risultati di un caso studio in un clima mediterraneo**

La crisi energetica e i conflitti internazionali hanno portato a notevoli ripercussioni in diversi settori, mettendo in primo piano questioni come la transizione energetica e il risparmio energetico. Come è noto, la riduzione del fabbisogno energetico operativo nel settore edilizio costituisce una priorità di estrema attualità [144]. Tra gli altri motivi, gli ospedali sono ad alta intensità energetica perché funzionano tutto il giorno per tutto l'anno per garantire un servizio ottimale ai pazienti e richiedono tre volte più energia rispetto ad altri edifici pubblici [145]. Ad esempio, Shi et al. [146] hanno stimato un consumo energetico medio di 180 kWh/(m<sup>2</sup> anno) nella regione fredda della Cina. Tutto sommato, come affermato da de Oliveira et al. [147], la gestione dell'energia può favorire l'allineamento del settore sanitario con gli obiettivi di sostenibilità. Tuttavia, come riconosciuto da Wang et al. [148], i principali ostacoli al miglioramento dell'efficienza energetica di questo settore sono gli scarsi incentivi economici, la mancanza di tecnologie adeguate, la mancanza di leggi e di regolamenti applicabili.

Fondamentalmente, l'elettricità viene utilizzata per alimentare diverse apparecchiature mediche, per sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC), per l'illuminazione [149], per il funzionamento dei sistemi di sicurezza e per l'acquisizione di dati elettronici. Inoltre, la domanda di energia termica è principalmente associata alla produzione di acqua calda sanitaria e a tutti i servizi connessi, come sterilizzazione, lavanderia e cucine.

Ciascuna struttura può includere varie forme di apparecchiature mediche che incidono in modo diverso sul consumo energetico. In effetti, le sale operatorie e le apparecchiature a raggi X e tomografiche ad alta intensità energetica richiedono più energia rispetto alle sale di reparto e agli ambulatori [150]. Come notato da Szklo et al. [151], i tempi e la tipologia dei servizi medici e l'efficienza delle apparecchiature mediche influenzano la qualità energetica complessiva dell'edificio. Tuttavia, García-Sanz-Calcedo et al. [152] hanno riscontrato che il numero di dimissioni annuali, il numero di operazioni di emergenza e il numero di ricoveri sono strettamente correlati al consumo energetico. Come sottolineato da Gonzalez et al. [153], esiste anche una dipendenza dall'intera superficie dell'edificio, dal numero di letti e dal numero di dipendenti dell'ospedale. Secondo Hwang et al. [154], in uno studio su quattro ospedali di Seoul con diverse dimensioni ed età di costruzione, l'area dell'edificio, le principali configurazioni delle apparecchiature e il loro rapporto di utilizzo influenzano fortemente il fabbisogno energetico. Inoltre, come riscontrato da Zini et al. [155], per un tipico clima italiano, il consumo HVAC è principalmente guidato dalla temperatura dell'aria esterna al fine di soddisfare rigorosi standard di sicurezza e comfort. Un metodo di controllo predittivo basato sui dati [156] per la gestione intelligente dei sistemi HVAC può contribuire ad aumentare l'efficienza, riducendo i costi energetici. Il tipico sistema HVAC si basa su una combinazione di più pompe di calore elettriche e unità di trattamento dell'aria [16]; tuttavia, è possibile trovare altri sistemi [157], come il flusso di refrigerante variante (VRF), i sistemi

combinati di calore ed elettricità (CHP), gli scambiatori di recupero del calore di scarto e la tecnologia di recupero del calore e del vapore. Come riportato da Fieheld et al. [158], nel Regno Unito, i sistemi HVAC rappresentano il 44% dell'energia totale utilizzata negli ospedali e potrebbero essere applicate molte misure di efficienza. Ad esempio, in Malesia [159], molte strutture sanitarie hanno sostituito i loro refrigeratori con compressori frigoriferi a cuscinetti magnetici.

D'altro canto, anche il ruolo dell'involucro edilizio è molto importante [160] per il controllo passivo delle condizioni interne; infatti, la riduzione delle perdite di calore durante l'inverno, così come degli apporti solari durante l'estate, consente di ottimizzare la prestazione energetica complessiva dell'edificio. A questo proposito, Cesari et al. [161] hanno analizzato il ruolo delle finestre in diverse stanze con diversi orientamenti in un ospedale situato a Bologna (Italia); hanno dimostrato che l'adozione di vetrate adeguate può ridurre il fabbisogno energetico, ma potrebbe, allo stesso tempo, portare ad un aumento dei servizi di illuminazione. Tuttavia, come affermato da Ascione et al. [162], la ristrutturazione dell'involucro edilizio è sempre conveniente quando l'obiettivo è il miglioramento del comfort interno e la riduzione del fabbisogno e dei costi energetici.

Inoltre, Billanes et al. [163] hanno suggerito di utilizzare fonti di energia rinnovabili. A questo proposito, Peirow et al. [164], per un ospedale situato a Teheran con oltre 250 posti letto, hanno trovato una soluzione ottimale nell'installazione di un sistema fotovoltaico con un livello di potenza di picco di 350 kW, una turbina eolica di circa 25 kW e, per gestire l'incertezza delle fonti rinnovabili, un generatore diesel (600 kW) e una batteria con una capacità di 100 kWh. Allo stesso modo, Kassem et al. [165], per un ospedale situato a Lefkosa, hanno scoperto che una configurazione fotovoltaica ottimale (angolo di azimut di 180° e angolo di inclinazione di -35°) porta a una buona fattibilità economica, con un periodo di ammortamento di quasi tre anni. Kahwash et al. [166], in conformità con gli obiettivi del National Health Service (Regno Unito) di diventare un fornitore di assistenza sanitaria a zero emissioni nette, hanno studiato l'installazione di un sistema ibrido di energia rinnovabile. I risultati hanno mostrato un risparmio di circa 2000 tonnellate di CO<sub>2</sub> in 25 anni. Buonomano et al. [167] hanno proposto, per quanto riguarda la ristrutturazione energetica di un ospedale universitario di Napoli, l'adozione di un sistema di riscaldamento e raffreddamento solare basato su un campo di collettori fotovoltaici a concentrazione termica accoppiati a un refrigeratore ad assorbimento LiBr-H<sub>2</sub>O monostadio e serbatoi di accumulo termico. Per il clima della Finlandia, secondo i calcoli di Kantola et al. [168], per l'ospedale di Espoo le soluzioni più convenienti sono l'energia proveniente dal biogas, il riscaldamento a cippato di legno e il riscaldamento geotermico. Inoltre, Moon et al. [169] hanno studiato l'uso di un sistema di pompa di calore geotermica per un ospedale situato a Busan, nella Repubblica di Corea.

Infine, è interessante notare anche che, durante le emergenze, gli ospedali possono necessitare di grandi quantità di ossigeno. Pertanto, Izadi et al. [170], per un caso studio a Teheran (Iran), hanno progettato un sistema con una potenza fotovoltaica di circa 976 kW con celle a combustibile da 179 kW e un elettrolizzatore da 171.2 kW; questo soddisfa il fabbisogno energetico nel 76% dei casi e, allo stesso tempo, garantisce una produzione annua di 67833 capsule di ossigeno.

Le ricerche disponibili evidenziano diversi aspetti che devono essere presi in considerazione nella riqualificazione energetica degli ospedali. Innanzitutto, l'analisi dei fatti richiede la diversificazione dei vettori energetici per ciascun utilizzo, con ispezioni e misure accurate al fine di identificare specifiche misure di efficienza e valutare il loro impatto sugli aspetti considerati (climatizzazione, apparecchiature, illuminazione, qualità dell'aria e così via). Tuttavia, mancano metodi per i principali operatori di mercato, dirigenti ospedalieri e progettisti in questo tipo di analisi. Inoltre, le informazioni raccolte possono portare alla definizione del modello numerico del sistema edificio-HVAC, ma in questo caso non ricorre spesso la procedura di validazione o calibrazione. Che tipo di valori di riferimento possono essere utilizzati? Che tipo di tolleranza si può assumere nel confronto tra consumi simulati e valori di fatturazione energetica? In sintesi, la letteratura riconosce grandi potenzialità in termini di risparmio energetico, ma non esiste un metodo completo che possa portare alla progettazione di ristrutturazioni. D'altro canto, la selezione e la valutazione delle misure di efficienza devono tenere conto di diversi obiettivi: riduzione dell'energia e dei costi, miglioramento del comfort termico interno, elevati livelli di qualità dell'aria, potenza di illuminazione necessaria per le attività mediche e limitazione dell'inquinamento.

Qui viene discussa la principale novità dello studio. Viene proposto e applicato a un caso studio un metodo multifase completo per la progettazione di misure di efficienza energetica per gli ospedali in un clima mediterraneo. Tale metodo consiste in un audit energetico dettagliato tramite rilievi in situ, misure prestazionali dell'involucro edilizio e dei sistemi HVAC, misure ambientali indoor e un'analisi dettagliata di tutti i vettori energetici. Lo scopo è quello di effettuare uno studio dettagliato del bilancio energetico di ciascuna utenza ospedaliera e un confronto con i valori di riferimento. Poi, vengono proposti numerosi indici per la valutazione economica, ambientale ed energetica delle misure di efficienza energetica.

#### **4.2. Diagnosi energetica e riqualificazione di edifici ad alta intensità: metodo**

Il primo passo dell'approccio proposto è un audit energetico. Al fine di simulare prestazioni energetiche affidabili, il modello numerico del sistema edificio-HVAC può essere definito utilizzando i dati acquisiti da rilievi in situ, interviste con gestori e occupanti e misurazioni sul campo [102]. Questo processo deve rappresentare il consumo energetico effettivo e le condizioni interne dell'ospedale in esame.

Per questo motivo la caratterizzazione dell'involucro edilizio deve essere eseguita per ottenere le caratteristiche geometriche e termofisiche di tutti gli elementi. In questo caso è rilevante la misura della trasmittanza termica secondo la norma ISO 9869 [171]. Inoltre, per ciascun elemento rappresentativo, è necessario individuare e caratterizzare la forma e/o la struttura dei singoli ponti termici. Ciò può essere ottenuto utilizzando la termografia a infrarossi secondo la norma EN 13187 [172].

La peculiarità degli ospedali è rappresentata dal gran numero di zone termali con diversi controlli ambientali richiesti; pertanto, l'energia richiesta dovrebbe essere basata su una rappresentazione schematica di tutte le zone termiche raggruppate in base alle loro attività e al tipo di sistema HVAC. Dovranno essere determinati i dati principali delle apparecchiature installate (numero, potenza, ecc.) e i relativi orari tipici di utilizzo, tassi

di occupazione e tempistiche rispetto ai sistemi, nonché i dati sugli eventuali emettitori installati, comprese le informazioni relative ai sottosistemi di generazione per cui vengono serviti.

Considerando il ruolo che la qualità indoor può svolgere nell'efficienza delle attività mediche e del processo di guarigione, deve essere implementato un piano di monitoraggio per valutare le variabili ambientali interne utili a caratterizzare il comfort termo-igrometrico e la qualità dell'aria. Secondo la norma UNI EN ISO 7730 [101], i principali parametri da monitorare sono la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la velocità dell'aria e la temperatura globale. Questi valori consentono di calcolare il PMV (voto medio previsto) e il PPD (percentuale prevista di insoddisfatti). Altro parametro fondamentale da monitorare è la concentrazione indoor di CO<sub>2</sub>, che può essere correlata alla classe di qualità dell'aria per edifici con e senza ventilazione meccanica controllata [28].

Un audit HVAC richiede inoltre che l'intero sistema sia suddiviso nei suoi diversi sottosistemi: emissioni, regolazione, distribuzione, stoccaggio e generazione. Questa procedura aiuta a determinare le perdite e l'efficienza di ciascun sottosistema, nonché il suo impatto sulla prestazione energetica totale. A questo scopo, diverse misure che utilizzano sub-contatori possono aiutare a costruire un bilancio energetico dettagliato.

Tutti i dati acquisiti possono essere utilizzati per definire il modello dell'edificio, avviare il processo di calibrazione e, quindi, il confronto dei risultati della simulazione con i dati sperimentali, valutando gli scostamenti nei risultati e il grado di incertezza. Nell'ambito dell'audit energetico, la raccolta dei valori storici dei consumi energetici prevede l'identificazione delle principali fonti energetiche e l'analisi dei contratti di fornitura su un periodo statisticamente significativo, solitamente tre anni.

Successivamente, la calibrazione del modello numerico può essere effettuata utilizzando il fattore di congruenza (FC), definito come il rapporto tra i consumi medi delle bollette degli ultimi tre anni e quelli stimati tramite il programma di calcolo. In base alla deviazione percentuale, il modello è caratterizzato da:

- alta congruenza, quando la deviazione non supera il 5%;
- congruenza media, quando la deviazione non è superiore al 10%;
- bassa congruenza quando la deviazione non è superiore al 15%;
- non conformità, quando la deviazione è superiore al 15%.

La seconda fase dell'approccio proposto prevede la valutazione della qualità energetica ed ambientale dell'edificio e l'analisi delle possibili misure di efficienza. Questa fase parte dall'analisi della qualità dell'ambiente indoor, rilevando fenomeni di disagio o errate strategie di gestione.

Negli edifici serviti da un sistema di ventilazione meccanica per riscaldamento e/o raffrescamento è stato sviluppato un metodo per individuare il range di accettabilità da utilizzare per la valutazione del comfort secondo le norme della EN 16798. Tali norme classificano gli ambienti adibiti al comfort in quattro categorie. Tra queste, la categoria I (alto livello di aspettativa) richiede un PPD inferiore al 6% e un PMV in un intervallo di 0.2. Allo stesso modo, considerando la classificazione in base alla qualità dell'aria, per la Categoria I la concentrazione di CO<sub>2</sub> di progetto superiore alla concentrazione esterna è di 550 ppm.

Un ulteriore aspetto fondamentale è la valutazione degli indicatori di prestazione energetica e il loro confronto con benchmark di settore. Infatti, il confronto dei consumi energetici con altre aziende del settore è un potente

strumento per valutare le prestazioni e migliorare l'efficienza energetica analizzando le tendenze del consumo energetico e dei costi energetici.

A partire da queste valutazioni è possibile progettare misure di efficienza valutabili per scopi multi-obiettivo, come la minimizzazione degli indici, dei costi energetici e ambientali (principalmente quello operativo). Il risparmio ottenibile in termini di energia primaria e di emissioni evitate può essere calcolato in base alla differenza tra la ristrutturazione proposta e lo stato di fatto. L'analisi economica è finalizzata a valutare l'effettiva convenienza degli interventi proposti, che devono garantire, grazie al risparmio energetico, un ritorno economico dell'investimento in tempi accettabili. L'analisi economica può basarsi sulla norma UNI EN 15459-1 [173]. In particolare, possono essere considerati il periodo di ammortamento semplice (SPB), il valore attuale netto (NPV), il tasso di rendimento interno (IRR) e l'investimento iniziale (I0).

#### 4.2.1. Caso studio sull'audit energetico

Il caso studio considerato è la “Clinica Ruesch”, un ospedale privato nel centro di Napoli (Sud Italia) in una posizione verde, tranquilla e molto bella (Figura 40). Il clima è mediterraneo, con inverni miti e piovosi ed estati calde e soleggiate. La temperatura media giornaliera varia dai 9°C di gennaio ai 26°C di agosto. Secondo la classificazione della UNI 10349-parte 2 [174], Napoli è all'interno della zona climatica C (1034 gradi giorno di riscaldamento) e i valori di progetto, come temperatura esterna e umidità relativa esterna, sono rispettivamente 2.00 °C e 48.8% per l'inverno e 32.4 °C e 45.0% per l'estate.



Figura 40. Immagine satellitare dell'edificio (riquadro blu) e del contesto urbano circostante

La Clinica Ruesch ospita 60 posti letto distribuiti in 31 camere ed è caratterizzata da sei livelli, di cui due seminterrati, per una superficie coperta complessiva di circa 6000 m<sup>2</sup>. L'edificio ha una superficie netta di 2922

m<sup>2</sup>, un volume netto climatizzato di 9577 m<sup>3</sup>, un rapporto finestre/pareti del 5.4% e un rapporto superficie/volume (S/V) di 0.36.

A questo punto viene presentata una panoramica delle caratteristiche dell'involucro opaco e vetrato (Figura 41) sulla base delle interviste effettuate all'ufficio tecnico e dei documenti di progettazione.



**Figura 41. Involucro dell'edificio: facciata sud**

Per quanto riguarda l'involucro opaco verticale, sono state individuate due tipologie di soluzioni: muri in tufo e muri in cemento, con o senza isolamento termico. Fatta eccezione per il terzo piano, pareti in tufo caratterizzano le facciate esposte a sud, est e ovest. Le pareti interrate sono in cemento; a nord, invece, le facciate sono caratterizzate prevalentemente da una stratigrafia in calcestruzzo coibentato, come del resto tutte le facciate del terzo piano. L'applicazione di 6 cm di polistirene espanso (EPS) sul lato esterno è il risultato di un intervento di retrofit parziale ultimato nel 2022.

Le pareti di tufo rappresentano circa il 51% dell'involucro opaco verticale. Poiché è rappresentativa delle facciate dell'edificio principale, è stata eseguita una misurazione in situ della trasmittanza termica utilizzando un misuratore di portata termica wireless Thermozig BLE. La misurazione è stata eseguita per una parete dello spessore totale di 80 cm, rivestita sia internamente che esternamente con intonaco. La distanza minima dei sensori dai ponti termici era di 90 cm e l'altezza dal pavimento era di 1.0 m. La Figura 42 mostra le posizioni dei sensori.

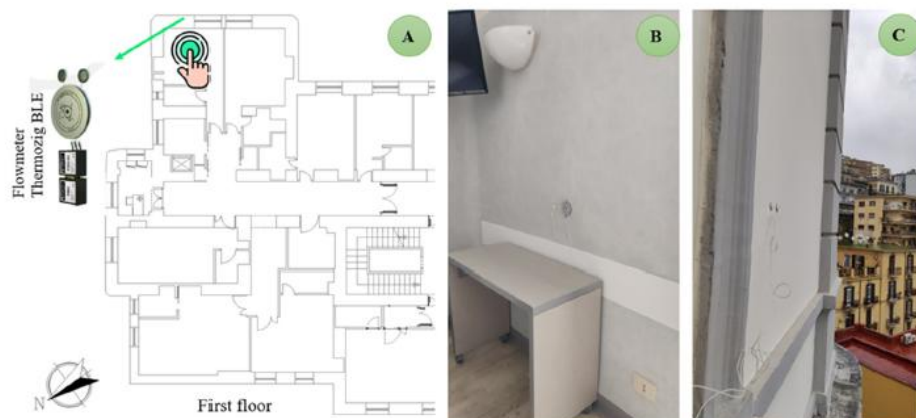


Figura 42. Ubicazione della parete (A); posizioni dei sensori all'interno (B) e all'esterno (C)

Il periodo di misurazione è stato di circa 7 giorni (dalle 11:53 del 6 marzo 2023 alle 10:23 del 13 marzo 2023), con un periodo di acquisizione di 30 min. Durante la campagna, la temperatura interna media è stata di 22°C e la differenza media interna-esterna è stata di 8.0°C, compatibile con i requisiti della norma. Il flusso medio attraverso l'elemento è stato di 4.48 W/m<sup>2</sup>. Il valore U calcolato era di 0.54 W/m<sup>2</sup>K. A partire da questa misura è stato eseguito un procedimento inverso per ottenere il valore teorico di conducibilità termica del tufo che è stato utilizzato nella costruzione di elementi con altro spessore. La Tabella 25 mostra lo spessore (s) e le caratteristiche termofisiche, ovvero la conducibilità termica ( $\lambda$ ), la massa superficiale (M), il calore specifico (c) e la resistenza termica (R) della parete sottoposta a misurazioni della trasmittanza.

Muro di tufo	s (m)	$\lambda$ (W/mK)	M (kg/m <sup>2</sup> )	c (J/kgK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
Intonaco esterno	0.02	0.700	28	1000	0.029
Blocchi di tufo	0.80	0.466	736	1000	1.717
Intonaco interno	0.02	0.700	28	1000	0.029

Tabella 25. Caratteristiche termofisiche della parete di tufo

Nella Tabella 26 sono riportate le proprietà degli strati che compongono la parete esterna in calcestruzzo coibentata, con una prevalenza del 39%. Per uno spessore medio di 53 cm, il valore U calcolato del blocco di cemento è 0.278 W/m<sup>2</sup> K, secondo [105].

Muro di cemento isolato	s (m)	$\lambda$ (W/mK)	M (kg/m <sup>2</sup> )	c (J/kgK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
Intonaco esterno	0.02	0.700	28	1000	0.029
EPS	0.06	0.034	1.8	850	1.765
Blocchi di cemento	0.53	0.33	742	1000	1.606
Intonaco interno	0.02	0.700	28	1000	0.029

Tabella 26. Caratteristiche termofisiche della parete in calcestruzzo isolata

Considerando le stesse proprietà proposte nella Tabella 26 per il muro di cemento non isolato e assumendo che lo spessore dei blocchi di cemento sia di 65 cm, il valore di  $U$  calcolato è  $0.455 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Per quanto riguarda l'involucro orizzontale opaco, il solaio controterra è in cemento armato con un valore di  $U$  di  $1.266 \text{ W/m}^2\text{K}$ . I rimanenti solai e coperture sono costituiti da un solaio alveolare. Ogni piano è caratterizzato da un controsoffitto con intercapedine variabile per ciascuna zona termica dell'ospedale in modo da garantire il passaggio delle linee di distribuzione di tutti gli impianti dell'aria. Il valore di  $U$  varia da  $1.104$  a  $1.442 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

La Figura 43 mostra le finestre dell'ospedale, realizzate con telai in PVC e doppio vetro trasparente (4 mm) con distanziatori riempiti d'aria da 12 mm. La Tabella 27 riporta: la superficie finestrata ( $S_w$ ) per ciascun livello ed esposizione; la superficie vetrata totale ( $S_{g,tot}$ ) per ciascun livello e la trasmittanza termica media della finestra ( $U_{w,mean}$ ).



Figura 43. Finestre: (A) lato esterno—sud; (B) lato interno

Livello	Area della superficie finestrata per esposizione				$S_{g,tot}$ (m <sup>2</sup> )	$U_{w,mean}$ (W/m <sup>2</sup> K)
	Sud (m <sup>2</sup> )	Est (m <sup>2</sup> )	Ovest (m <sup>2</sup> )	Nord (m <sup>2</sup> )		
-2	17.3	0.0	1.6	0.0	8.1	2.670
-1	23.8	5.9	12.7	0.0	19.6	2.697
0	30.5	13.2	12.7	14.1	36.7	2.701
1	38.6	14.8	14.7	17.1	45.9	2.701
2	51.6	11.1	9.7	0.0	45.2	2.723
3	54.3	4.3	5.6	25.9	52.0	2.736

Tabella 27. Dati globali dell'involucro trasparente, per livello ed esposizione

Sono state condotte diverse indagini utilizzando una termocamera a infrarossi FLIR, modello E8, per rilevare comportamenti critici dell'involucro. I sopralluoghi sono stati effettuati durante due giornate invernali, 12

dicembre e 3 marzo. La Figura 44 mostra l'immagine a infrarossi di una stanza del reparto al primo piano esposta a sud-est. Nell'angolo tra due muri è presente il tipico ponte termico geometrico con temperatura superficiale inferiore a quella del muro attuale. Questa è stata la tipologia di fenomeno locale più diffusa riscontrata per l'involucro opaco. Il problema più significativo riguarda infatti l'involucro vetrato, caratterizzato da maggiori dispersioni termiche e da un ponte termico creato dalla discontinuità del materiale. Questi fenomeni provocano sia perdite di energia che problemi di asimmetria della temperatura superficiale radiante, con conseguenti disagi localizzati.



Figura 44. Immagini IR e fotografiche interne della stanza rivolta a sud-est

#### 4.2.2. Layout dell'impianto di climatizzazione e di illuminazione

##### SISTEMA HVAC

Diversi tipi di sistemi HVAC servono l'ospedale. Il sistema principale (MHCS) è costituito da due pompe di calore reversibili multifunzionali identiche (CLIVET-WSAN-XSC 115D). Queste producono acqua calda o fredda, disponibile per la maggior parte delle zone di tutti i piani, attraverso l'alimentazione di terminali idronici e/o unità di trattamento aria (ATU) dedicate. Il sistema di riscaldamento e raffrescamento secondario (SHCS) è un'unità a pompa di calore AERMEC NRP0500E4. Si tratta di un'unità polivalente, dotata di ventilatori assiali e compressori scroll. I principali dati prestazionali ricavati dalle schede tecniche sono riportati nella Tabella 28, dove sono riportati anche il coefficiente di prestazione nominale (COP) e l'indice di efficienza energetica (EER).

		CLIVET-WSAN- XSC 115D	AERMEC NRP0500E4	AERMEC MVAMMHR2241T
Potenza di raffreddamento ( $C_{cl}$ )	(kW)	300	95	22.40
Assorbimento di potenza	(kW)	109	34.8	4.74
EER	(W/W)	2.74	2.73	4.73
Potenza di riscaldamento ( $H_{cl}$ )	(kW)	311	106	25
Assorbimento di potenza	(kW)	103	32.1	4.81

**Tabella 28. Dati prestazionali ricavati dalle schede tecniche**

L'ispezione agli infrarossi ha rilevato alcune potenziali criticità. Ad esempio, la Figura 45 mostra che alcuni elementi e tubi dell'MHCS hanno temperature superficiali più elevate rispetto agli altri componenti e quindi dovrebbero essere isolati.

**Figura 45. Immagini fotografiche e IR dell'MHCS**

La Figura 46 mostra un'immagine infrarossa dei collegamenti elettrici dell'MHCS. Sono state rilevate temperature superficiali estremamente elevate (tra 60 °C e 70 °C). Secondo la norma CEI EN 61439-1 [175], tali temperature sono ammissibili solo nel caso di interruttori installati in quadri se sono collegati a conduttori dotati di guaina isolante (limite 70 °C) oppure se sono collegati a conduttori nudi (limite 85 °C).

**Figura 46 Immagini fotografiche e IR del pannello MHCS**

Sono presenti diversi sistemi ad espansione diretta (DX), localizzati prevalentemente al secondo piano seminterrato. Nel dettaglio, esistono diverse tipologie di impianti monosplit ( $H_{el}$  3.5 kW,  $C_{el}$  3.2 kW) e dual split ( $H_{el}$  6.5 kW,  $C_{el}$  6.1 kW) e in alcuni casi, come per la cucina al piano -2, funzionano in parallelo con il MHCS.

Inoltre, alcune zone, come la sala dedicata alla risonanza magnetica (livello -2), sono servite da dedicati sistemi ad espansione diretta a flusso di refrigerante variabile (VRF) con recupero di calore. Essi funzionano con gas R410A e dispongono di un sistema di controllo della condensazione composto da un'unità esterna, due unità interne e una unità interna canalizzata ad alta o bassa prevalenza (installazione orizzontale). I principali dati tecnici sono riportati nella Tabella 28 per il modello MVAMHR2241T.

La clinica è inoltre servita da numerose unità di trattamento aria. La Figura 47 mostra le principali, tra cui l'UTA dedicata alla radiologia (Figura 47a), con una portata d'aria nominale di 4350 m<sup>3</sup>/h, l'unità di trattamento dell'aria della sala parto (Figura 47b) e l'UTA del nido (Figura 47c), con portate d'aria nominali rispettivamente di 33 m<sup>3</sup>/h e 3500 m<sup>3</sup>/h.



**Figura 47. Unità di trattamento dell'aria principali: (A) (piano-1) radiologia; (B) (2° piano) sala parto; (C) (3° piano) assistenza infermieristica del nido**

Infine, per la produzione di acqua calda sanitaria sono presenti due caldaie a gas della capacità di 500 L e potenza termica nominale di 47 kW .

La Tabella 29 riassume gli impianti installati per le principali zone termiche determinate durante l'audit energetico. Queste indicazioni sono molto importanti per la definizione del modello numerico necessario per le simulazioni.

Zona	Tipo
<b>Piano -2</b>	
Risonanza magnetica	VRF dedicato con recupero di calore (2 unità interne, 1 unità esterna, umidificatore elettrico (11.3 kW))
Cucina	MHCS con UTA dedicata: (800 m <sup>3</sup> /h) + sistema DX (mono-split)
Magazzino materiali/spogliatoio	Sistema DX: 1 mono-split e 2 dual-split
<b>Piano -1</b>	
Chirurgia – procreazione medicalmente assistita	SHCS + sistema a tutt'aria esterno con UTA dedicata (6000 m <sup>3</sup> /h)
Sale di servizio - procreazione medicalmente assistita (MAP)	MHCS + 10 fan-coil a soffitto e 3 UTA con recupero di calore (1100 m <sup>3</sup> /h)
Chirurgia	MHCS + 14 fan-coil e 1 UTA con recupero di calore (2250 m <sup>3</sup> /h)
Radiologia	MHCS + UTA dedicata (3360 m <sup>3</sup> /h)
<b>Piano 0</b>	
Ambulatorio	MHCS + 19 fan-coil a soffitto e 2 UTA con recupero di calore (1500 m <sup>3</sup> /h)
Bar	MHCS + 2 fan-coil a soffitto
Receptionist	MHCS + 19 fan-coil da soffitto
<b>Piano 1</b>	
Camere dei pazienti	MHCS + 21 unità fan-coil

## Piano 2

Blocco operatorio	MHCS + UTA dedicata (7100 m <sup>3</sup> /h) con recupero di calore
Endoscopia	MHCS + UTA dedicata (1600 m <sup>3</sup> /h) con recupero di calore
Camere dei pazienti	MHCS + 21 unità fan-coil e 2 UTA con recupero di calore (2100 m <sup>3</sup> /h)
Assistenza neonatale	MHCS + UTA dedicata (3500 m <sup>3</sup> /h) con recupero di calore

**Tabella 29. Descrizione dei principali sistemi HVAC**

### *SISTEMA DI ENERGIA RINNOVABILE*

Sul tetto è stato installato un impianto fotovoltaico connesso alla rete (Figura 48) con una potenza di picco di 89.2 kW. Esso è composto da 223 moduli (394.26 m<sup>2</sup>) con collegamento di tipo trifase a bassa tensione. I dati di progetto hanno considerato l'irraggiamento solare annuo su un piano orizzontale pari a 5598.70 MJ/m<sup>2</sup>, per il quale il bilancio di sistema (B.O.S.) è pari all'88.34%. La produzione annua è stata stimata dal produttore in 126307.14 kWh.



**Figura 48. Impianto fotovoltaico installato**

Tale sistema, in attività dal 2020, è però in fase di dismissione, a causa di una valutazione negativa effettuata dalla Soprintendenza Archeologica. L'edificio, infatti, si trova in una zona storica e l'impianto installato è stato ritenuto troppo invasivo in termini di impatto visivo. Per questo motivo, anche se considerato nell'analisi dello stato di fatto, durante il processo di ristrutturazione sarebbe necessario valutare l'applicabilità di un diverso impianto fotovoltaico al fine di rispettare i criteri non invasivi stabiliti dall'ente.

### *SISTEMA DI ILLUMINAZIONE*

L'impianto di illuminazione è differenziato in base ai livelli di illuminamento richiesti per le attività mediche. Le lampade principali (Figura 49) presenti nelle sale di attività ai livelli bassi (come stanze di degenza, corridoi, cucine, ecc.) sono lampade al neon da 60x60 cm, 4x10 W.



**Figura 49. Dispositivi del sistema di illuminazione**

Altre tipologie di dispositivi sono state rinvenute in alcune zone molto rappresentative, come i blocchi operatori e le sale di sterilizzazione e parto. Le tipologie principali sono:

- Disano 825 FL 4x18W 825 Comfort—placca opale;
- Disano 843 FL 4x14W T5 843 Ermetica - ottica satinata;
- Disano 828 FL 4x18W 828 Comfort—piastra prismatica;
- Disano 828 FL 4x36 828 Comfort – piastra prismatica;
- Disano 843 FL 4x24 T5 843 Hermetic - ottica satinata.

#### **4.2.3. Consumi energetici**

##### *ANALISI DEL CONSUMO DI ENERGIA ELETTRICA*

L'energia elettrica viene acquistata tramite un contratto di fornitura in media tensione con una potenza disponibile di 500 kW. La Figura 50 mostra l'energia elettrica attiva giornaliera media richiesta. Il valore medio è comparabile ogni mese, con un leggero incremento durante l'estate a causa di una maggiore incidenza delle richieste di energia per il raffrescamento e di un'efficienza nominale della pompa di calore più bassa nel periodo estivo. Il consumo annuo totale è aumentato da 1217 MWh nel 2020 a circa 1302 MWh nel 2021 e a circa 1225 MWh nel 2022. Tuttavia, i valori sono coerenti nel corso degli anni e la variazione può essere attribuita principalmente alle differenze nei servizi ospedalieri richiesti dai pazienti e, quindi, a cause contingenti.

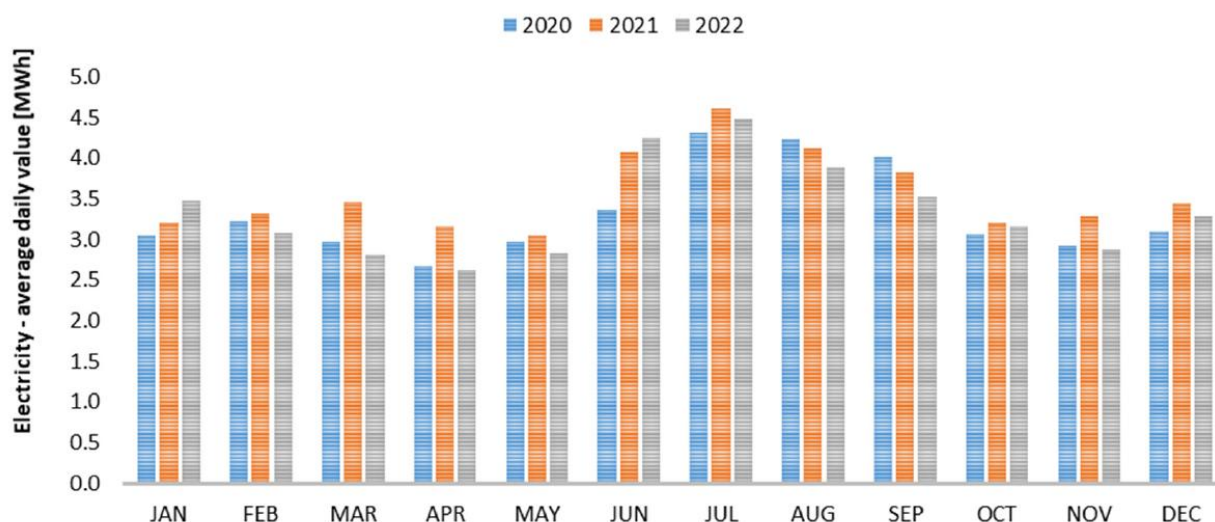


Figura 50. Elettricità attiva: valore medio giornaliero per mese

L'energia elettrica è stata inoltre misurata mediante sotto-contatori, al fine di verificare l'assorbimento delle linee dedicate durante le attività di emergenza o quando vengono installate apparecchiature con elevati requisiti di potenza. La Tabella 30 mostra le misurazioni su tre giorni tipici del periodo invernale.

	23 novembre 2022 (MWh)	23 febbraio 2023 (MWh)	23 marzo 2023 (MWh)
Cucina, sezione normale	141	147	149
Cucina, sezione emergenza	177	183	185
Laboratorio, sezione normale	135	140	141
Laboratorio, sezione emergenza	159	165	167
MAP, sezione sicurezza	132	137	138
MAP, sezione normale	37	39	39
MAP, sezione continuità	37	38	38
Radiologia, sezione normale	516	532	537
Radiologia, sezione emergenza	179	179	179

Tabella 30. Misure elettriche

#### ANALISI DEI CONSUMI DI GAS NATURALE

La stessa analisi è stata effettuata anche per il gas naturale. Considerando il potere calorifico superiore dichiarato nelle bollette energetiche dell'ospedale, la richiesta annua è mediamente di 103 MWh con un'incidenza del 10% nei mesi invernali e del 5-7% in quelli estivi. Il costo totale annuo è di circa 5156 euro e rappresenta circa il 2.4% della spesa totale sui vettori energetici.

#### 4.2.4. Qualità dell'energia nello stato di fatto

##### ANALISI DEL COMFORT TERMOIGROMETRICO

La qualità interna di due stanze di degenza rappresentative è stata analizzata in una campagna di misurazioni di 10 giorni durante un periodo tipico della stagione invernale (dal 6 marzo al 13 marzo 2023) quando l'impianto di riscaldamento era acceso. Questo tipo di utilizzo è stato scelto perché sia il comportamento degli occupanti sia il tipo di impianto HVAC installato e le condizioni ambientali interne risultano più variabili rispetto a locali (ad esempio, i blocchi operatori) in cui i valori sono rigidamente fissati da normative vigenti. La temperatura dell'aria interna e l'umidità relativa sono state misurate con un datalogger TESTO 177-H1 (risoluzione 0.1°C/0.1%; precisione  $\pm 0.5^\circ\text{C}/\pm 2\%$ ). Inoltre, per monitorare le concentrazioni di CO<sub>2</sub> sono stati utilizzati un datalogger TESTO 400 (precisione  $\pm 50$  ppm +3% m.v), un anemometro a filo caldo (precisione  $\pm 0.03$  m/s +5% m.v) e un globotermometro (classe 1 secondo EN 60584-2) per misurare rispettivamente la velocità dell'aria interna e la temperatura globale. È stato scelto un periodo di campionamento pari a 10 minuti in modo da rilevare con precisione tutte le possibili variazioni delle variabili considerate.

La Figura 51 mostra una delle stanze dei pazienti oggetto di indagine, che è stata continuamente occupata durante il monitoraggio. Tale stanza è esposta a ovest, con una superficie calpestabile di 17.9 m<sup>2</sup> e una superficie vetrata di 3.8 m<sup>2</sup>.

I sensori (Figura 51b) sono stati posizionati in modo da evitare l'influenza della radiazione solare diretta o di emettitori di calore.

I risultati del monitoraggio suggeriscono che il controllo del carico latente è piuttosto limitato poiché l'umidità relativa rientra in un intervallo accettabile per il 67% delle misurazioni; in alcuni giorni (8-10 marzo) è invece salita fino al 70%, con punte massime del 90%. La temperatura dell'aria è rimasta per lo più all'interno dell'intervallo di comfort accettabile, con variazioni comprese tra 18.8 °C e 23.6 °C. Inoltre, è stato osservato che, quando la temperatura scende sotto i 20 °C, si registra una fluttuazione della velocità dell'aria tra 0.15 e 0.25 m/s. Si può quindi concludere che, in tali periodi, gli occupanti potrebbero aver aperto porte o finestre per garantire la ventilazione naturale, e questo comportamento ha influenzato la temperatura dell'aria.

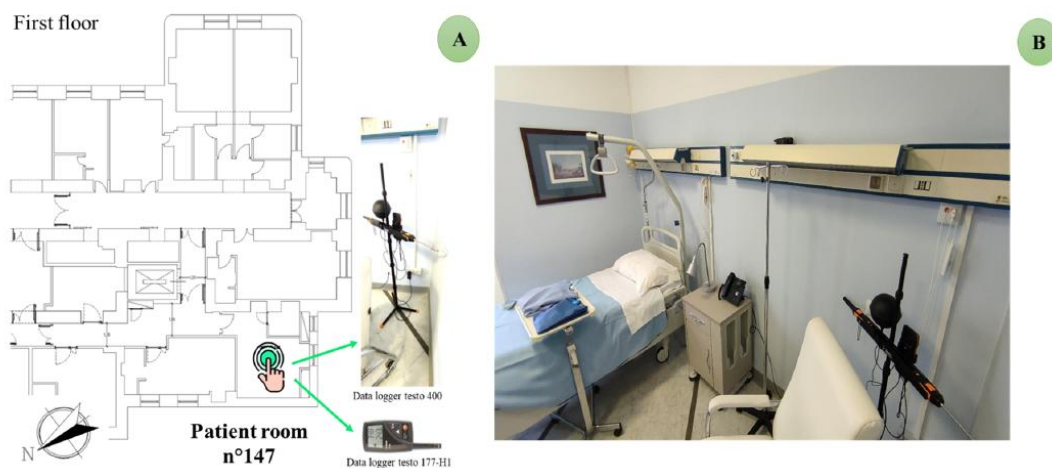


Figura 51. (A) Ubicazione della stanza del paziente sottoposta ad indagine; (B) sensori installati nella stanza

La Figura 52 mostra i valori PMV e PPD calcolati in tre diverse ore del 9 marzo; è stato ipotizzato un tasso metabolico di  $46 \text{ W/m}^2$  (0.8 met), che corrisponde ad una persona sdraiata. Per definire la resistenza termica degli indumenti sono state ipotizzate diverse combinazioni di abbigliamento; ad esempio, per pigiama lunghi e corti, con o senza vestaglia, la resistenza termica dell'abbigliamento può variare tra 0.9 clo e 4.6 clo, come mostrato da [176]. Supponendo che, per il periodo di riferimento, il paziente ricoverato indossi un pigiama lungo e sia coperto per il 23% con un piumone, è stato scelto un valore di 1,6 clo.

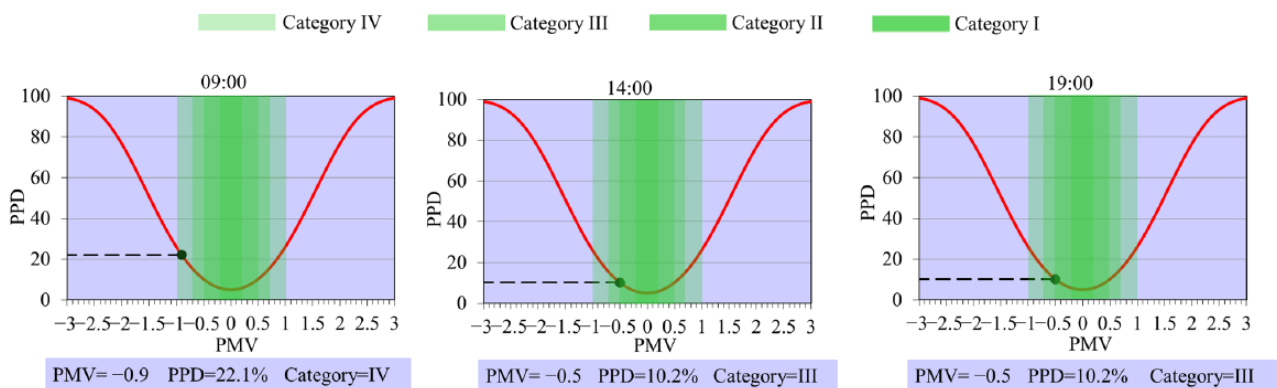


Figura 52. PMV e PPD il 9 marzo

Come riportato nella Figura 52, l'indice di comfort è compreso tra -0.5 e 0, quest'ultimo valore corrispondente alla sensazione di "neutralità termica". Va comunque precisato che l'intervallo di accettabilità da considerare è  $-0.2 < PMV < 0.2$  (categoria I), idoneo in presenza di soggetti termicamente vulnerabili. Per questo motivo, una riprogettazione del sistema HVAC con una migliore ventilazione potrebbe contribuire a soddisfare questo standard.

Le concentrazioni di  $\text{CO}_2$  variavano tra 470 e 700 ppm. Considerando il rapporto tecnico provvisorio "Monitoraggio della  $\text{CO}_2$  per la prevenzione e la gestione negli ambienti indoor in relazione alla trasmissione dell'infezione da virus SARS-CoV-2" dell'Istituto Superiore di Sanità del 2022, l'ambiente esterno può essere considerato avere una concentrazione di anidride carbonica compresa tra 400 e 500 ppm (con variazioni orarie e giornaliere influenzate dalla stagione, che possono superare i 150 ppm). Di conseguenza, considerando i valori misurati all'interno della stanza, si può concludere che essa rientra nella Categoria I secondo la norma EN 16798.

#### 4.2.5. Calibrazione del modello dell'edificio

Tutti i dati acquisiti durante l'audit sono stati utilizzati per definire il modello numerico con TERMUS BIM [177], utilizzato per implementare le norme tecniche italiane. Il metodo di valutazione su misura è stato applicato per ottimizzare la prestazione energetica in condizioni operative reali. Una volta completata la realizzazione dell'involucro opaco e vetrato, sono stati costruiti e calcolati tutti i possibili ponti termici in conformità alla norma UNI EN ISO 14683 [178]. Tutti i carichi interni rilevati sono stati assegnati a zone termiche e profili di occupazione, condizioni microclimatiche, ricambi d'aria e illuminazione; per il sistema

HVAC i profili utilizzati coprivano tutte le ore di tutti i giorni tra novembre ed aprile in modalità riscaldamento e da maggio a settembre in modalità raffrescamento.

La Figura 53 mostra un rendering dell'edificio e il confronto con un'immagine reale.

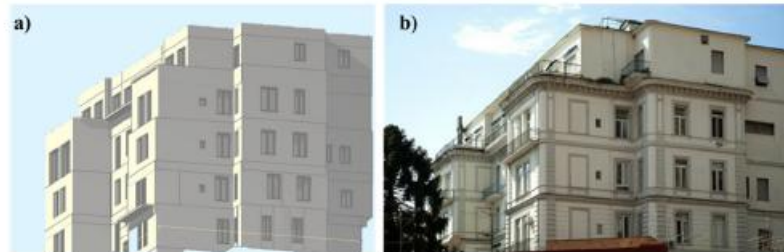


Figura 53. Rendering del modello di simulazione (a); immagine reale della facciata nord-est (b)

Considerando il consumo complessivo annuo, la variazione percentuale tra valore stimato e valore reale è pari al 3% e al 4% rispettivamente per il gas e l'energia elettrica, con relativi valori di CF pari a 1.036 e 1.045. I tassi di consumo di ciascun servizio, con i relativi fattori di congruenza, sono rappresentati nella Figura 54. In queste condizioni, il fattore di congruenza complessivo è risultato pari a 1.044, rientrando quindi in un intervallo di congruenza elevato.

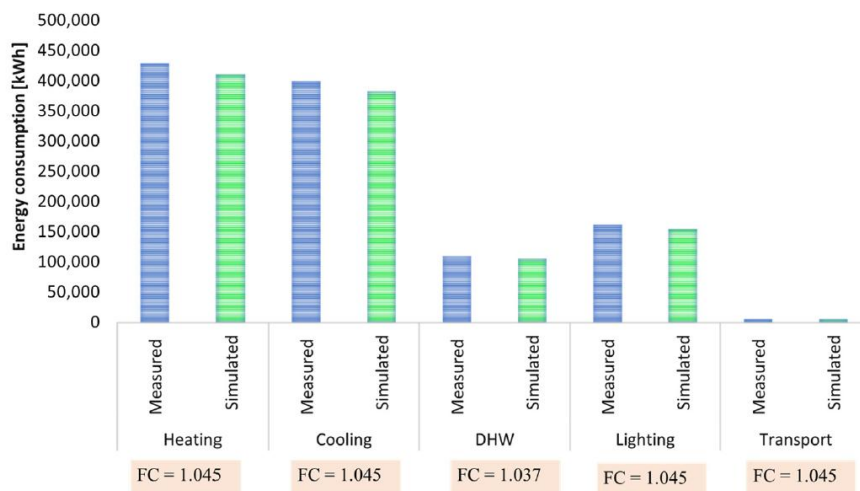


Figura 54. Confronto dei servizi energetici per la calibrazione del modello di calcolo

#### 4.2.6. Indicatori energetici

La Tabella 31 mostra sia la definizione degli indicatori, considerati secondo [25], sia il calcolo per lo stato di fatto dell'edificio.

Indice	Descrizione	Unità di misura	Valore
$H^*T$	Coefficiente medio complessivo di trasferimento di calore per unità di area di dispersione	W/m <sup>2</sup> K	0.44
$A_{sol}/A_{floor}$	Area solare estiva equivalente per unità di area di dispersione	/	0.04
$Y_{ie}$	Trasmittanza termica periodica media	W/m <sup>2</sup> K	0.16
$EP_{H,nd}$	Indice di prestazione energetica termica per il riscaldamento	kWh/ m <sup>2</sup>	99.7
$EP_{H,tot}$	Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale (energia primaria)	kWh/ m <sup>2</sup>	4438
$EP_{W,tot}$	Indice di prestazione energetica per l'acqua calda sanitaria (energia primaria)	kWh/ m <sup>2</sup>	43.6
$EP_{C,nd}$	Indice di prestazione energetica termica per il raffreddamento	kWh/ m <sup>2</sup>	44.8
$EP_{C,tot}$	Indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva (energia primaria)	kWh/ m <sup>2</sup>	336.2
$EP_{L,tot}$	Indice di prestazione energetica dell'illuminazione artificiale (energia primaria)	kWh/ m <sup>2</sup>	134.4
$EP_{T,tot}$	Indice di prestazione energetica per il trasporto di passeggeri e materiali (energia primaria)	kWh/ m <sup>2</sup>	5.3
$EP_{gl, nren}$	Indice di prestazione energetica complessiva (energia primaria non rinnovabile)	kWh/ m <sup>2</sup>	3698
$EP_{gl, tot}$	Indice di prestazione energetica complessiva (energia primaria totale)	kWh/ m <sup>2</sup>	4958

**Tabella 31. Parametri prestazionali energetici dello stato di fatto**

Al fine di valutare la qualità edilizia, questi indici possono essere confrontati con i parametri di settore riportati dal Rapporto RSE/2009/117 [179]. Considerando il consumo specifico in termini di tonnellate equivalenti di petrolio per posto letto (toe/pl), tale valore varia da 3.8 toe/pl in Sardegna a 24.5 toe/pl in Lombardia. La Regione Campania (dove è situata Napoli) assume un valore di 7.43 toe/pl, mentre si può considerare un valore medio nazionale pari a 12.6 toe/pl.

La Clinica Ruesh ha un valore di consumo specifico pari a 3.89 toe/pl, inferiore sia ai livelli nazionali che a quelli della stessa regione.

#### 4.2.7. Progettazione degli interventi di efficienza

Sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni e tenendo conto delle criticità rilevate, sono stati analizzati i seguenti interventi:

- l'installazione di finestre più efficienti con tapparelle come sistema di ombreggiatura mobile;
- la sostituzione dell'impianto di illuminazione;
- l'ammodernamento del sistema HVAC;
- l'installazione di un nuovo impianto fotovoltaico.

### *SOSTITUZIONE DELLE FINESTRE*

Secondo [178], ai piani -1, 0 e 1 verranno installate finestre doppie selettive riempite con gas argon (trasmissione del vetro  $1.1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ) con telai in alluminio a taglio termico. Per quanto riguarda i sistemi di ombreggiamento, oltre a degli attuali sistemi interni, è stata valutata la possibilità di installare sistemi mobili quali tapparelle motorizzate in PVC in cassonetto coibentato. Questa installazione ridurrebbe la superficie vetrata a circa 70 cm. Pertanto, poiché la superficie vetrata complessiva oggetto dell'intervento è di circa  $214 \text{ m}^2$ , il costo complessivo è pari a 124693 euro.

### *MIGLIORAMENTO DEL SISTEMA DI ILLUMINAZIONE*

L'intervento proposto mira sia a soddisfare le richieste degli occupanti, sia a garantire adeguati livelli di illuminamento per le attività mediche con un minor consumo di energia elettrica. Sono state prese in considerazione lampade a LED, con caratteristiche diverse a seconda dei reparti ospedalieri in cui verranno inserite (ad esempio 4000 lm per un blocco operatorio e 1450 lm per le stanze di degenza), così come l'integrazione delle stesse con un sistema di controllo, ovvero l'installazione di un rilevatore di presenza e luminosità almeno nei reparti e nei corridoi. Dal punto di vista economico, considerando la sostituzione di circa 345 lampade, il costo totale è di 143011 euro.

### *EFFICIENZA DEL SISTEMA DI CLIMATIZZAZIONE*

L'efficientamento dell'impianto di climatizzazione prevede innanzitutto la sostituzione di una delle pompe di calore dell'MCHS con un'unità polivalente a quattro tubi con sorgente d'aria e installazione esterna (COP 3.92, EER 3.96). Questo sistema produce ACS e, quindi, elimina le caldaie a gas dedicate.

Inoltre, sulla base dei risultati dei test di comfort interno, è prevista l'installazione di un sistema VRF in tutte le stanze dei pazienti. Si tratta dell'intervento più idoneo in termini di invasività e impatto. L'unità esterna scelta prevede il recupero di calore, la potenza frigorifera è di 73 kW con un EER di 3.75, e la potenza di riscaldamento è di 81 kW con un COP di 3.87.

Il costo dell'unità polivalente è di 67753 euro, mentre l'installazione del sistema VRF richiede un costo di investimento complessivo stimato di circa 200326 euro.

### *INSTALLAZIONE DELL'IMPIANTO FOTOVOLTAICO*

Considerati i vincoli paesaggistici si è deciso di proporre un nuovo impianto con moduli fotovoltaici con celle monocristalline e vetro colorato. È stato considerato un modello a 62 celle, con una potenza massima di 300 W ed un'efficienza del 18.18%. Complessivamente si possono installare 240 pannelli ( $396 \text{ m}^2$ ) per una potenza totale di 72 kW. L'energia prodotta sarà interamente autoconsumata. La stima della produttività si basa sul valore medio mensile della radiazione solare, come riportato in [174] utilizzando una procedura disponibile nello strumento TERMUS BIM adottato. Sulla base delle analisi di mercato, il costo totale sarà di 252000 euro.

#### 4.2.8. Miglioramento del sistema edificio-HVAC

##### ANALISI DEI RISULTATI

La Tabella 32 mostra i tassi di consumo energetico risultanti sia nel caso base che in quello ristrutturato. A livello globale, gli investimenti necessari potrebbero contribuire a ridurre la domanda totale di energia primaria del 19% e le emissioni di CO<sub>2</sub> equivalenti del 49%. Per quanto riguarda l'energia elettrica, il risparmio energetico è pari al 48%, attribuibile principalmente alla riduzione del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento (30%) grazie all'installazione di un sistema VRF e alla riduzione dell'energia elettrica per l'illuminazione (91%). Tuttavia, gli interventi sull'involucro edilizio ridurranno l'energia necessaria per il riscaldamento (energia termica) di circa il 43%, e l'adozione di un sistema di ombreggiamento garantisce una riduzione dell'energia necessaria per il raffrescamento di circa il 27%. L'impianto fotovoltaico installato potrebbe garantire la produzione di 83981 kWh.

	Unità di misura	Stato di fatto	Stato ristrutturato
Domanda totale di energia primaria	Kwh	14,487,345	11,783,559
Domanda di energia primaria per il riscaldamento	Kwh	12,969,066	10,918,087
Domanda di energia primaria per il raffreddamento	Kwh	982,423	666,788
Domanda di energia elettrica per l'illuminazione	Kwh	172,126	15,906
Domanda di energia elettrica per i trasporti	Kwh	14,487	14,487
Elettricità	Kwh	557,764	291,660
Gas naturale	Sm <sup>3</sup>	10,094	0

Tabella 32. Riepilogo dell'analisi energetica

Ai fini dell'analisi economica, la Tabella 33 riporta la vita utile e il tasso di manutenzione adottato per gli interventi considerati.

Interventi di Ristrutturazione	Vita utile	Manutenzione preventiva annuale come percentuale dei costi di investimento
Sostituzione delle finestre	40 anni	-
Modernizzazione del sistema di illuminazione	20 anni	-
Modernizzazione del sistema di aria condizionata	20 anni	3%
Installazione impianto fotovoltaico	25 anni	1%

Tabella 33. Dati sulla vita utile e sul tasso di manutenzione annuale degli interventi ipotizzati

Il calcolo finanziario è stato effettuato per un periodo di 40 anni, considerando un tasso di interesse di mercato del 4.5%, un tasso di inflazione del 2% e un tasso di crescita dei costi energetici del 2%. I prezzi dell'energia sono stati ricavati dalle bollette: elettricità, 0.213 EUR/kWh; gas naturale, 0.575 Euro/Sm<sup>3</sup>. Sono stati analizzati due scenari, con e senza incentivi finanziari. Per il secondo caso, è stato considerato un contributo

pari al 45% per gli interventi relativi agli impianti e alla sostituzione degli infissi, e al 60% per il nuovo impianto fotovoltaico, come definito dalla fonte [180].

L'applicazione del metodo proposto al caso studio evidenzia le difficoltà nell'audit energetico preliminare dati i diversi utilizzi e vettori energetici. La caratterizzazione dell'involucro edilizio, infatti, è solitamente semplice e può essere condotta con tecniche consolidate che soddisfano i principali parametri richiesti dagli strumenti di simulazione. Invece, le definizioni dei sistemi HVAC e di illuminazione sono state molto difficili da ottenere, sia in termini di numero di ispezioni e di dati acquisiti, sia in termini di definizioni e implementazioni della configurazione reale in un modello numerico. Molto importante è l'accuratezza con cui viene esaminato il bilancio energetico, a partire dalla richiesta storica e dalla definizione di una matrice associata a ciascuna zona termica, ai diversi sistemi e al controllo richiesto delle variabili indoor. Le strutture sanitarie ospitano funzioni molto diverse tra loro: ambulatori, uffici, blocchi chirurgici con condizioni molto restrittive come umidità interna e temperature elevate, e stanze che devono essere controllate durante l'intera giornata (reparti di degenza). Questa variabilità aumenta il tempo computazionale e la capacità di raggiungere un elevato fattore di congruenza. Questo caso studio può aiutare a individuare gli elementi base degli audit energetici, ma lo schema proposto può anche essere migliorato utilizzando misure illuminotecniche e acustiche per la caratterizzazione completa degli ambienti interni.

Considerando l'analisi energetica e ambientale, è chiaro che il miglioramento degli involucri edilizi è una strategia chiave per ridurre il fabbisogno di energia termica e stabilizzare le condizioni interne con il controllo passivo nei climi mediterranei. Per gli elementi vetrati, l'adozione di un rivestimento selettivo riduce il surriscaldamento estivo senza compromettere lo sfruttamento degli apporti solari durante l'inverno. Anche l'isolamento degli involucri opachi, non discusso nel presente caso studio per le sue caratteristiche, è consigliabile per ridurre le dispersioni termiche.

Tuttavia, la principale strategia per ridurre l'impatto ambientale ed energetico è la sostituzione dei sistemi esistenti con altri più innovativi che possano sia migliorare l'efficienza dei sottosistemi di generazione e delle emissioni, sia le condizioni di comfort interno. Più in generale, le unità VRF rappresentano un modo per minimizzare l'impatto degli interventi sulle stanze dei pazienti; mentre i sistemi di generazione elettrica con fonti rinnovabili integrate possono fornire aria fredda o calda per i sistemi a tutta aria, prescritti nelle zone più premiate.

La ristrutturazione degli ospedali, secondo l'analisi proposta, sembra economicamente sostenibile con incentivi di basso livello.

#### **4.3. Progettare il retrofit attraverso indici di comfort termico: studio numerico e sperimentale in un blocco operatorio di un ospedale italiano**

Il comfort termico è definito come “quella condizione mentale che esprime soddisfazione per l'ambiente termico ed è valutata tramite un giudizio soggettivo”[95]. All'interno delle strutture sanitarie, la soddisfazione dei criteri di comfort termico può ridurre la durata della degenza di un paziente [181] e, d'altra parte, può migliorare la qualità del lavoro del personale ospedaliero [182]. A questo proposito, Obeidat et al. [183]

sottolineano sperimentalmente l'importanza della configurazione della stanza nel plasmare l'esperienza del paziente all'interno delle unità oncologiche e sottolineano il ruolo fondamentale del design nell'influenzare i risultati del paziente.

Inoltre, gli ospedali ospitano persone con età, sesso e condizioni di salute diverse, fattori che influenzano la percezione del comfort termico e il relativo studio [184], a causa delle differenze nella fisiologia, nei livelli metabolici, nelle condizioni psicologiche e mediche. Per incentivare e facilitare l'aggiornamento continuo delle strutture sanitarie esistenti è importante definire metodi per migliorare il processo progettuale, [185] tenendo in considerazione il ruolo cruciale svolto dal comfort termico. Alcuni studi evidenziano inoltre che è opportuno ripensare il modo in cui gli standard e le linee guida per la progettazione sanitaria dovrebbero essere formulati al meglio [186] poiché il comfort del paziente può aumentare attraverso la formazione del personale sanitario incentrata sulle capacità comunicative, chiare procedure amministrative che garantiscono la privacy e un tempo adeguato per il dialogo, nonché iniziative di educazione comunitaria che mettano in luce l'impatto di questi aspetti sulla salute fisica [187]. Tuttavia, l'igiene e la sicurezza sono i parametri principali per stabilire codici e standard edilizi per gli ospedali e questi attualmente mancano del concetto di comfort termico [188]. L'approccio principale adottato nella letteratura esistente è la valutazione delle condizioni interne attraverso il calcolo del PMV (Predicted Mean Vote), secondo la teoria di Fanger [189] e il confronto con le reali sensazioni termiche raccolte in studi sul campo, espresse come TSV (Thermal Sensation Vote) [190]. La maggior parte di questi studi è stata condotta in città con clima molto umido. Rahman et al. [191] si sono concentrati su un ospedale in Malesia (clima umido) e hanno scoperto che la ventilazione naturale non è in grado di mantenere condizioni di comfort accettabili, quindi il PMV è risultato essere al di fuori dell'intervallo di comfort. Peng et al. [192] hanno eseguito un confronto tra il TSV e il PMV nelle aree di attesa dei reparti ostetrici di quattro ospedali di Guangzhou durante l'estate e l'inverno e hanno condotto un sondaggio tramite questionario. Questo confronto ha mostrato che la temperatura neutra delle donne incinte è inferiore a quella dei pazienti maschi e delle donne non incinte. Per le donne nel post-partum, Run et al. [193] hanno anche scoperto che fattori come l'età e l'indice di massa corporea dovrebbero essere presi in considerazione quando si regolano i parametri di comfort termico. Khalid et al. [194] hanno condotto i loro studi in Malesia esaminando due grandi ospedali. In particolare, le misurazioni della temperatura dell'aria, dell'umidità relativa, della temperatura di globo e della velocità dell'aria hanno dimostrato che l'ambiente termico non soddisfaceva le linee guida stabilite dalla legislazione. Infine, Tang et al. [195] hanno studiato l'IEQ (Indoor Environmental Quality) di un corridoio ospedaliero semi-chiuso con membrana in etilene-tetrafluoroetilene (ETFE), in una struttura cinese situata in una regione calda e umida. Anche se le persone che vivono in ambienti tropicali sono abituate a temperature piuttosto elevate, questi studi mostrano che negli ambienti ospedalieri la percentuale di persone insoddisfatte è in ogni caso superiore al 50%. Questa percentuale di insoddisfatti diminuisce nel caso di un clima mediterraneo. In breve, la conclusione principale della letteratura è che gli attuali metodi di previsione ignorano il ruolo dell'adattamento dei pazienti oppure lo trattano come una "scatola nera" [196].

In alcuni studi, anche il personale sanitario è stato coinvolto nell'analisi del comfort termico. Pertanto, Derks et al. [197] hanno dimostrato che una condizione di comfort leggermente inaccettabile compromette le

prestazioni lavorative; infatti, il 49% degli operatori ha mostrato intolleranza all'aria secca e alle alte temperature. Quindi, la soluzione migliore dovrebbe essere quella di avere una temperatura di set point diversa nelle diverse aree. Invece, in un ospedale statale situato nella città di Kermanshah, gli autori hanno scoperto che la maggior parte dei problemi termici in inverno si verificano nel turno di lavoro mattutino e le peggiori condizioni termiche in estate si verificano nel turno di lavoro di mezzogiorno [198]. Per il personale ospedaliero di Sivas, è stato riscontrato che il rischio di sindrome dell'edificio malato era 4.31 volte più alto per coloro che si lamentavano della temperatura ambiente variabile e 3.11 volte più alto per coloro che si lamentavano del rumore [199]. D'altra parte, dagli studi condotti da Hashiguchi et al. [200], in Giappone è emersa un'incoerenza tra il personale ospedaliero e i pazienti: il 70% del personale sanitario si trovava in condizioni di disagio, lamentando caldo e secchezza dell'aria, mentre la stessa percentuale di pazienti esprimeva un giudizio positivo nei confronti delle condizioni termiche. Questa incoerenza dipende da molte cause, come l'età: i pazienti avevano un'età media di 71 anni mentre il personale sanitario aveva un'età media di 39 anni. Del Ferraro et al. [181] applicando il modello statico al personale medico e ai pazienti di un ospedale pubblico dell'Italia centrale, hanno dimostrato che il modello PMV non si adatta ai pazienti. Nel loro studio, gli autori hanno confrontato i valori PMV e AMV (Actual Mean Vote). Questo confronto ha mostrato che non è possibile avere le stesse condizioni termiche per il personale medico e i pazienti. Skoog et al. [201] hanno evidenziato che, sia in estate che in inverno, la temperatura operativa ottimale per i gruppi di personale e di pazienti è diversa, con una discrepanza anche tra i valori misurati e quelli previsti: per il personale sanitario è più alta mentre per i pazienti è più bassa di quella attesa.

Va sottolineato che, come noto dalla teoria di Fanger, il modello PMV può essere applicato in condizioni specifiche (tasso metabolico maggiore di 0.8 met e isolamento dell'abbigliamento inferiore a 2.0 clo) per persone sane e non addormentate. Ma solitamente, nelle strutture sanitarie, le condizioni più studiate sono diverse dal modello sopra menzionato. Ciò è confermato da Alotaibi et al. [202]: in climi caldi, hanno trovato differenze significative tra il TSV definito dai pazienti e il PMV valutato tramite misurazione. Rus et al. [203] hanno raggiunto gli stessi risultati in entrambe le stagioni, proponendo di considerare diversi tassi metabolici per categorie di pazienti come donne in gravidanza e post-gravidanza. Rodrigues et al. [204] hanno proposto di rivedere il tasso di vestiario e le condizioni di ventilazione sulla base dell'attività della persona all'interno di una sala operatoria. Infine, considerando la revisione proposta da Pereira et al. [205], si è scoperto che circa l'81% degli studi pubblicati riguarda l'aspetto salute/benessere, il 17% riguarda il risparmio energetico e circa il 2% affronta l'aspetto produttività.

È inoltre importante sottolineare che la progettazione dell'ambiente costruito può favorire l'adattamento dei pazienti supportando la loro autonomia e competenze, come evidenziato da Willems et al. [206]. Su questo aspetto, Nazanin et al. [207] hanno studiato l'influenza delle configurazioni del sistema di finestre in una stanza di degenza con un letto situata in un clima temperato. I risultati mostrano che le vetrate con fattore solare tra 0.3 e 0.5 e trasmittanza visibile tra 0.5 e 0.74 hanno un consumo energetico e/o un costo inferiori, impatti ambientali inferiori che mostrano una qualità superiore per il comfort visivo. Del Regno et al. [208] hanno sottolineato che per la ristrutturazione di strutture sanitarie esistenti con l'obiettivo di aumentare il comfort

termico, le migliori misure di retrofit sono l'installazione di una pompa di calore ad assorbimento azionata da collettori solari termici e cogenerazione.

Dall'analisi della letteratura emergono alcuni punti critici con riferimento alla valutazione del comfort negli ambienti ospedalieri, che richiedono opportuni approfondimenti:

- l'indice PMV non è adatto per la valutazione delle condizioni termiche dei pazienti e delle persone vulnerabili ospitate dalle strutture sanitarie; tuttavia, è l'approccio attualmente più utilizzato;
- esiste una discrepanza nelle condizioni di comfort tra personale sanitario e pazienti pertanto è necessario definire e regolare diverse condizioni microclimatiche nelle diverse aree e reparti;
- gli studi riguardano principalmente regioni tropicali con climi caldi e umidi, ma risultati diversi potrebbero essere ottenuti in altre condizioni climatiche;
- pochissimi articoli analizzano l'impatto del controllo passivo con diverse soluzioni di involucro edilizio sul microclima interno negli ospedali.

La necessità di indagare altri indici per definire le condizioni di comfort in ospedale, considerando anche l'impatto di diverse soluzioni di involucro in regioni non tropicali, sono i pilastri principali su cui si basa il presente lavoro. Sviluppa un approccio combinato sperimentale-numerico finalizzato a definire l'indice di comfort termico più adatto alle condizioni del paziente e considerando l'influenza di diversi livelli di controllo passivo attraverso l'intervento sull'involucro edilizio.

Il metodo proposto, che verrà spiegato attraverso l'applicazione a un caso di studio, consiste in tre fasi.

1. Fase sperimentale: vengono monitorate e analizzate le condizioni indoor, contemporaneamente viene sottoposto un questionario al paziente per un giudizio globale sugli ambienti e un voto specifico sulle singole variabili;
2. valutazione analitica: calcolo degli indici termoigrometrici più diffusi e confronto con il giudizio dell'occupante per stabilire tramite un'equazione di normalizzazione quello che meglio descrive i risultati del questionario;
3. analisi numerica: calibrazione del modello numerico delle stanze monitorate e confronto dell'indice di comfort ottimale ottenuto per diverse misure di efficienza per la strategia di retrofit selezionata che migliora le condizioni del paziente.

I risultati dello studio del caso proposto vogliono supportare una definizione più ampia di future proofing che includa varie considerazioni di progettazione come recentemente sottolineato da Memari et al. [209].

Il caso studio è l'ospedale "A. Cardarelli" di Campobasso (Figura 55), con una planimetria e distribuzione degli spazi tipica delle strutture sanitarie esistenti. È stato realizzato negli anni Settanta ed è caratterizzato da una struttura in cemento armato con sei piani fuori terra e un piano interrato. Si possono identificare quattro blocchi rettangolari, di dimensioni rispettivamente 36 m x 13.5 m, 42 m x 13.5 m, 14 m x 13.5 m e 39 m x 13.5 m, disposti su uno pseudo arco da sud a nord. Maggiori dettagli strutturali sono reperibili nel lavoro di Gargaro et al. [210] in cui è stato effettuato il monitoraggio strutturale e sismico dell'ospedale.

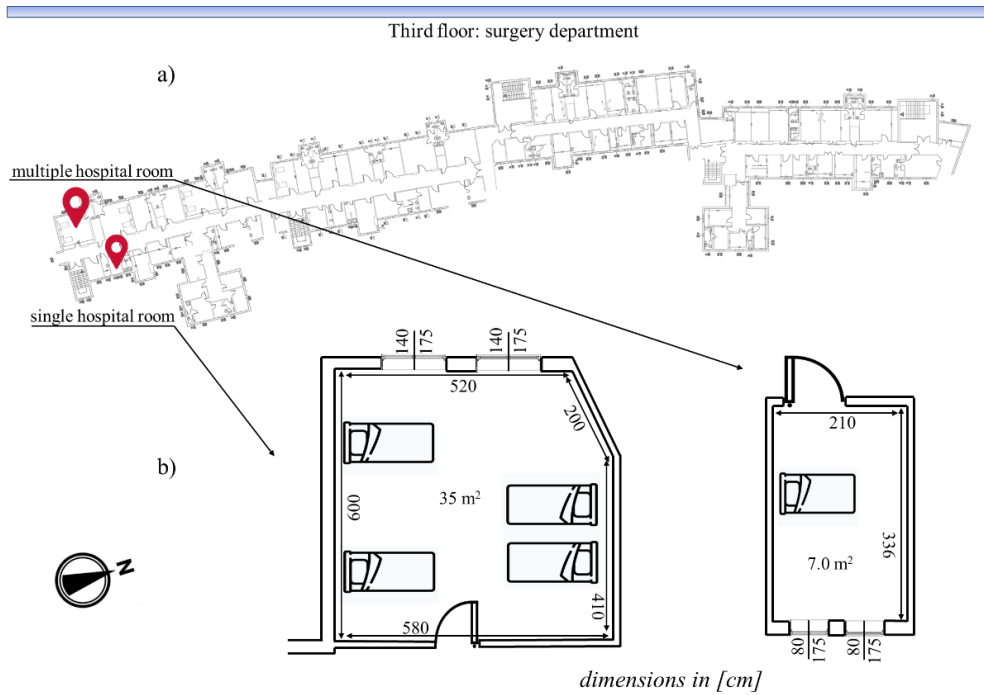
Lo studio è stato condotto nel reparto chirurgico situato al terzo piano, composto da circa 20 stanze di degenza e numerosi uffici del personale medico (Figura 56a). Sono state scelte due diverse stanze del blocco sud, in

quanto differiscono per dimensioni, persone ospitate e orientamento (Figura 56b). La prima è una stanza singola di  $7 \text{ m}^2$  con due finestre e una parete esterna esposta a est. La seconda è una stanza multipla, con quattro posti letto, ( $35 \text{ m}^2$ ) caratterizzata da una parete esterna e due finestre esposte a ovest. Tutte le dimensioni sono riportate nella Figura 56. Le pareti esterne, composte da mattoni forati, sono caratterizzate da uno spessore di 30 cm e una trasmittanza termica di  $1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Entrambe le stanze hanno due finestre in alluminio con vetro singolo trasparente (trasmittanza termica  $5.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) e schermi esterni mobili. La superficie vetrata della stanza singola è di  $2.8 \text{ m}^2$  mentre quelle della stanza multipla hanno una dimensione totale di  $4.9 \text{ m}^2$ .



**Figura 55. Ospedale “Cardarelli” di Campobasso**

Entrambe le stanze non sono dotate di aria condizionata ma solo di termosifoni per la richiesta di riscaldamento. È consentita la ventilazione naturale mentre non è presente una ventilazione centralizzata.



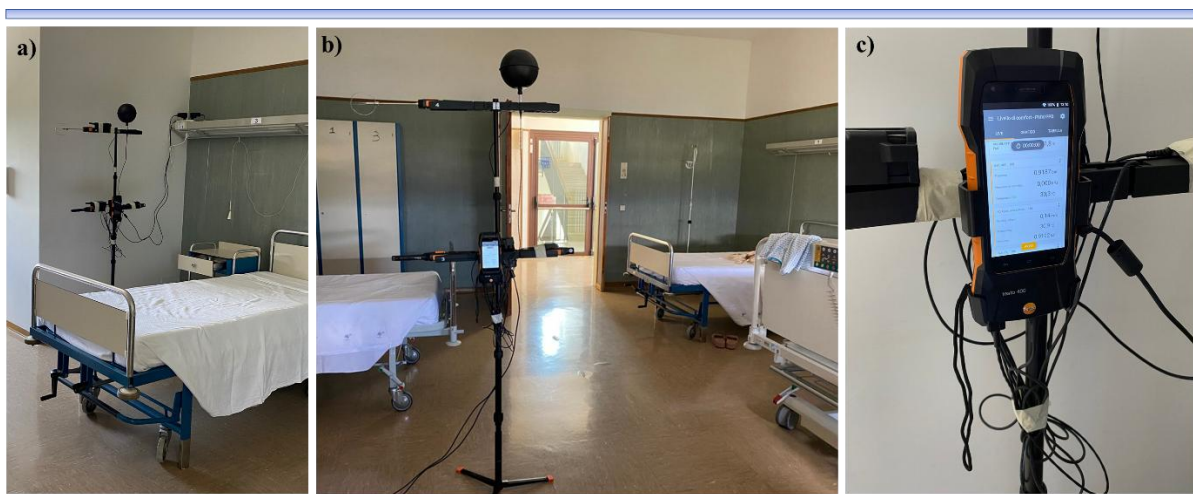
**Figura 56. a) Disposizione del reparto chirurgico b) attenzione alle stanze singola e multipla**

#### 4.3.1. Approccio metodologico

##### ANALISI SPERIMENTALE

Per la campagna sperimentale sono state utilizzate due stazioni stand-alone analoghe, denominate "Testo 400 IAQ and comfort kit". Esse sono configurate per essere adatte alla misurazione dei principali parametri microclimatici indoor: temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità dell'aria e temperatura del globo nero. Esse sono costituite da un data logger e da varie sonde collegate via cavo o via Bluetooth al data logger. Le caratteristiche principali di ciascun sensore sono riportate nella Tabella 24.

Le due stazioni di monitoraggio installate sono illustrate nella Figura 57.



**Figura 57. Stazione autonoma installata a) nella stanza singola e b) nella stanza multipla; c) data logger**

Le misure sono state effettuate durante l'estate 2022 e il periodo di acquisizione dati va dal 25 luglio al 3 agosto, con un passo di acquisizione di 15 minuti. La temperatura media radiante ( $T_{mr}$ ) è calcolata in funzione della temperatura dell'aria e della temperatura del globo nero utilizzando l'Equazione 3.5.

Durante la campagna sperimentale, entrambe le stanze sono state occupate da un paziente e a ciascun paziente è stato somministrato un questionario tre volte al giorno. Tale questionario è suddiviso in diverse sezioni che includono informazioni generali relative al paziente, giudizi sulla temperatura, umidità, velocità dell'aria e qualità dell'aria. Per ogni sezione, il paziente ha la possibilità di scegliere tra diversi giudizi, come si può leggere nella Tabella 34. Le informazioni richieste riguardano anche le condizioni del paziente, sia dal punto di vista personale che clinico, al fine di poter definire una possibile correlazione tra le condizioni fisiche del paziente e la sensazione di comfort termico. Infine, al momento della somministrazione del questionario, è stato annotato l'abbigliamento indossato dal paziente.

<b>INFORMAZIONI GENERALI</b>							
Giudizio espresso in base al tempo trascorso nella stanza	Sempre a letto	Prevalentemente a letto un po' seduto	Un po' a letto un po' seduto sulla sedia	Prevalentemente sulla sedia e un po' a letto	Sempre seduto	Prevalentemente seduto e un po' in piedi	
	Prevalentemente in piedi e un po' seduto	Prevalentemente in piedi e un po' a letto	Un po' a letto un po' in piedi	Prevalentemente a letto un po' in piedi	Sempre in piedi	Tutte e tre le condizioni	
Sensazione percepita al momento	Freddo	Abbastanza freddo	Leggermente freddo	Neutro	Leggermente caldo	Abbastanza caldo	Caldo
Giudizio sulla condizione	Confortevole	Leggermente sconfortevole	Sconfortevole	Molto sconfortevole	Estremamente sconfortevole		
Condizione desiderabile	Molto più freddo	Più freddo	Leggermente più freddo	Nessun cambiamento	Leggermente più caldo	Più caldo	Molto più caldo
Accettabilità delle condizioni climatiche	Si	No					
Giudizio globale sull'ambiente	Perfettamente tollerabile	Leggermente difficile da tollerare	Abbastanza difficile da tollerare	Molto difficile da tollerare	Intollerabile		
<b>TEMPERATURA</b>							
Giudizio	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Sensazione	Freddo	Abbastanza freddo	Leggermente freddo	Neutro	Leggermente caldo	Abbastanza caldo	Caldo
<b>UNIDITA' RELATIVA</b>							
Giudizio	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Sensazione	Secca	Abbastanza secca	Leggermente secca	Neutra	Leggermente umida	Abbastanza umida	Umida
<b>VELOCITA' DELL'ARIA</b>							
Giudizio	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Sensazione	Bassa	Abbastanza bassa	Leggermente bassa	Neutra	Leggermente alta	Abbastanza alta	Alta
<b>QUALITA' DELL'ARIA</b>							
Giudizio	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Sensazione	Cattiva	Abbastanza cattiva	Leggermente cattiva	Neutra	Leggermente buona	Abbastanza buona	Buona
------------	---------	--------------------	---------------------	--------	-------------------	------------------	-------

**Tabella 34. Esempio di questionario somministrato ai pazienti**

### VALUTAZIONE ANALITICA

L'obiettivo dello studio è valutare l'applicabilità di altri indici di comfort basati su parametri indoor quali temperatura dell'aria e umidità relativa. Pertanto, considerando la letteratura scientifica, sono stati calcolati nove indici basati sulla temperatura, quattro indici basati sull'umidità e uno basato su entrambe le variabili. È necessario e fondamentale tenere conto della tipologia di edificio in esame, poiché gli ospedali ospitano persone termicamente vulnerabili, che necessitano quindi di condizioni microclimatiche più ristrette rispetto a qualsiasi altra tipologia di struttura considerata. Inoltre, si considera anche che la struttura non è dotata di ventilazione meccanica. Si prendono in considerazione le norme ISO 7730 [101] e EN 16798 [28] per identificare i valori soglia e il valore ottimale per la temperatura operativa ( $T_o$ ) e l'umidità relativa (RH) al fine di progettare la categoria di ambiente interno più appropriata. Questi sono: Categoria A secondo [101] e Categoria I secondo [28]. ASHRAE specifica che la temperatura operativa potrebbe essere calcolata come il valore medio della temperatura dell'aria e della temperatura radiante media quando la velocità dell'aria è bassa ( $<0.2$  m/s) [95], che è il caso dello studio in esame. Nella Tabella 35 sono riportati i limiti (indici limite superiore e inferiore) e i valori ottimali (indici ottimali) che i parametri dovrebbero assumere. Si noti che la Categoria A si riferisce a uffici, aule o spazi con usi simili, con un tasso metabolico di  $70 \text{ W/m}^2$  e un isolamento degli indumenti pari a  $0.5$  clo. Questa norma non propone intervalli di RH, sostenendo che a temperature moderate ( $<26$  °C) e livelli di attività moderati ( $<2$  met), l'influenza di RH sul comfort termico corporeo è limitata. D'altro canto, la EN 16798 potrebbe essere applicata a edifici senza ventilazione meccanica, in cui vi sono attività sedentarie e l'occupante può aprire o chiudere liberamente le finestre.

		Categoria A (ISO 7730)	Categoria I (EN 16798)	
Temperatura Operativa [°C]		$T_{o,optimal}=24.5^\circ\text{C}$	$T_{o,optimal} = 0.33T_{a,out} + 18.8$	Eq. 4.1
		$T_{o,upper\ limit}=25.5^\circ\text{C}$	$T_{o,upper\ limit} = 0.33T_{a,out} + 18.8 + 2$	Eq. 4.2
		$T_{o,lower\ limit}=23.5^\circ\text{C}$	$T_{o,lower\ limit} = 0.33T_{a,out} + 18.8 - 3$	Eq. 4.3
			$T_{a,out} = 0.2(T_{d-1} + 0.8T_{d-2} + 0.64T_{d-3})$	Eq. 4.4
Umidità Relativa				
[%]	Nessun valore raccomandato		RH= 30%÷50%	

dove:

$T_{a,out}$  è la temperatura media esterna per il giorno considerato [°C];

$T_{d-1}$  è la temperatura media giornaliera dell'aria esterna del giorno precedente [°C];

$T_{d-i}$  è la temperatura media giornaliera dell'aria esterna per l'i-esimo giorno precedente [°C].

**Tabella 35. Valori massimi, minimi e ottimali raccomandati dalle diverse norme**

Gli indici studiati sono descritti di seguito.

- 1) *Temperatura operativa massima in estate (Max  $T_o$ )*

Questo indice, definito in [211], prende in considerazione il valore massimo della temperatura operativa registrata nel periodo analizzato, espresso in °C.

2) *Temperatura operativa media in estate ( $\bar{T}_o$ )*

Questo indice, definito da Li et al. [212], esprime il valore medio della temperatura operativa, su tutto il periodo analizzato, tramite l'Equazione 4.5.

$$\bar{T}_o = \frac{\sum T_o}{\text{total number of occupied hours}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.5)$$

3) *Varianza della temperatura operativa in estate ( $\text{Var } T_o$ )*

Questo indice, definito da Li et al. [212], è la varianza della temperatura operativa nel periodo studiato, calcolata come proposto nell'Equazione 4.6.

$$\text{Var } T_o = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{o,i} - \bar{T}_o)^2}{n-1} \text{ [}^\circ\text{C}^2\text{]} \quad (4.6)$$

dove n è il numero totale di ore occupate.

4) *Numero di ore in estate in cui la temperatura operativa è di 2°C superiore al valore soglia ( $\text{HOURS}_{T_o}$ )*

Questo indice, definito in [213], calcola il numero di ore, nel periodo analizzato, in cui la temperatura operativa supera di 2°C il limite superiore stabilito dagli standard. Viene calcolato utilizzando l'Equazione 4.7.

$$\text{HOURS}_{T_o} = \sum t |_{T_o > T_{o, \text{upper limit}}} \quad (4.7)$$

dove t è il tempo considerato.

Si possono ottenere due valori diversi a seconda dello standard adottato.

5) *Volume di disagio in estate ( $\text{DV}_{T_o}$ )*

Questo indice, definito in [213] restituisce la sommatoria della quantità di gradi di temperatura operativa che supera il limite superiore, moltiplicata per il tempo in cui si verifica tale evento. Si calcola mediante l'Equazione 4.8. Poiché sono state introdotte due norme per il limite sulla temperatura operativa, si possono ottenere due valori.

$$\text{DV}_{T_o} = \sum (T_{T_o > T_{o, \text{upper limit}}} - T_{o, \text{upper limit}}) \cdot t \text{ [}^\circ\text{C h]} \quad (4.8)$$

6) *Percentuale di tempo al di fuori di un intervallo  $T_o$  (%TOTR)*

Questo indice, definito da Li et al. [212], descrive la percentuale di tempo in cui la temperatura operativa non soddisfa le condizioni termiche interne prescritte dagli standard ed è calcolato tramite l'Equazione 4.9.

$$\%TOTR = \frac{\text{number of hours To outside range}}{\text{total number of hours}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.9)$$

7) *Grado-ora della temperatura operativa (DH)*

Questo indice, utilizzato in diversi studi [212] - [215], viene calcolato sommando i fattori di ponderazione e quindi moltiplicandoli per il tempo di esposizione (come mostrato nell'Equazione 4.10). I fattori di ponderazione vengono calcolati in modo diverso, a seconda dello standard considerato (Equazione 4.11 ed Equazione 4.12).

$$DH = \sum wf \cdot t \quad [^{\circ}\text{C h}] \quad (4.10)$$

dove:

$$wf_{iso\ 7730} = 1 + \frac{|T_o - T_{o,limit}|}{|T_{o,optimal} - T_{o,limit}|}, \text{ if } T_o \geq T_{o\ upper\ limit} \text{ or } T_o \leq T_{o\ lower\ limit} \quad (4.11)$$

$$wf_{EN\ 16798} = |T_o - T_{o,limit}|, \text{ if } T_o \geq T_{o\ upper\ limit} \text{ or } T_o \leq T_{o\ lower\ limit} \quad (4.12)$$

8) *Numero di ore di umidità relativa sopra un certo limite (hBELim)*

Restituisce il numero di ore durante le quali l'umidità relativa è sopra il limite massimo (40%) considerando il periodo analizzato. È espresso in h [216].

9) *Numero di ore di umidità relativa al di sotto di un certo limite (hBELim)*

Mostra il numero totale di ore durante le quali l'umidità relativa è inferiore alla soglia minima consentita (30%), considerando il periodo analizzato. È espresso in h [216].

10) *Percentuale RH-ora (%RH)*

Questo indice si ispira all'indice grado-ora ed è stato calcolato per la prima volta da Lopez et al. [217]. È calcolato come la somma del fattore di ponderazione per il periodo in cui si verifica l'evento, utilizzando l'Equazione 4.13. I valori di riferimento per i limiti superiore e inferiore sono forniti dalla norma EN 16798 [28].

$$\%RH - HOUR = \sum wf \cdot t \quad (4.13)$$

dove:

$$wf = |RH - RH_{limit}|, \text{ if } RH \geq RH_{upper\ limit} \text{ or } RH \leq RH_{lower\ limit} \quad (4.14)$$

### 11) Percentuale di tempo fuori da un intervallo di UR (%tRH)

Questo indice valuta la percentuale di tempo in cui l'umidità relativa è fuori dall'intervallo previsto dalla norma EN 16798 (30-50%).

### 12) Indicatore basato sulla temperatura-RH (TRH)

È un indicatore sviluppato da Lopez et al. [217] e rappresenta la percentuale di tempo in cui RH e T<sub>o</sub> sono simultaneamente entro i valori limite definiti dalla norma EN 16798. Una percentuale elevata indica che la stanza è stata confortevole per la maggior parte delle ore.

Poiché gli indicatori sono riferiti a variabili diverse e non hanno limiti confrontabili, si suggerisce il seguente approccio per l'analisi:

1. Supponendo il timestep orario, per ogni giorno gli indicatori raggruppati in famiglie in base a come sono calcolati, vengono valutati per stanze singole e multiple e confrontati con la percezione dell'occupante (se possibile).
2. Confrontare i risultati degli indicatori dopo la loro normalizzazione per trovare l'indice che approssima bene il giudizio dell'occupante normalizzato e che può essere utilizzato come riferimento per la progettazione della ristrutturazione. Questa scelta viene effettuata mediante il calcolo della variazione dell'indice di comfort rispetto alla sensazione soggettiva (VSS).

La normalizzazione viene effettuata considerando i valori minimo, medio e massimo dell'indice nel periodo sperimentale (Equazione 4.15). I valori normalizzati possono assumere valori compresi tra 0 e 1, dove 0 rappresenta la condizione più confortevole e 1 quella peggiore.

$$x_N = \frac{\bar{x} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (4.15)$$

dove:  $x_N$  è il valore normalizzato;  $\bar{x}$  è il valore medio;  $x_{min}$  è il valore minimo;  $x_{max}$  è il valore massimo nel periodo analizzato.

## ANALISI NUMERICA

Partendo dalle informazioni disponibili attraverso ispezioni e misurazioni in situ nonché dalla documentazione tecnica fornita dall'ufficio di manutenzione dell'ospedale, viene sviluppato il modello numerico delle stanze analizzate mediante EnergyPlus [33] attraverso l'interfaccia grafica DesignBuilder [32]. L'algoritmo utilizzato è il "Transfer Function by Conduction" con un passo temporale di 6. Per le condizioni al contorno esterne, è stato utilizzato il file climatico che descrive i dati storici per la città di Campobasso, denominato "Campobasso 162520 (IGDG)". Mentre le condizioni interne dei carichi termici (occupazione, luci artificiali e apparecchiature elettriche) nonché le opportune programmazioni sono impostate in base ai valori dichiarati nei questionari.

Poiché l'analisi è focalizzata sulle condizioni termiche nell'ospedale, il modello è calibrato seguendo il modello di calibrazione dell'intero edificio con dati orari introdotti dalle Linee guida M&V [31], considerando come parametri la temperatura dell'aria interna, la temperatura media radiante e l'umidità relativa. Nello specifico, i parametri misurati sono confrontati con quelli risultanti dalla simulazione. Tutti gli indici calcolati per la calibrazione sono riassunti nella Tabella 36, con la loro espressione e i valori accettabili. Nella Tabella 36,  $N_{interval}$  è il numero di intervalli di tempo nel periodo monitorato, S e M sono rispettivamente i dati simulati e monitorati.

Indice	Equazione	Valore accettabile
Hourly error	$ERR_{hourly} = \frac{M - S}{M} 100$	$\pm 30\%$
Mean Bias Error	$MBE_{\%} = \frac{\sum_{Period} (S - M)_{interval}}{\sum_{Period} M_{interval}} 100$	$\pm 10\%$
Root Mean Square Error	$RMSE_{period} = \sqrt{\frac{\sum (S - M)_{interval}^2}{N_{interval}}}$	
Coefficient of Variation of Root Mean Square Error	$Cv(RMSE_{period}) = \frac{RMSE_{period}}{A_{period}} 100$	30%
Mean of the Measured Data	$A_{period} = \frac{\sum_{Period} M_{interval}}{N_{interval}}$	

**Tabella 36. Indice di calibrazione e valori accettabili**

Una volta calibrato il modello numerico, è possibile testare diversi interventi sull'involucro edilizio con l'obiettivo di migliorare le condizioni di comfort indoor facendo riferimento all'indice di comfort ottimale trovato nel passaggio precedente. Gli interventi devono essere selezionati in base alle criticità rilevate ma anche tenendo conto dei vincoli tecnici e della minimizzazione dell'interruzione del lavoro medico nonché delle risorse finanziarie. Per ogni intervento selezionato e per la loro combinazione, può essere calcolato l'indice di comfort ottimale; il pacchetto di misure di efficienza che massimizzano l'indice può essere quindi valutato in termini di variabile indoor e anche di efficienza energetica.

### 4.3.2. Risultati

#### *RISULTATI SPERIMENTALI*

Il periodo di monitoraggio è caratterizzato da tipiche condizioni estive come riportato nella Tabella 37, con temperature solitamente comprese tra più di 17.5°C e meno di 39°C. Si sono verificati solo tre giorni di pioggia ma è stata registrata un'intensità di precipitazione molto bassa. Poiché i giorni sono comparabili in termini di sollecitazione esterna, l'analisi seguente si concentra sul 28 luglio, che può essere considerato un giorno estivo.

	Temperatura [°C]			Umidità [%]	Velocità del vento [m/s]	Nuvolosità [%]	Pioggia [mm]	
	Max	Min	Media	Media	Media	Media	Media	Max
<b>25 luglio</b>	38.6	20.5	27.9	43.3	1.8	11.1	-	-
<b>26 luglio</b>	37.9	19.1	26.1	59.3	2.2	36.7	0.05	0.3
<b>27 luglio</b>	36.6	19.0	25.6	60.0	2.0	24.8	0.03	0.2
<b>28 luglio</b>	34.5	17.7	25.8	57.7	1.4	14.2	-	-
<b>29 luglio</b>	37.1	19.2	27.4	41.4	1.5	4.6	-	-
<b>30 luglio</b>	35.8	17.8	25.4	53.9	3.1	13.7	0.01	0.1
<b>31 luglio</b>	29.1	17.9	22.5	65.6	2.3	35.7	-	-
<b>01 Agos</b>	31.7	17.5	23.9	36.9	3.7	2.8	-	-
<b>02 Agos</b>	33.3	18.5	25.3	35.0	3.1	3.2	-	-
<b>03 Agos</b>	32.6	18.9	25.5	39.0	0.1	11.0	-	-

Tabella 37. Riepilogo dei dati meteorologici durante il periodo di monitoraggio

La Figura 58 mostra l'andamento orario delle variabili monitorate: T è la temperatura esterna, RH è l'umidità relativa,  $w_s$  è la velocità del vento e clou indica la nuvolosità. Durante il periodo di monitoraggio il cielo è sempre stato sereno senza intensi fenomeni ventosi. La temperatura e l'umidità relativa hanno avuto l'andamento di una tipica giornata estiva: la temperatura ha raggiunto i valori massimi nel pomeriggio per poi diminuire la sera mentre l'umidità relativa ha assunto un valore minimo in corrispondenza del valore massimo della temperatura.

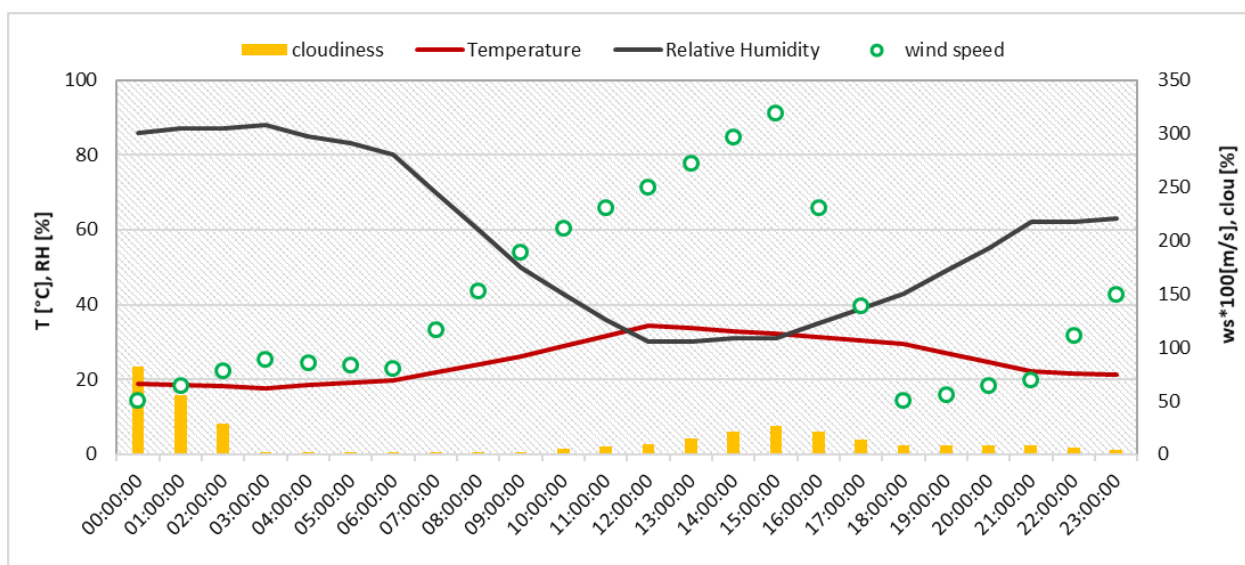


Figura 58. Condizioni meteo esterne 28 luglio 2022

Il risultato del monitoraggio dei dati interni relativi alla stanza singola è mostrato nella Figura 59. Qui,  $T_a$  e  $T_{mr}$  sono rispettivamente la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante,  $RH_a$  è l'umidità relativa e  $v_a$  è la velocità dell'aria. Innanzitutto, si può notare che  $v_a$  è sempre inferiore a 0.06 m/s e solo quando l'occupante apre le finestre si verifica un leggero fenomeno di corrente d'aria con un valore di picco di circa 0.22 m/s. Il contributo delle ventilazioni naturali non è adeguato a migliorare le condizioni interne; infatti il valore della

temperatura dell'aria è solitamente superiore a 26 °C e inoltre il valore della temperatura media radiante è anche di 1 °C più alto. La condizione peggiore si raggiunge nelle prime ore serali quando anche la parete inizia a scaricarsi, a causa della sua bassa inerzia termica.

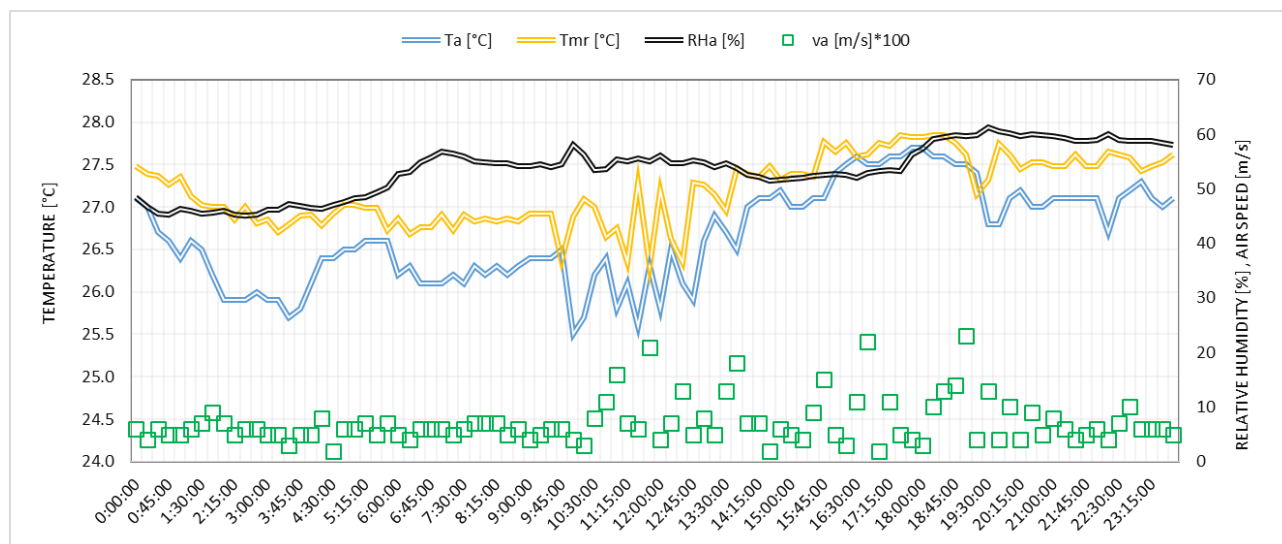


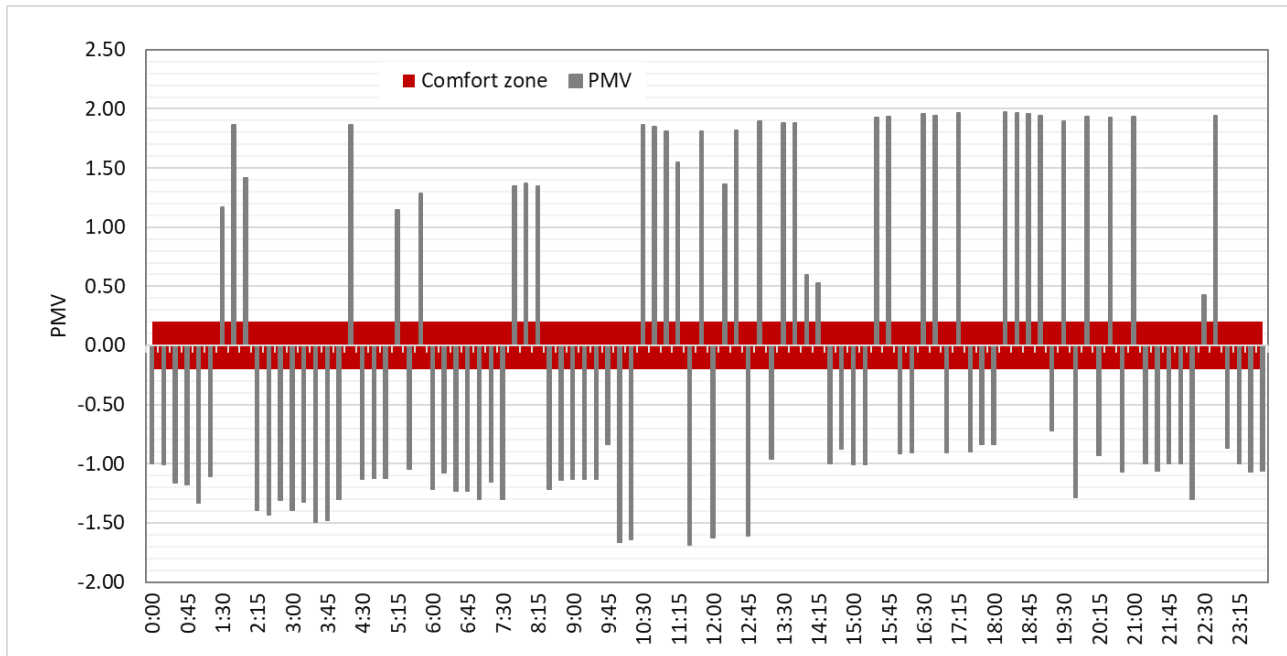
Figura 59. Dati interni relativi alla camera singola, 28 luglio 2022

L'umidità relativa invece rimane pressoché costante durante il giorno e non è lontana dall'intervallo accettabile con un valore medio giornaliero del 55%. Ciò significa che il carico interno non provoca fenomeni di generazione di vapore costantemente elevati e che al sistema meccanico dovrebbe essere richiesto solo un livello medio di intervento. In breve, si possono sottolineare due aspetti: 1. l'importanza della ventilazione che, quando attivata (tarda mattinata), può aiutare a ridurre la temperatura e quindi dovrebbe essere assicurata da un sistema meccanico o se naturale, con una programmazione più appropriata; 2. l'andamento della  $T_{mr}$  suggerisce che l'involucro edilizio non può garantire il controllo passivo delle condizioni interne e non può evitare il surriscaldamento estivo, quindi sono consigliabili azioni di ristrutturazione.

Questi punti critici possono essere notati anche concentrandosi sull'andamento interno ed esterno nel periodo di tempo tra le 11:00 e le 14:00 quando viene raggiunto il valore di picco della temperatura esterna e di  $w_s$ . La  $T_a$  è vicina ai 26°C ma il paziente è probabilmente influenzato dalla maggiore radiazione solare in arrivo dalla finestra e apre la finestra così la temperatura media radiante continua ad aumentare mentre la temperatura dell'aria diminuisce a causa della maggiore velocità dell'aria. Invece tra le 17:00 e le 19:00, le pareti iniziano a restituire il calore accumulato infatti la  $T_{mr}$  e la  $T_a$  sono comparabili e queste sono anche vicine alla temperatura esterna che alle 19:00 è di 27°C.

Partendo dal valore monitorato e assumendo come isolamento dell'abbigliamento 0.5 clo, come dichiarato dal paziente, e senza considerare la resistenza termica delle lenzuola del letto, è stato calcolato il PMV orario e confrontato con la zona di comfort normativa, come riportato nella Figura 60. L'effetto combinato delle condizioni interne sembra descrivere una stanza molto non confortevole poiché durante le prime ore del mattino la sensazione è fredda o piuttosto fredda ma quando la radiazione solare in arrivo aumenta, a partire

dalla tarda mattinata, la sensazione raggiunge quella calda (PMV uguale a +1.7). La continua variazione nell'andamento del PMV suggerisce anche uno scarso controllo passivo e che la ventilazione naturale potrebbe causare rischio di correnti d'aria.



**Figura 60. Dati di comfort relativi alla camera singola, 28 luglio 2022**

Le stesse considerazioni possono essere fatte per la stanza multipla. In questo caso è più evidente la cattiva prestazione dell'involucro edilizio che non riesce a controllare le condizioni interne poiché  $T_{mr}$  e  $T_a$  hanno gli stessi profili. Come riportato in Figura 61, le temperature sono solitamente superiori a 28 °C e solo durante la notte, quando c'è un picco di ventilazione dell'aria (0.2 m/s) queste scendono fino a 26 °C. Invece durante la tarda mattinata e la notte, quando il paziente apre la finestra questo valore di ventilazione non contribuisce a migliorare il valore della temperatura. L'umidità relativa mostra piccole variazioni tra il 43% e il 58% ma, come si può vedere, rimane comunque nei pressi dell'intervallo accettabile.

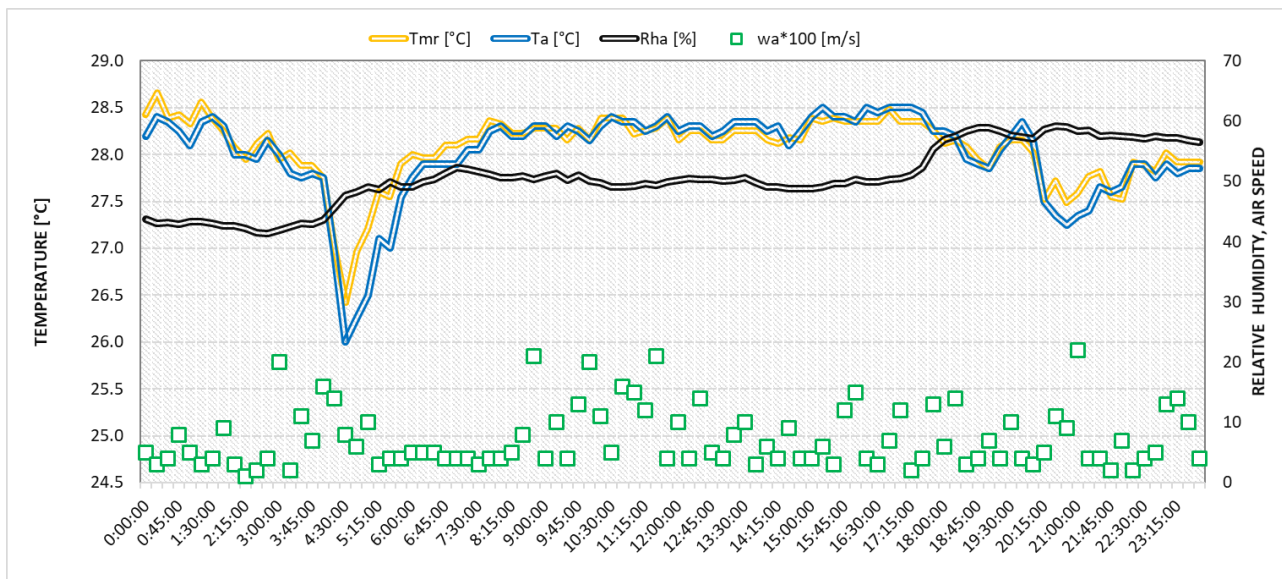


Figura 61. Dati interni relativi alla sala multipla, 28 luglio 2022

La Figura 62 riporta l'andamento orario del PMV calcolato con il valore monitorato e considerando un valore di resistenza dell'abbigliamento pari a 0.8, come dichiarato dal paziente che rimane sempre a letto. Anche in questo caso, secondo l'indice considerato, si raggiungono condizioni molto disagiate con PMV al di fuori della zona di comfort e spesso superiore a +2.

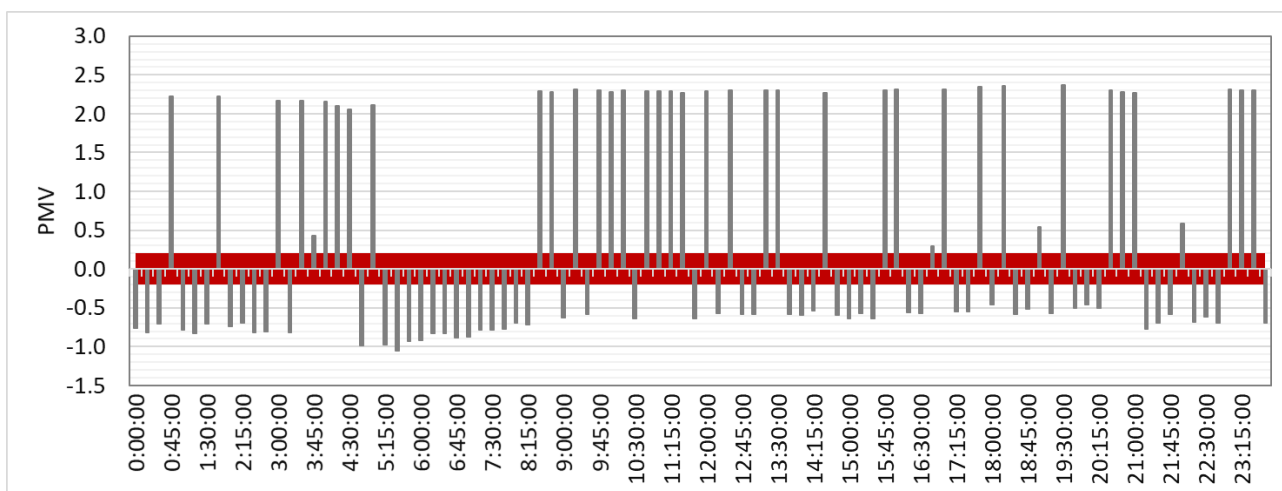


Figura 62. Dati di comfort relativi alla camera multipla, 28 luglio 2022

Considerando tutti gli altri giorni, i valori registrati portano a PMV orari che non rientrano mai nei limiti della zona di comfort, di conseguenza il paziente si trovava in una condizione di malessere generale.

Considerando la risposta per il giorno esaminato, nella stanza singola, il paziente dichiara intorno alle 14:00 che la sensazione è leggermente non confortevole e leggermente non tollerabile. Il voto associato alla temperatura è +1 mentre la neutralità caratterizza tutte le altre variabili. Il PMV calcolato alla stessa ora è +1.67 quindi è sufficientemente discordante con i voti dichiarati. Analogamente, nella stanza multipla, il paziente risponde alle 14:00 e dice che la sensazione è leggermente non confortevole e leggermente non

tollerabile. Inoltre, per la percezione della temperatura il voto è +2 mentre è zero per tutte le altre variabili. È completamente in disaccordo con il PMV calcolato che è -0.60.

Discrepanze comparabili sono state ottenute con il confronto della risposta negli altri giorni. Infine, il PMV non descrive accuratamente le condizioni indoor. Inoltre, le risposte, più in generale, indicano che i pazienti potrebbero beneficiare di un intervento sul controllo passivo o attivo.

#### ANALISI ANALITICA DELL'ADOZIONE DI DIVERSI INDICI DI COMFORT

Per ottenere il livello di comfort all'interno delle due stanze, sono stati analizzati gli indici di comfort precedentemente descritti e i valori ottenuti sono stati confrontati con le opinioni espresse dai pazienti. Gli indici, divisi per famiglie, sono riportati per il 28 luglio in modo da evidenziare le differenze nei valori ottenuti (Tabella 38).

Più in generale, tutti gli indici confermano una condizione di non comfort all'interno di entrambe le stanze con situazione più critica nella stanza multipla; inoltre, considerando l'applicazione di diversi standard di riferimento ci sono alcune variazioni negli indici calcolati ma il risultato finale è sempre in accordo con le percezioni degli occupanti e cioè le stanze sono troppo calde. Infatti, considerando gli indici di temperatura, la temperatura operativa presenta una bassa variazione vicino al valore medio di 27 °C e 28 °C rispettivamente nella stanza singola e multipla. La diversa esposizione causa una differenza di circa 1 °C tra le stanze e questo suggerisce che il comportamento della superficie vetrata in termini di controllo solare è davvero scarso principalmente in quella esposta a ovest.

	<i>Stanza singola</i>	<i>Stanza multipla</i>
	<b>Temperatura</b>	
$Max T_o$	27.8°C	28.4°C
$\bar{T}_o$	26.9°C	28.0°C
$Var T_o$	0.26°C <sup>2</sup>	0.09°C <sup>2</sup>
$HOURS_{T_o7730}$	24	24
$HOURS_{T_o16798}$	24	24
$DV_{T_o7730}$	816°C h	1452°C h
$DV_{T_o16798}$	1036°C h	1673°C h
$\%TOTR_{7730}$	100%	100%
$\%TOTR_{16798}$	100%	100%
$DH_{7730}$	1392°C h	2028°C h
$DH_{16798}$	1036°C h	1673°C h
	<b>Temperatura e Umidità Relativa</b>	
$TRH$	0%	0%
	<b>Umidità Relativa</b>	
$hABlim$	18 h	13 h
$hBELim$	0 h	0 h
$\%tRH$	75%	54%

Tabella 38. Variabilità degli indici di comfort, 28 luglio

Per tutto il giorno, nelle stanze, la temperatura operativa è superiore a 25.5°C con la norma UNI 7730 e 25.1°C con l'approccio adattivo e quindi il volume di disagio è elevato principalmente considerando l'approccio

adattivo poiché c'è una differenza maggiore tra il  $T_o$  calcolato e il valore ideale. Allo stesso modo, considerando l'intervallo di  $T_o$  accettabile, che nel caso dello standard adattivo per la temperatura esterna considerata è 20.1 – 25.1°C, l'indicatore %TOTR raggiunge il valore massimo. In questo caso i gradi ora sono più alti nel caso dello standard UNI 7730 ma questo dipende dalla definizione. In entrambi i casi viene evidenziato un problema di surriscaldamento.

Invece, gli indici per l'umidità relativa suggeriscono che senza il controllo latente, l'umidità relativa non scende sotto il limite inferiore, ma è frequentemente superiore al 50% principalmente nella singola stanza (75% del tempo), quindi è consigliabile l'installazione di un deumidificatore meccanico o di un alto livello di ventilazione. Infine, a causa delle cattive prestazioni in termini di temperatura operativa, TRH è nullo in entrambe le stanze.

Infine, si può notare che in entrambe le stanze,  $DH_{16798}$  e  $DV_{T_{016798}}$  assumono lo stesso valore perché la temperatura operativa non scende mai sotto il limite inferiore e il tempo di esposizione a condizioni di disagio coincide con l'intera giornata.

La stessa analisi per gli altri giorni suggerisce l'elevata variabilità dell'indice di comfort; hBELim è sempre uguale a zero e quindi l'umidità non scende mai al di sotto del 30% quindi, nella seguente ottimizzazione non viene presa in considerazione. Il giorno con maggiore differenza nei valori dell'indice è il 31 luglio ma questo permette di comprendere l'influenza delle condizioni esterne sul microclima interno. Questo giorno è caratterizzato dalla temperatura media giornaliera più bassa e dalla nuvolosità e umidità media giornaliera più elevate. Dalla Tabella 39 è chiara la variabilità delle condizioni interne per la diversa esposizione e in questo caso la stanza singola è caratterizzata da condizioni abbastanza confortevoli con bassa temperatura e solo poche ore fuori dal range di comfort mentre nella stanza multipla si verificano le stesse condizioni di surriscaldamento del giorno precedente. Il diverso comportamento è in parte attribuibile alle caratteristiche dell'involucro edilizio; infatti, la stanza multipla ha due pareti esposte esternamente e una maggiore superficie vetrata quindi ci sono maggiori guadagni di calore in entrata e anche con condizioni esterne più praticabili non è in grado di prevenire il surriscaldamento. La stanza singola invece ha una sola parete sul lato esterno e questo permette di bilanciare meglio la forzatura esterna con solo il 42% di ore di disagio secondo l'approccio adattivo.

	<i>Stanza singola</i>	<i>Stanza multipla</i>
	<b>Temperatura</b>	
$Max T_o$	25.9°C	27.3°C
$\bar{T}_o$	24.1°C	26.4°C
$Var T_o$	1.4°C <sup>2</sup>	0.18°C <sup>2</sup>
$HOURS_{T_{07730}}$	1	24
$HOURS_{T_{016798}}$	10	24
$DV_{T_{07730}}$	0.38°C h	514°C h
$DV_{T_{016798}}$	51.2°C h	1004°C h
$\%TOTR_{7730}$	4%	100%
$\%TOTR_{16798}$	42%	100%
$DH_{7730}$	137°C h	1090°C h
$DH_{16798}$	123°C h	1004°C h

<i>TRH</i>	<b>Temperatura e Umidità Relativa</b>	
	0%	0%
	<b>Umidità Relativa</b>	
<i>hABlim</i>	12 h	11 h4
<i>hBELim</i>	0 h	0 h
<i>%tRH</i>	50%	6%

**Tabella 39. Variabilità degli indici di comfort, 31 luglio**

È stata eseguita la normalizzazione degli indici calcolati e successivamente è stato calcolato il VSS, considerando per ciascuna categoria di indice il giudizio normalizzato dell'occupante. Più in dettaglio, PJ(T) rappresenta il valore normalizzato del voto che gli occupanti danno alla percezione della temperatura nel loro questionario e il VSS è stato calcolato per gli indici di "temperatura" considerando questo valore; similmente, GPJ è il voto globale al microclima (risposta alla domanda "Giudizio sulla condizione") e PJ(RH) è il voto per la percezione dell'umidità relativa.

La Figura 63 mostra i valori normalizzati di ogni indice di comfort e la percentuale nel caso della stanza singola. Il VSS suggerisce che non è facile conoscere la percezione reale a causa della natura soggettiva del comfort, ma per il caso di studio e la stanza singola il PMV non è l'indice migliore né il peggiore. Più in dettaglio, considerando la temperatura operativa, la descrizione migliore è data dal volume di disagio quando viene considerato lo standard adattivo ma anche dai gradi-ora con entrambi gli standard di riferimento. Da questa analisi invece emerge che la percentuale di tempo in cui i requisiti termici corrispondenti alla temperatura interna non sono soddisfatti e quindi non sembra adeguata per il caso studio. Probabilmente questo indice è troppo influenzato dalla variazione delle condizioni interne dovuta all'assenza di controllo climatico e alla bassa qualità dell'involucro edilizio. Inoltre, le altre due categorie considerate danno una descrizione inaccettabile del voto normalizzato, poiché il VSS per TRH è -46% e questo significa che i pazienti hanno dato un giudizio più positivo sulla qualità globale rispetto a quello fornito dall'analisi statistica di temperatura e umidità relativa. Per quanto riguarda il contenuto di vapore dell'aria, il voto normalizzato è inferiore agli indici calcolati e quindi per i pazienti la percezione è meno buona rispetto ai valori monitorati.

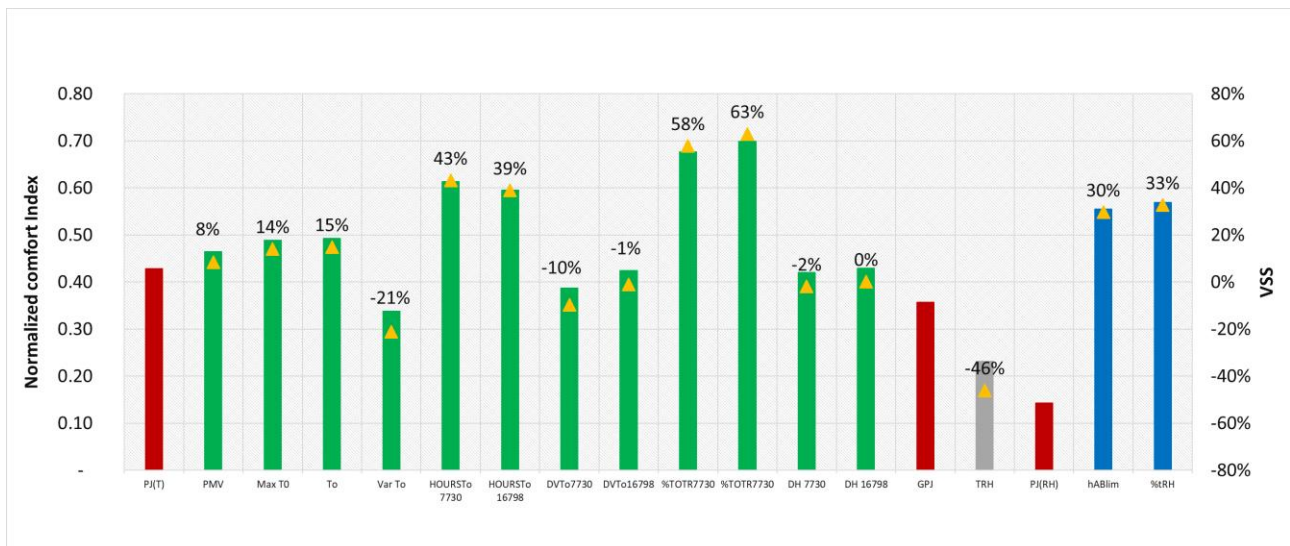


Figura 63. Indici di comfort e variazione percentuale rispetto al giudizio del paziente, stanza singola

Gli stessi calcoli sono proposti per la stanza multipla nella Figura 64.

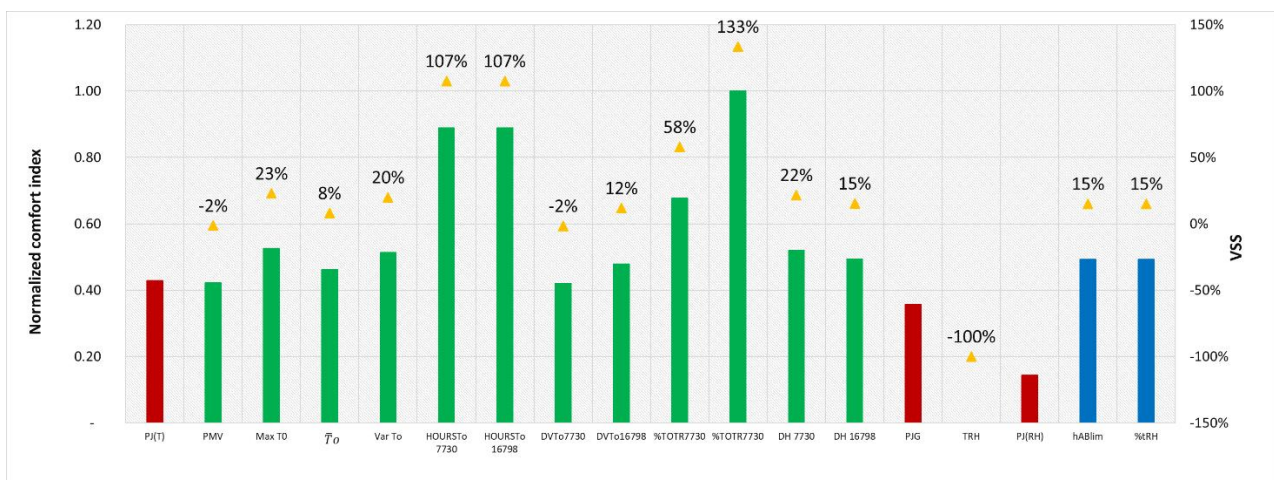


Figura 64. Indici di comfort e variazione percentuale rispetto al giudizio del paziente, stanza multipla

Nel caso della stanza multipla, l'indice con il valore VSS più basso (-2%) è di nuovo il volume di disagio ma con l'applicazione della norma 7730; tuttavia anche il PMV sembra adeguato a descrivere le condizioni indoor. Come nel caso precedente l'HOUR<sub>TO</sub> ma anche il %TOTR sono davvero lontani dalla percezione dei pazienti. Le conclusioni sull'indice per la considerazione combinata di temperatura e umidità e anche per gli indici dei valori di umidità relativa danno la stessa indicazione della stanza singola.

Più in generale, la natura soggettiva della percezione del comfort determina un risultato diverso in termini di indici matematici ottimali per descrivere le condizioni indoor nelle stanze di degenza e non è sempre vero che gli indici statici non siano adeguati a questo tipo di struttura. Secondo i dati raccolti possono essere utilizzati il volume di disagio, il PMV e i gradi-ora; mentre gli indici basati sul calcolo del numero di ore in cui la temperatura è fuori da un intervallo di soglia o sopra un certo numero non sono adatti a questo settore. Allo

stesso tempo, per gli indici considerati sull'umidità relativa e la misura combinata di umidità e temperatura è stata dimostrata la non applicabilità.

Va inoltre sottolineata la principale limitazione dell'analisi proposta circa il numero di questionari e il limitato periodo di monitoraggio. Infatti, l'analisi necessita di essere confermata con altre campagne sperimentali che saranno condotte in un altro ospedale della stessa regione o del sud Italia in modo da avere un andamento delle condizioni esterne comparabile. Tuttavia, l'obiettivo dei risultati proposti è quello di iniziare a testare un metodo e di evidenziare quanto sia importante collegare la progettazione di ristrutturazione dell'ospedale a una valutazione accurata del comfort termico dove la natura soggettiva di questa questione è estremamente importante.

### *RISULTATI DELLA SIMULAZIONE*

L'ultima fase del metodo introdotto si basa sulla calibrazione del modello numerico delle stanze definite in base alle informazioni rilevate. Considerando le variabili utilizzate per l'analisi precedente, la calibrazione viene effettuata per i valori di temperatura dell'aria e temperatura media radiante dell'aria. La Figura 65a mostra l'errore orario per la temperatura dell'aria e la Figura 65b per la temperatura media radiante per la stanza multipla ma gli andamenti sono confrontabili con quelli della stanza singola che per brevità non vengono riportati. Più in dettaglio, è chiaro che gli andamenti misurati e simulati sono confrontabili e l'errore orario medio per l'intero periodo considerato è -6% nel caso della temperatura dell'aria e -10% per la temperatura media radiante. Questo indicatore è -10% per entrambe le temperature nel caso della stanza singola.

La Tabella 40 mostra tutti gli indicatori di calibrazione calcolati per entrambe le variabili e per entrambe le stanze e questi sono inferiori ai valori soglia.

	MBE ( $T_a$ )	MBE ( $T_{mr}$ )	CV (RMSE <sub>hourly</sub> ) ( $T_a$ )	CV (RMSE <sub>hourly</sub> ) ( $T_{mr}$ )
Stanza singola	-10%	-10%	12%	11%
Stanza multipla	-6%	-9%	7%	10%

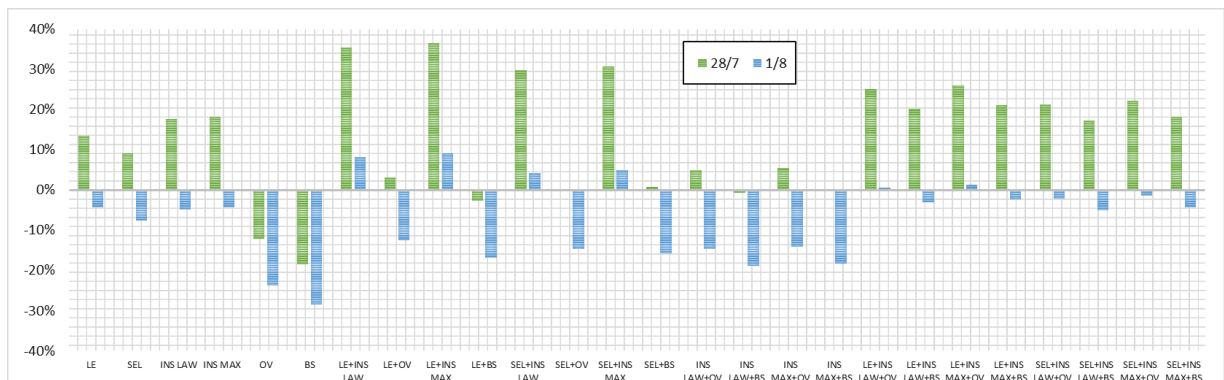
**Tabella 40. Parametri statistici calcolati per la calibrazione del modello numerico**



Installazione di sistemi di vetrate basso emissive (LE) e selettive (SEL). Queste finestre hanno una cavità riempita di argon (6/13/6 mm) e un telaio in alluminio con trasmittanza termica rispettivamente pari a  $1.49 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  e  $1.34 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . La finestra LE ha un fattore solare di 0.568 e una trasmittanza visibile di 0.745, mentre la soluzione SEL ha un fattore solare di 0.419 e una trasmittanza visibile di 0.682. Per quanto riguarda i sistemi di ombreggiamento, viene esplorata l'adozione di due sistemi esterni fissi: Louvre di proiezione di 1.0 m (BS) e tende a sbalzo orizzontale di 1.0 m (OV).

Per ogni scenario descritto è stata valutata la variazione dell'indice di comfort ottimale per comprendere quale potrebbe essere la scelta migliore per la ristrutturazione. La variazione è stata calcolata per i giorni del periodo di monitoraggio per i quali è stato calibrato il modello.

La Figura 66 mostra il calcolo per due giorni considerando come indice ottimale per la stanza singola  $DVT_{o16798}$ ; il 28 luglio è stato presentato anche per l'altra analisi e il 1° agosto è caratterizzato dai maggiori risparmi. Più in generale si può osservare che ci sono sensibili variazioni nella possibile riduzione dell'indice di comfort considerato in giorni diversi ma ci sono anche misure di efficienza che possono influenzare negativamente le condizioni indoor. In dettaglio, l'adozione di sistemi di ombreggiamento esterni è sempre una soluzione adatta; il caso migliore è l'adozione di Louvre di proiezione con cui il disagio può essere ridotto dal -11% del 25 luglio al 29% del 1° agosto.



**Figura 66. Variazione ottimale dell'indice di comfort dopo l'ammodernamento, per stanza singola**

Altri tipi di misure possono essere efficaci con peso diverso nei giorni considerati. Ad esempio, l'isolamento con entrambi gli spessori considerati combinato con BS garantisce una riduzione delle ore di disagio di circa l'8% durante il 1° agosto e di circa lo 0.5% il 28 luglio. Invece non sembra mai consigliabile la sostituzione della finestra esistente con una più efficiente. Infatti, durante l'estate, i sistemi isolati anche con un fattore solare inferiore hanno un peso maggiore nell'incremento dei guadagni di calore e nella riduzione delle perdite di calore e contribuiscono ad aumentare il surriscaldamento.

La Figura 67 mostra la stessa analisi per la stanza multipla, ma considerando come indice ottimale  $DV_{To7730}$ . In questo caso un numero maggiore di misure di efficienza assicura la riduzione del periodo di disagio. Infatti, per tutti i giorni la sostituzione delle finestre con sistema selettivo può ottenere una riduzione di circa il -10% per tutti i giorni; questo risparmio diventa circa il -20% o superiore quando questa misura è combinata con l'ombreggiatura esterna (-24% con OV e -30% con BE durante il 1° agosto).



**Figura 67. Variazione ottimale dell'indice di comfort dopo l'ammodernamento, per stanza multipla**

In questo caso, l'esposizione della stanza attribuisce maggiore importanza al contrasto agli apporti solari e sembra davvero efficace l'intervento su questo tipo di componenti. L'isolamento invece, ancora una volta, è sconsigliabile perché quando è l'unica misura di efficienza applicata contribuisce ad aumentare il surriscaldamento interno (+37% con INS MAX il 27 luglio). Tuttavia, anche quando è abbinato ad altre misure, solo in pochi giorni consente di ridurre la temperatura operativa; ad esempio, nella configurazione SEL+INS LAW+BS la riduzione dell'indice analizzato è del -22% per il 25 luglio ma diventa un incremento del +4.5% per il 28 luglio e mediamente, per le condizioni esterne considerate, non è efficace per migliorare le condizioni interne durante l'estate.

Per dare un'informazione globale sulla modifica delle variabili indoor grazie alle misure di efficienza proposte, è necessario analizzare la distribuzione statistica per tutto il periodo considerato. Quindi, per il caso di studio, considerando i valori simulati per entrambe le stanze e gli interventi più interessanti, vengono proposti i box-plot per la temperatura operativa e l'umidità relativa.

La Figura 68 mostra il riepilogo a sei cifre dell'insieme di dati per la stanza singola per il caso base (simulazione della stanza reale) e le misure di efficienza migliori e peggiori. All'interno del box è indicato il valore medio della distribuzione ed è chiaro che solo l'adozione di BS consente di minimizzare la temperatura operativa poiché si verifica una riduzione di 0.8 °C del valore massimo, con un abbassamento del primo e terzo quartile che indicano una distribuzione dei dati spostata verso il basso. Anche la distribuzione dell'altro tipo di schermature (OV) indica un opportuno decremento della condizione di disagio, invece la distribuzione di INS MAX conferma che la massimizzazione del livello di isolamento può contribuire al peggioramento delle condizioni interne in estate negli edifici ventilati naturalmente. Infatti, il valore medio è più alto di 0.4°C, il massimo è comparabile e il minimo è più alto di 0.6°C.

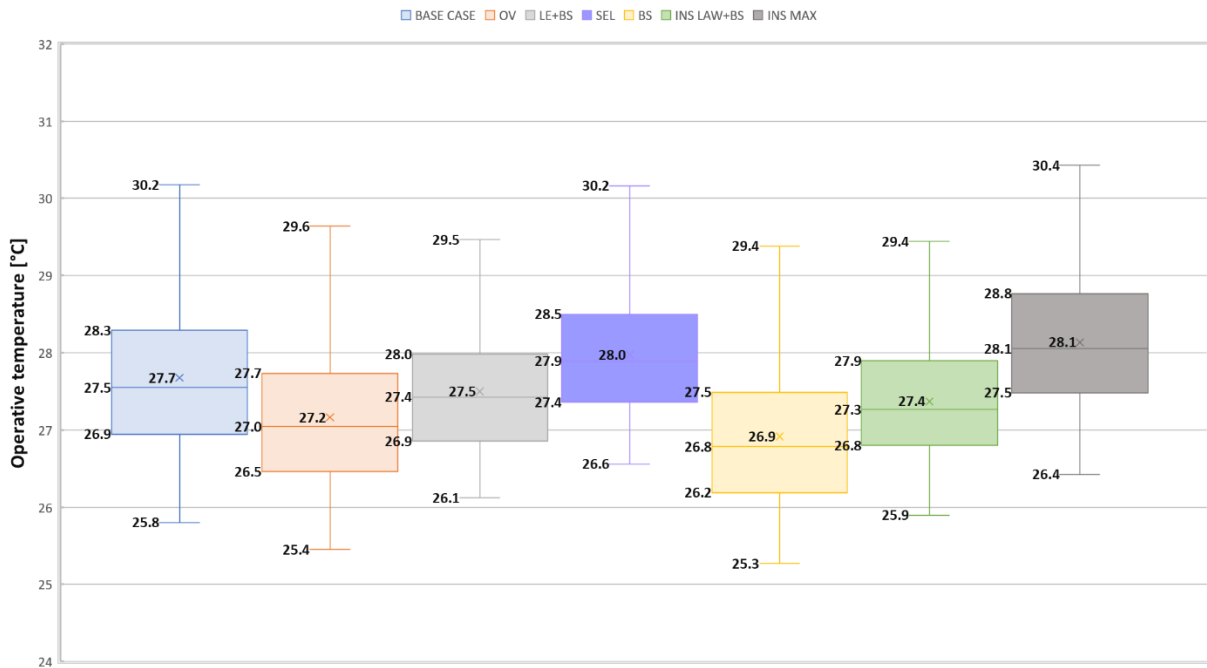


Figura 68. Temperatura operativa: distribuzione cumulativa per la stanza singola

La Figura 69 mostra la distribuzione dei valori per l'umidità relativa per gli stessi scenari. È chiaro che in tutti gli scenari ristrutturati la distribuzione scende a valori medi inferiori e la distribuzione è più simmetrica con il valore medio e mediano vicino al 43% per i migliori interventi.

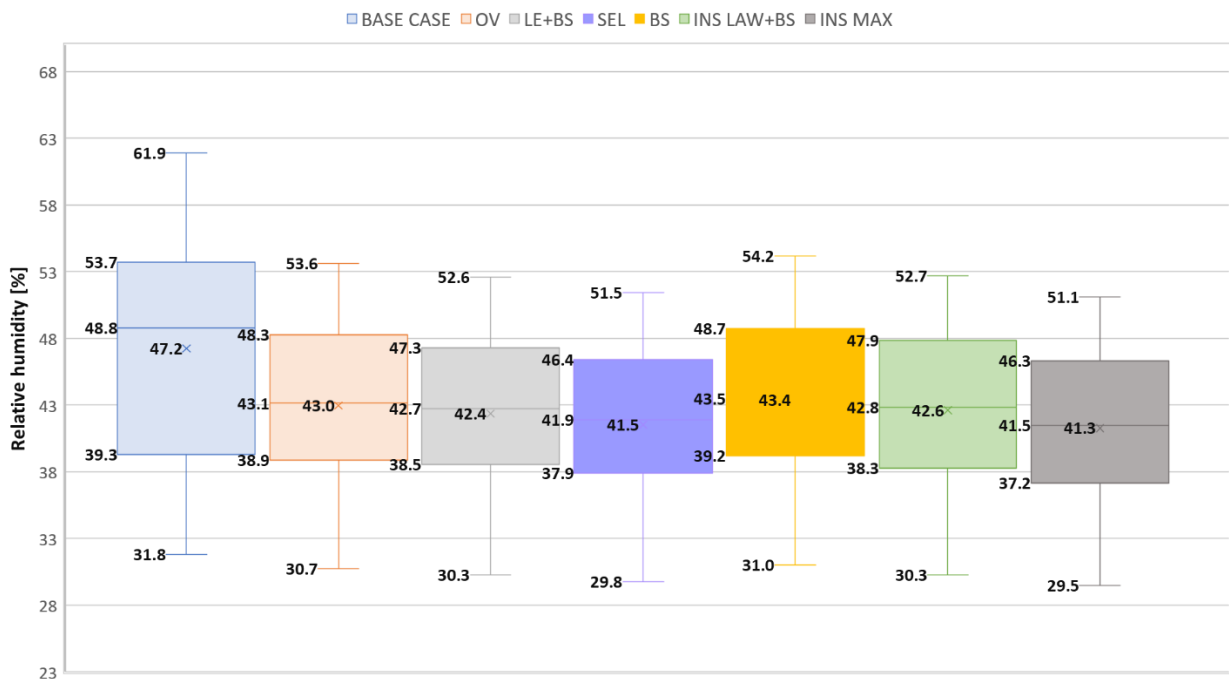


Figura 69. Umidità relativa: distribuzione cumulativa per la stanza singola

La Figura 70 sottolinea l'importanza delle misure di efficienza perché in tutti i casi, eccetto l'isolamento, si ha una riduzione del valore medio e le distribuzioni vengono ridimensionate. La più efficace, come detto, è

SEL+BS per la quale i valori sono inferiori di oltre 1°C. Lo stesso effetto si può notare per la distribuzione dell'umidità relativa (Figura 71) per la quale la distribuzione diventa simmetrica e si ha una sostanziale riduzione dei valori.

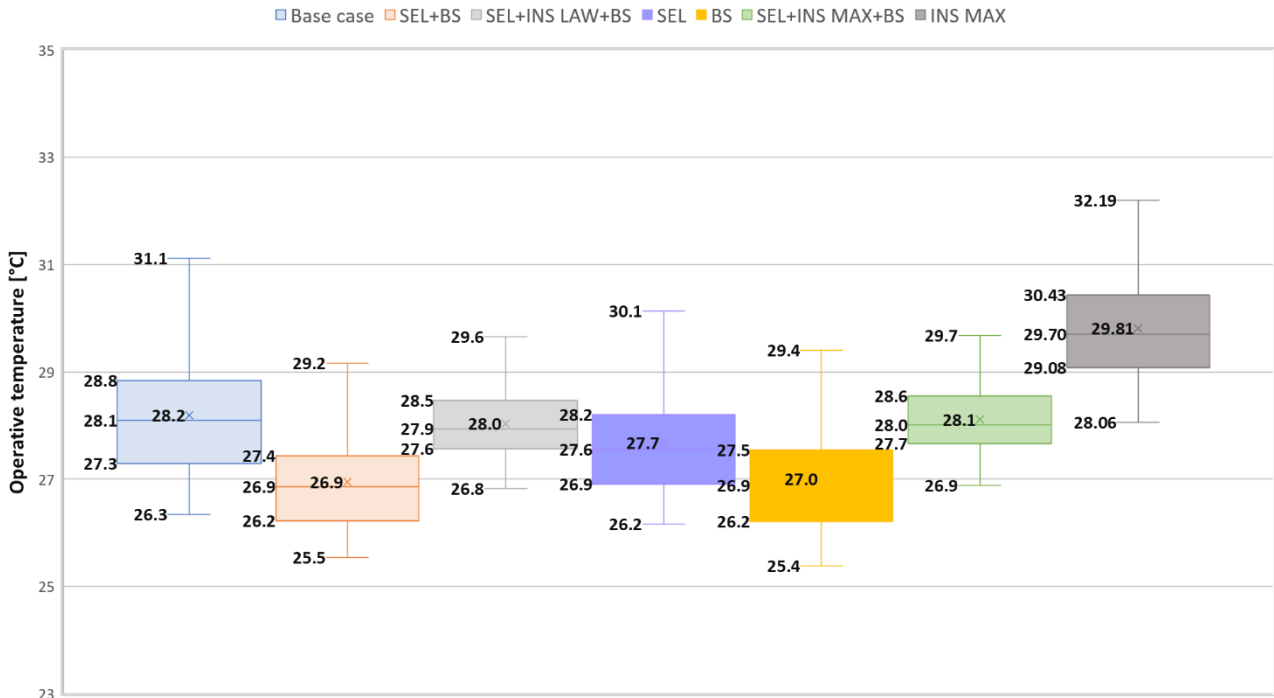


Figura 70. Temperatura operativa: distribuzione cumulativa per la stanza multipla

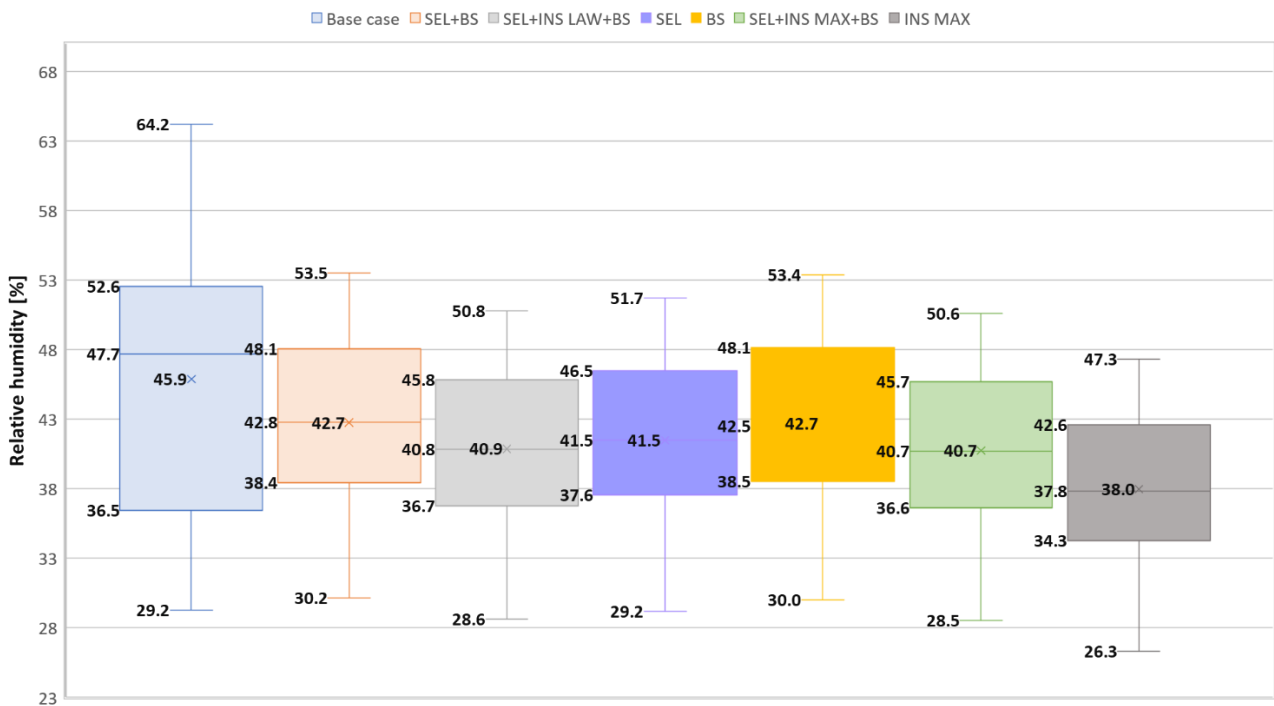


Figura 71. Umidità relativa: distribuzione cumulativa per la stanza multipla

Più in generale i risultati sono in accordo con lo studio condotto con un metodo diverso in un ospedale in Belgio [207]. I loro risultati mostrano che le caratteristiche delle vetrate e la configurazione del dispositivo di ombreggiatura hanno un impatto importante sull'uso/costo energetico, sulla luce naturale e sul comfort visivo e sul raggiungimento di una buona prestazione complessiva.

L'analisi conferma che la ristrutturazione è importante per migliorare il comfort ma per raggiungere le condizioni imposte dallo standard internazionale richiede l'installazione di un sistema attivo. Tuttavia, gli elementi vetrati in questo tipo di edificio sembrano avere maggiore importanza per stabilizzare le condizioni interne e quindi la progettazione deve essere valutata correttamente. La scelta di partire dagli indici di comfort per selezionare le misure di efficienza può portare a selezionare misure che garantiscano di rispondere alle esigenze del paziente ma anche la riduzione del consumo energetico e una migliore gestione dell'impianto attivo o di progettare l'installazione di un sistema con dimensioni inferiori.

#### 4.4. Revisione degli impianti HVAC installati nelle strutture sanitarie: analisi critica del peso di ogni sottosistema

Per avere condizioni di comfort adeguate all'interno degli edifici è necessario un elevato consumo energetico. Dai dati ricavati dal BPIE (Building Performance Institute Europe) emerge che il 25% degli edifici europei è rappresentato da edifici non residenziali. Di questo 25%, il 7% è rappresentato da ospedali [219][220][221]. Per la loro complessità, gli ospedali sono gli edifici con il più alto consumo energetico. Questi consumi energetici sono principalmente legati al riscaldamento, al raffrescamento, alla produzione di acqua calda sanitaria e al vapore necessario ai macchinari, all'impianto di illuminazione.

Dall'analisi della letteratura è emerso che, in Europa, il consumo energetico nel solo settore sanitario non è considerato. Dai dati Eurostat, il consumo energetico legato alle strutture sanitarie è raggruppato sotto la voce "servizi pubblici", quindi non è chiaro quale sia il loro consumo effettivo.

La Figura 72 mostra il consumo energetico finale nel settore commerciale e nei servizi pubblici in Europa.

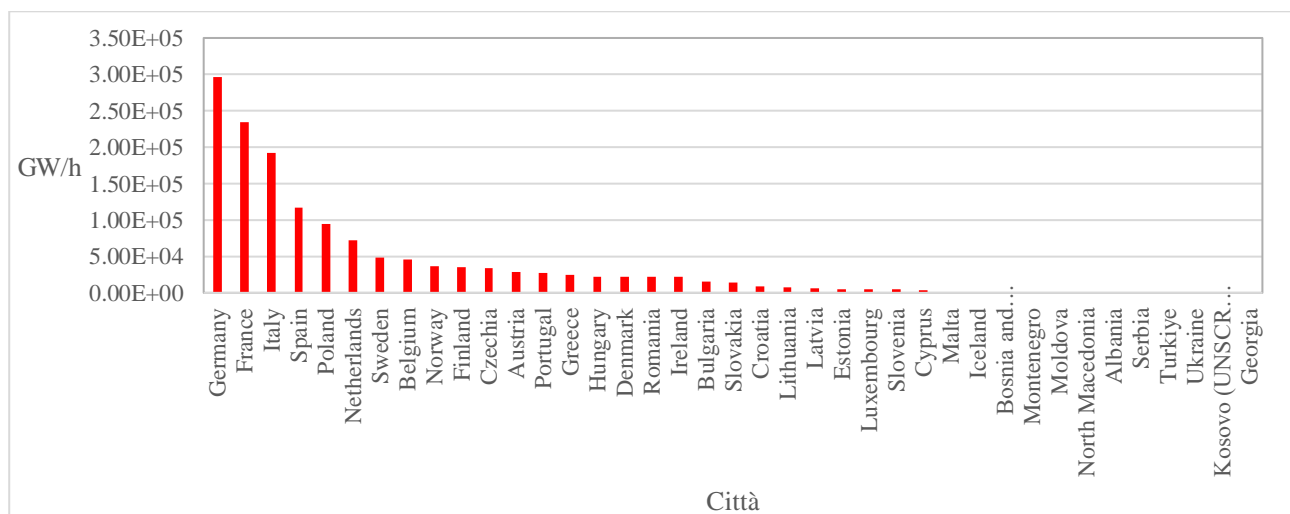


Figura 72. Consumo finale di energia in Europa nell'anno 2022 nei settori commerciale e dei servizi pubblici [220]

La Figura 72 mostra i dati per l'anno 2022 sui consumi energetici in Europa nei settori commerciale e dei servizi di pubblica utilità. I dati mostrano che la Germania ha avuto un consumo energetico maggiore nei settori sopra menzionati, seguita da Francia e Italia.

Poiché non esiste una chiara suddivisione dei consumi relativa ai vari servizi pubblici e al settore commerciale, non è possibile effettuare un'analisi attenta dei consumi effettivi legati alle strutture sanitarie in Europa. È possibile effettuare solo una stima approssimativa basata sulla percentuale di ospedali registrati.

In Europa, l'unico dato disponibile relativo ai consumi energetici nelle strutture sanitarie è quello della Spagna. Dalla Figura 72 emerge che il consumo energetico annuo in Spagna è di circa  $1.2 \times 10^5$  GWh. In particolare, il consumo energetico nei piccoli ospedali (massimo 300 posti letto) è di 8.885 kWh per posto letto, mentre per gli ospedali con più di 300 posti letto è di 10.043 kWh per posto letto [222].

Gonzalez et al., nel loro studio, hanno valutato il consumo energetico medio negli ospedali spagnoli e hanno scoperto che questo consumo rappresenta il 7% del consumo energetico terziario totale [153].

Montero et al. hanno esaminato gli effetti dell'installazione di sistemi fotovoltaici in 14 ospedali situati nel sud-ovest della Spagna. Per condurre il loro studio, hanno analizzato il consumo energetico dei suddetti ospedali in un periodo di 4 anni. Lo studio ha preso in considerazione ospedali di piccole, medie e grandi dimensioni ed è emerso che più grande è l'ospedale, maggiore è il consumo energetico. In particolare, questi consumi variano tra 406 MWh e 12510 MWh [223].

In Italia, tuttavia, è possibile tracciare il consumo energetico nelle strutture sanitarie dai dati pubblicati da Terna (Figura 73).

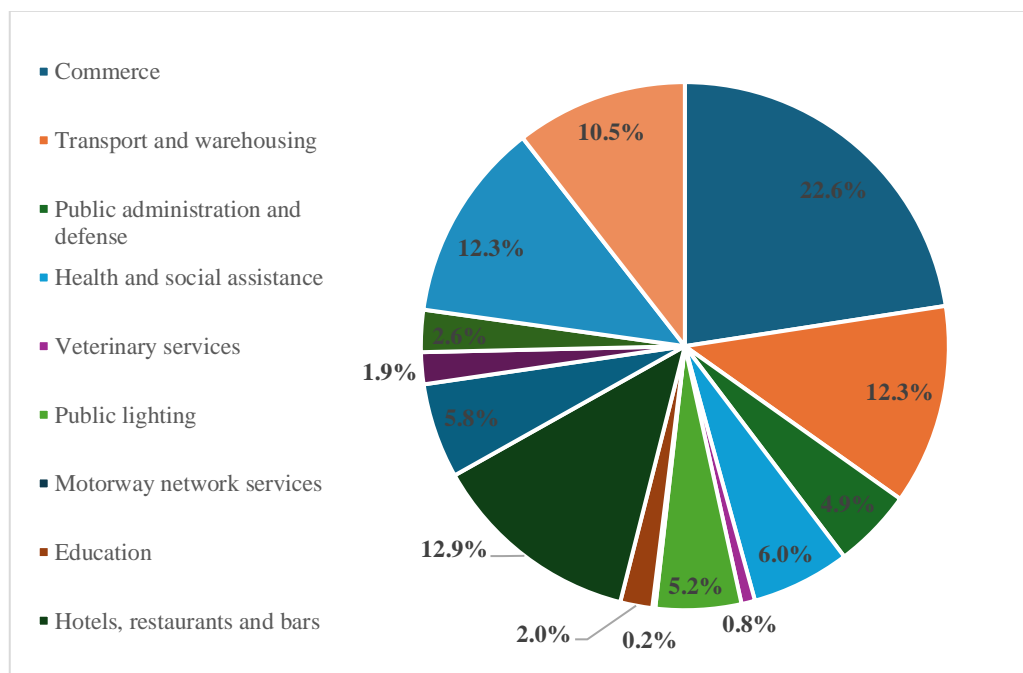
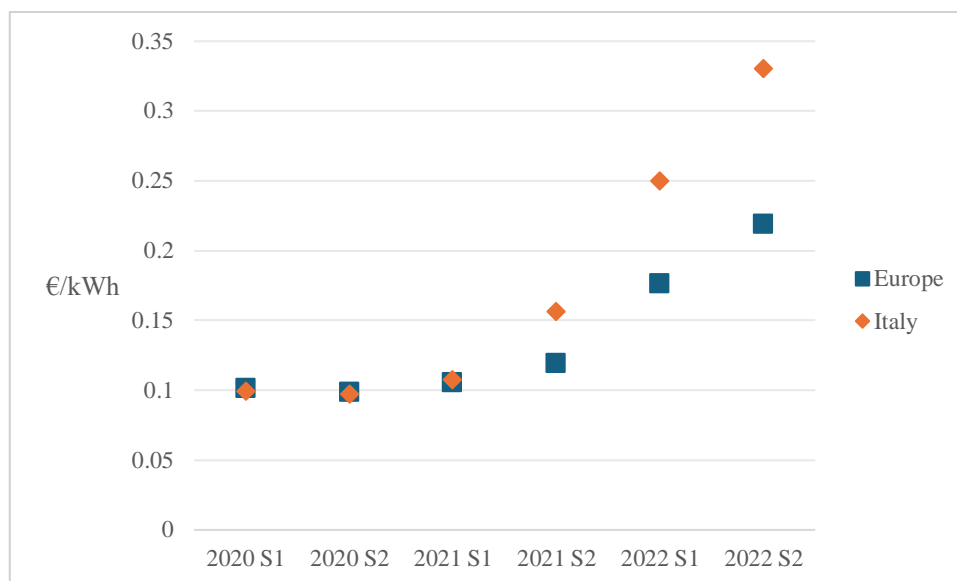


Figura 73. Consumi energetici nel settore dei servizi in Italia nel 2022 [224]

La parte più preoccupante del settore energetico è legata ai costi. Con la crisi globale, il costo dell'energia è aumentato negli ultimi tre anni (Figura 74).



**Figura 74. andamento dei prezzi dell'energia in Europa e in Italia negli ultimi tre anni [220]**

La Figura 74 mostra l'andamento dei costi energetici in Europa e in Italia negli ultimi tre anni. In Europa il costo dell'energia è più che raddoppiato, passando da un valore di circa 0.10 €/kWh nel secondo semestre del 2020 a un valore di circa 0.25 €/kWh nel secondo semestre del 2022. In Italia, invece, il costo dell'energia è triplicato, assumendo un valore di quasi 0.35 €/kWh nel secondo semestre del 2022. A causa di questo aumento esponenziale dei costi, sono state adottate misure per ridurre i consumi energetici nelle strutture sanitarie. L'intervento più semplice adottato è stato la sostituzione delle lampade a incandescenza con lampade a minor impatto e costo. Inoltre, in alcuni casi, è stata ridotta la climatizzazione delle sale d'attesa e dei corridoi. Infine, a seguito dei finanziamenti stanziati (in Italia ad esempio è stato emanato il D.L. n.50/2022 "Decreto aiuti"), alcune strutture sanitarie hanno apportato significativi miglioramenti al sistema edificio-impianto puntando all'autoproduzione di energia o alla sostituzione dell'impianto esistente con un impianto di cogenerazione.

È opportuno sottolineare che dall'analisi emerge che i dati disponibili relativi ai consumi energetici nelle strutture sanitarie sono scarsi, soprattutto per quanto riguarda i dati europei.

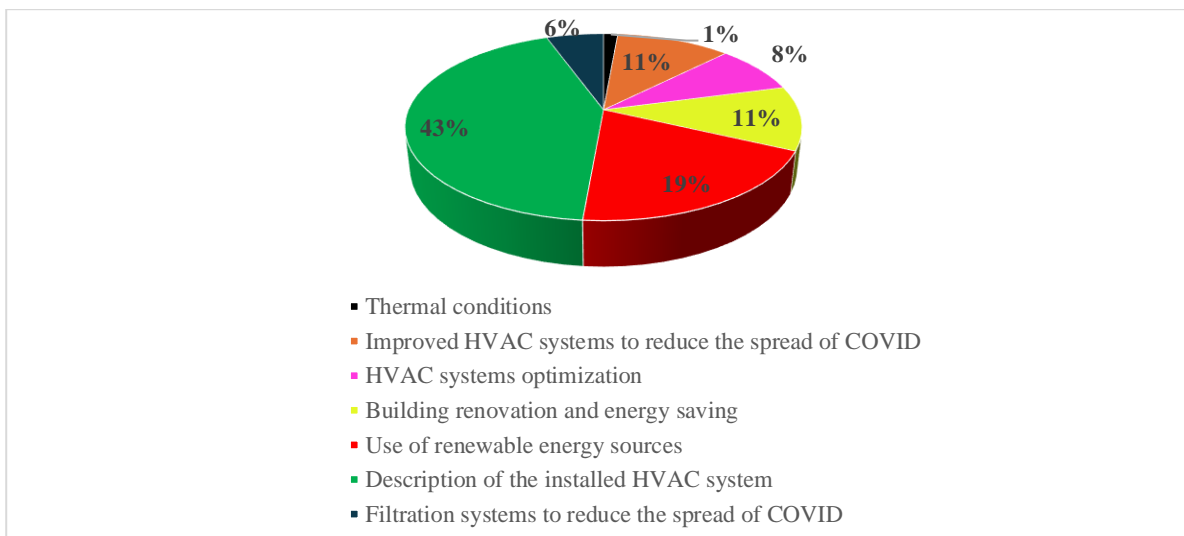
Inoltre, dall'analisi emerge che non sono molti i dati energetici puri. Per questo motivo, nonostante gli ospedali siano considerati un settore energivoro, non è possibile effettuare analisi dettagliate sui consumi e sull'impatto dei diversi sottosistemi di un sistema.

Per pianificare interventi che portino effettivamente a risparmi energetici, è necessario effettuare un'attenta diagnosi energetica su queste strutture.

Ci chiediamo quindi: attraverso un'attenta analisi della letteratura, quali informazioni possiamo reperire relativamente al sistema edificio-impianto? L'attenzione, in particolare, è rivolta agli impianti installati nelle diverse strutture sanitarie.

Lo studio sull'analisi della letteratura è stato condotto seguendo le linee guida del reporting trasparente di revisioni sistematiche e meta-analisi (PRISMA) [225]. Esse comprendono tre fasi: una prima fase è quella di identificazione degli articoli tramite digitazione di parole chiave nel database di ricerca; una seconda fase è quella di screening, ovvero l'analisi degli articoli trovati per identificare la loro compatibilità con la revisione da effettuare; e infine una fase di inclusione dell'articolo trovato nella revisione.

In questo caso specifico, sono state ricercate nel database accademico ScienceDirect le seguenti parole chiave: "Hospital building", "HVAC in hospitals", "Hospitals application system", "Plant system in healthcare facilities", "Energy systems in hospitals", "Filtration in HVAC systems" e "Hospital plant systems". Da questa ricerca sono stati letti e analizzati circa 80 articoli (Figura 75).



**Figura 75. Articoli trovati nel database accademico ScienceDirect**

Solo il 43% degli articoli analizzati incontra i nostri interessi. Infatti, di questi 80 articoli, solo 31 descrivono i sistemi installati nelle strutture ospedaliere. La percentuale rimanente è suddivisa tra articoli che trattano del contenimento della diffusione del Covid, della necessità di installare fonti rinnovabili per la produzione di energia, delle misure di risparmio energetico e dell'ottimizzazione degli impianti di climatizzazione.

#### **4.4.1. Sottosistema di generazione**

La Tabella 41 riassume le caratteristiche del sottosistema di generazione installato nelle strutture sanitarie. In particolare, la tabella analizza: la zona climatica o la località in cui è ubicata la struttura, la zona termica o la struttura analizzata, il numero di posti letto eventualmente presenti nella struttura ospedaliera, informazioni generali sul sistema HVAC, informazioni sul sistema di riscaldamento e sul sistema di raffreddamento.

Località/clima	Zona termica/Ospedale	Numero di letti	Informazioni sistema HVAC	Sistema di riscaldamento	Sistema di raffrescamento	Riferimento
City of Campo Grande, MS, Brazil	Sezione di oculistica: due sale operatorie e una sala d'attesa	51 stanze	Sistema ad aria forzata		Refrigeratore centrale + torre di raffreddamento	[226]
			Sistema HVAC centrale utilizzato negli ospedali	Caldaia a gas	Torre di raffreddamento	[157]
Napoli, Italia	Ospedale "G. Pascale"		Sistema di riscaldamento centralizzato. Sistema di raffreddamento parzialmente centralizzato	Il vapore necessario all'impianto di riscaldamento e al circuito dell'acqua calda sanitaria è prodotto da quattro caldaie a gas. Il vapore è fornito tramite due scambiatori	Due refrigeratori	[162]
Hubei, China	Ospedale caratterizzato da 5 piani fuori terra e 2 piani interrati				Torre di raffreddamento + refrigeratore centrifugo	[227]
Kermanshah, Iran	Ospedale statale diviso in più partizioni		È presente solo l'impianto di riscaldamento	Caldaia centrale a bassa pressione		[198]
La Rioja, Spagna	Ospedale "San Pedro"	Più di 600 letti	Sistema centralizzato		Tre unità di raffreddamento centrifughe da 3.51 MW + una macchina a vite con capacità di raffreddamento di 1 MW	[228]
Penang, peninsular Malaysia	Ospedale Kepala Batas	108 letti	Sistema di raffreddamento centralizzato		Tre refrigeratori + tre torri di raffreddamento	[229]
Alexandria, Egypt			Sistema CAV (Constant Air Volume)			[230]
Shanghai, China			CCHP system			[231]
Aarhus city, Denmark					Refrigeratore ad assorbimento	[232]
Spain	Sei presidi sanitari appartenenti al Servizio Sanitario Regionale		Pompe di calore raffreddate ad aria con ventilatori assiali + distribuzione acqua + unità roof top + sistemi di recupero calore + freecooling con tecnologia inverter			[233]

**Tabella 41. Caratteristiche del sottosistema di generazione installato nelle strutture sanitarie**

Località/clima	Zona termica/Ospedale	Numero di letti	Informazioni sistema HVAC	Sistema di riscaldamento	Sistema di raffrescamento	Riferimento
Chicago, con un clima fresco-umido; Miami, con un clima caldo-umido; Phoenix, con un clima caldo-secco; Saskatoon, con un clima freddo	L'edificio scelto per lo studio è stato simulato in quattro città nordamericane che rappresentano diverse condizioni climatiche		Sistema HVAC a volume d'aria variabile			[234]
Türkiye	Ospedale caratterizzato da 5 piani		Sistema centrale e volume d'aria variabile	Caldaia con rendimento dell'84.5%	Unità di raffreddamento con COP di 5.96	[235]
Zona collinare di Napoli, Italia	Ospedale Universitario "Federico II"	2800 letti	Sistema CHCP	Turbina a gas naturale + caldaia di recupero del calore di scarto + due riscaldatori ausiliari	Cinque refrigeratori ad assorbimento + 8 torri di raffreddamento	[236]
Southeastern region of Brazil	Ospedale universitario	403 letti		La produzione di vapore da un generatore di vapore a olio combustibile produce vapore. L'acqua calda viene prodotta in caldaie a olio combustibile.	Refrigeratore con compressore a vite raffreddato ad acqua	[237]
Ferrara, Nord Italia	Ospedale Sant'Anna in Cona	900 letti	Sistema CHP	Quattro caldaie identiche alimentate a gas naturale + tre generatori di vapore identici alimentati a gas naturale	Un refrigeratore ad assorbimento alimentato da una frazione del calore recuperato dal CHP + quattro refrigeratori identici	[238]
Southern Spain	"Hospital Comarcal de la Axarquía"	193 letti	Sistema di poligenerazione caratterizzato da impianto fotovoltaico, macchina ad assorbimento, motore di cogenerazione	Impianto solare + impianto ausiliario con caldaia a gas da 440 kW		[239]
Cagliari, Italia	Ospedale Brotzu	572 letti		Tre caldaie a gasolio, ciascuna con una potenza termica di 2900 kW	Quattro refrigeratori con una capacità di raffreddamento totale di 5188 kW + tre torri di raffreddamento	[240]
Belgium	Ospedale "Klina"	440 letti	Pompa di calore per riscaldamento e raffreddamento	Caldaie a gas		[241]
Parma, Nord Italia	Ospedale Maggiore	714 letti	Impianto di cogenerazione			[242]
India, con estati calde e inverni freddi con notevoli variazioni di umidità durante tutto l'anno	Edificio ospedaliero multispecialistico	Più di 1250 letti		Una caldaia alimentata a gas naturale + due caldaie alimentate a gasolio ad alta velocità	Cinque refrigeratori centrifughi + cinque torri di raffreddamento	[243]

Tabella 41. (continua).

Località/clima	Zona termica/Ospedale	Numero di letti	Informazioni sistema HVAC	Sistema di riscaldamento	Sistema di raffrescamento	Riferimento
Isernia, Italia meridionale, con estati brevi, secche e per lo più limpide; inverni lunghi, freddi e nuvolosi	Ospedale "F. Veneziale"			Due caldaie centralizzate con una potenza termica complessiva di 7000 kW e un rendimento nominale del 96%. Per l'acqua calda sanitaria vengono utilizzati quattro serbatoi da 5000 L.	Due refrigeratori raffreddati ad acqua con capacità di raffreddamento di 1860 kW ciascuno.	[208]
Napoli, Italia meridionale; clima mediterraneo con inverni miti e piovosi ed estati calde e soleggiate	Ospedale privato "Clinica Ruesch"	60 letti	Sistema principale: due pompe di calore reversibili multifunzionali identiche. Sistema secondario: un'unità pompa di calore multiuso con ventilatori assiali e compressori scroll	Produzione di acqua calda sanitaria con due caldaie a gas da 500 L di capacità e potenza termica nominale di 47 kW		[244]

**Tabella 41. (continua).**

Dalla Tabella 41 emerge che la descrizione del sottosistema di generazione è fatta in modo generale, senza differenziare i diversi sottosistemi per i singoli reparti.

In alcuni casi vengono fornite solo informazioni generali sul tipo di sottosistema installato.

Per quanto riguarda il riscaldamento, vengono generalmente utilizzate caldaie a gas. Nei casi in cui è specificato, il numero di caldaie varia tra tre e quattro.

Un'eccezione è l'ospedale di Cagliari, in Italia, dove non è prevista la caldaia a gas ma sono previste tre caldaie a gasolio, ciascuna con una capacità termica di 2900 kW [240].

Per quanto riguarda il raffreddamento, invece, vengono utilizzate torri evaporative e frigoriferi. È intuitivo notare che il numero di caldaie e torri di raffreddamento varia a seconda del numero di posti letto e delle dimensioni della struttura. In quasi tutti gli articoli analizzati non è specificata la capacità delle caldaie e dei refrigeratori. Nella maggior parte dei casi, le caldaie producono anche il vapore necessario per alcune apparecchiature mediche.

In alcune strutture è presente o solo un sistema di riscaldamento o solo un sistema di raffreddamento e questo potrebbe essere legato al clima che caratterizza quella zona; ad esempio, una struttura situata in Cina [227] (in Hubei il clima è generalmente afoso) o nel sud della Spagna [228] (clima generalmente molto caldo) ha solo il raffrescamento mentre una struttura in Belgio, dove gli inverni sono molto freddi, ha solo il riscaldamento.

Infine, per quanto riguarda le fonti rinnovabili, si nota che la maggior parte delle strutture ha un sistema di cogenerazione e l'ospedale "Hospital Comarcal de la Axarquia" ha un sistema di poligenerazione con un impianto solare installato [239].

#### 4.4.2. Sottosistema di distribuzione

La Tabella 42 riassume i diversi sottosistemi di distribuzione presenti nelle strutture sanitarie. In particolare, analizza: la posizione o il clima in cui è ubicata la struttura sanitaria, la zona termica o la struttura ospedaliera presa in considerazione, il numero di posti letto presenti nella struttura, informazioni generali sul sistema di distribuzione e infine il numero di unità di trattamento aria (UTA) installate.

Località/clima	Zona termica/Ospedale	Numero di letti	Informazioni distribuzione	Sistema di	Numero di UTA	Riferimento
City of Campo Grande, MS, Brazil	Sezione di oculistica: due sale operatorie e una sala d'attesa		UTA dotata di valvole a tre vie. I ventilatori dell'UTA funzionano sempre a velocità costante		7	[226]
Kuala Lumpur, Malesia, nella regione equatoriale con clima tropicale della foresta pluviale tutto l'anno	Reparti di medicina, chirurgia, maternità e pediatria in tre ospedali privati (H1, H2, H3)		Gli ospedali H1 e H2 hanno UTA installate nelle stanze dei pazienti e nelle aree comuni dei reparti			[194]
Jeddah, Arabia Saudita, caratterizzata da un clima arido	Reparti di chirurgia e medicina dell'International Medical Center		Le stanze dei pazienti vengono raffreddate con aria che passa attraverso condotti collegati a un'unità di trattamento dell'aria			[202]
Seoul, South Korea	Ospedale terziario		Sono attive 40 UTA. 7 UTA hanno ventilatori assiali. I ventilatori di mandata e di ritorno sono disposti parallelamente a ciascuna UTA.		40	[245]
Penang, peninsular Malaysia	Kepala Batas Hospital	108 letti	L'aria raffreddata viene distribuita tramite unità di trattamento aria e diverse pompe			[229]
Alexandria, Egypt			Il sistema di distribuzione è caratterizzato da una UTA per ogni piano		4	[230]
Cinque differenti città in Turchia			Sistemi I e II: AHU + unità di scarico (UE). Sistema III: un'unità di recupero del calore è posizionata tra l'AHU e l'UE. Sistema IV: unità di miscelazione per alimentare l'AHU e l'UE.			[246]
United Kingdom	Ospedale modulare		Ogni UTA, in cui non sono presenti serpentine di riscaldamento, è caratterizzata da uno scambiatore di calore a piastre incrociate.			[247]
Belgium	"Klina" Hospital	440 letti	Le UTA contengono serpentine ad acqua		40	[241]
India, con estati calde e inverni freddi con notevoli variazioni di umidità durante tutto l'anno	Edificio ospedaliero multispecialistico	Più di 1250 letti	L'acqua refrigerata viene pompata da sei pompe primarie e sei pompe secondarie			[243]

**Tabella 42. Analisi dei sottosistemi di distribuzione installati nelle strutture sanitarie**

Località/clima	Zona termica/Ospedale	Numero di letti	Informazioni distribuzione	Sistema di	Numero di UTA	Riferimento
Isernia, Italia meridionale, con estati brevi, secche e per lo più limpide; inverni lunghi, freddi e nuvolosi	Ospedale "F. Veneziale"		Il movimento del fluido termovettore avviene tramite pompe di circolazione. Le unità di trattamento aria sono dotate di umidificatori ad acqua liquida ma non hanno sistemi di recupero del calore		11	[208]
Napoli, Italia meridionale; clima mediterraneo con inverni miti e piovosi ed estati calde e soleggiate	Ospedale privato "Clinica Ruesch"	60 letti	Il sistema di distribuzione è caratterizzato da numerose UTA			[244]

Tabella 42. (continua).

Per quanto riguarda il sottosistema di distribuzione, va sottolineato che nessun autore ha effettuato misurazioni o scritto in dettaglio i percorsi che i fluidi seguono. Inoltre, non è specificato il livello di isolamento termico delle reti, così come l'impatto che questo ha sulle prestazioni complessive del sistema.

Le uniche informazioni che si possono ottenere riguardano le unità di trattamento aria e la presenza di pompe di circolazione. In particolare, nell'ospedale terziario di Seoul, 7 delle 40 unità di trattamento aria hanno ventilatori assiali [245].

La struttura ospedaliera situata ad Alessandria d'Egitto, invece, ha un'UTA per ogni piano e quindi ha 4 UTA in totale [230].

Infine, nell'ospedale modulare nel Regno Unito, ogni UTA è dotata di scambiatori di calore a piastre incrociate [247].

#### 4.4.3. Sottosistema di regolazione

La Tabella 43 riassume le principali caratteristiche del sottosistema di regolazione installato nelle strutture sanitarie; in particolare vengono analizzati: la località o il clima in cui è ubicata la struttura sanitaria, la zona termica o la struttura ospedaliera esaminata, il numero di posti letto presenti nella struttura analizzata, informazioni generali sul sottosistema di regolazione e le variabili controllate.

Località/clima	Zona termica/Ospedale	Numero di letti	Informazioni Sistema di regolazione	Variabili controllate	Riferimento
City of Campo Grande, MS, Brazil	Sezione di oculistica: due sale operatorie e una sala d'attesa		Il controllo avviene sulla temperatura nelle tre zone	Posizioni angolari di ciascuna valvola a tre vie dell'UTA (regolazione del flusso d'acqua attraverso le serpentine di raffreddamento)	[226]

Tabella 43. Informazioni sul sottosistema di regolazione installato nelle strutture sanitarie

Località/clima	Zona termica/Ospedale	Numero di letti	Informazioni Sistema di regolazione	Variabili controllate	Riferimento
Hubei, China			Il controllo e la regolazione vengono effettuati sulla temperatura di ingresso e di uscita dell'acqua dai refrigeratori e sui parametri termodinamici del fluido circolante all'interno delle unità frigorifere.	Temperatura dell'acqua e parametri termodinamici del fluido circolante nelle unità frigorifere	[227]
Jeddah, Arabia Saudita, caratterizzata da un clima arido	Reparti di chirurgia e medicina dell'International Medical Center		Il controllo della temperatura interna avviene tramite termostati ambientali installati in ogni stanza.	Temperatura interna	[202]
Kermanshah, Iran	Ospedale statale diviso in più partizioni			Temperatura dell'acqua calda	[198]
La Rioja, Spagna	"San Pedro" Hospital	Più di 600 letti	L'edificio è controllato e monitorato dal BMS (Building Management Systems) tramite i controllori della famiglia Sauter EY3600	Temperatura interna	[228]
Seoul, South Korea	Ospedale terziario		Il controllo avviene con il metodo del passo variabile e la regolazione del flusso d'aria avviene tramite un sensore pneumatico	Angolo delle pale dei ventilatori assiali delle UTA	[245]

**Tabella 43. (continua).**

Nel caso specifico, la regolazione viene effettuata per controllare i parametri termodinamici interni, nello specifico e nella maggior parte dei casi la temperatura interna degli ambienti ospedalieri. Nell'ospedale di Jeddah, in Arabia Saudita, il controllo e la regolazione della temperatura interna viene effettuata tramite un termostato installato in ogni stanza. Presso l'ospedale "San Pedro", invece, il controllo della temperatura interna viene effettuato tramite il BMS, ovvero il Building Management Systems. In casi particolari, il controllo delle variabili interne avviene in modo diverso: in un ospedale brasiliano il controllo e la regolazione vengono effettuati variando la posizione angolare di ogni valvola a tre vie posta nell'UTA, mentre nell'ospedale terziario di Soeul la regolazione viene effettuata sull'angolo delle pale del ventilatore assiale dell'UTA; pertanto, variando l'angolazione delle pale aumenta o diminuisce il flusso d'aria che viene poi inviato ai sistemi di emissione.

Nella tabella si nota che non è specificato il tipo di sistema di controllo utilizzato, se sia un sistema discreto, con intelligenza artificiale o con controllo predittivo. Infine, va sottolineato che nessun autore ha evidenziato

come i consumi cambino in funzione della regolazione e come una corretta regolazione possa portare a una significativa riduzione dei costi legati ai consumi energetici.

#### 4.4.4. Sottosistema di emissione

Nella Tabella 44 sono riportati i diversi sottosistemi emissivi presenti nelle strutture sanitarie. In particolare, nella tabella vengono analizzati: la località o il clima in cui è ubicata la struttura ospedaliera, la zona termica o l'ospedale considerato, il numero di posti letto presenti nella struttura sanitaria e informazioni generali sul sottosistema di emissione presente nella struttura.

Località/clima	Zona termica/Ospedale	Numero di letti	Informazioni Sistema di emissione	Riferimento
	Stanza di isolamento composta da stanza del paziente, bagno e anticamera		Diffusore quadrato posizionato nella parte alta della stanza. Le due griglie di scarico sono posizionate in prossimità dei pazienti, a circa 0,25 m dal pavimento	[248]
Napoli, Italia	Ospedale "G. Pascale"		Per il raffreddamento è presente un fan coil	[162]
Kuala Lumpur, Malesia, situata nella regione equatoriale con clima tropicale della foresta pluviale tutto l'anno	Reparti di medicina, chirurgia, maternità e pediatria in tre ospedali privati (H1, H2, H3)		Gli ospedali H1 e H2 hanno installato ventilconvettori L'ospedale H3 ha più unità split	[194]
Jeddah, Arabia Saudita, caratterizzata da un clima arido	Reparti di chirurgia e medicina dell'International Medical Center		In ogni stanza di degenza sono presenti due diffusori lineari a soffitto e due diffusori di estrazione dell'aria, uno dei due montato nel bagno	[202]
Kermanshah, Iran	Ospedale statale diviso in più partizioni		Ci sono radiatori ad acqua calda posizionati sotto le finestre	[198]
Penang, peninsular Malaysia	Kepala Batas Hospital	108 letti	Per il raffreddamento è installato un fan coil	[229]
Zona collinare di Napoli, Italia	Ospedale universitario "Federico II"	2800 Letti	Sono installati radiatori per il riscaldamento e ventilconvettori per il raffrescamento	[236]
Cagliari, Italy	Brotzu Hospital	572 letti	Sono installati radiatori e ventilconvettori	[240]
Belgium	"Klina" Hospital	440 letti	I radiatori sono progettati per funzionare ad un regime di temperatura elevata (80/50°C)	[241]
Isernia, Italia meridionale, con estati brevi, secche e per lo più limpide; inverni lunghi, freddi e nuvolosi	Ospedale "F. Veneziale"		Sono installati radiatori con acqua calda a 80°C	[208]

Tabella 44. Analisi dei sottosistemi di emissione installati nelle strutture sanitarie

L'ultimo sottosistema analizzato è quello di emissione. Nel caso specifico vengono utilizzati radiatori (generalmente con acqua a 80°C) nel caso di riscaldamento e fan coil nel caso di raffrescamento. In un caso specifico vengono utilizzati diffusori quadrati posizionati nella parte alta della stanza. A ogni diffusore vengono poi associate due griglie di scarico, in prossimità del pavimento.

Anche nel caso del sottosistema di emissione non vengono fornite molte informazioni. Alcune informazioni importanti riguardano, ad esempio, la posizione o il numero di impianti presenti in ogni ambiente.

Un altro aspetto da tenere in considerazione è che nessun autore ha considerato l'aspetto della filtrazione, non specificando la tipologia di filtri presenti negli impianti. La filtrazione, soprattutto nelle strutture sanitarie, è un aspetto da non sottovalutare in quanto grazie a filtri ad altissima efficienza si riesce a contenere la diffusione di malattie.

Le strutture sanitarie sono molto complesse e quindi servono molte informazioni sul sistema edificio-impianto per poter pensare di progettare veri e propri interventi di risparmio energetico. Dall'analisi della letteratura è emerso che, quando si descrive un impianto esistente all'interno della struttura, non lo si fa in modo dettagliato. Per questo motivo, le informazioni relative agli impianti installati nelle strutture sanitarie sono molto scarse. Pertanto, queste poche informazioni non consentono di fare diagnosi operative precise e quindi non consentono di pianificare veri e propri interventi di risparmio energetico.

Le ricerche future potrebbero aggiungere, innanzitutto, informazioni riguardanti la differenziazione degli impianti nei diversi reparti: nelle indagini sugli impianti è emerso che la struttura sanitaria è considerata nel suo complesso. Altre informazioni da aggiungere riguardano principalmente i sottosistemi di distribuzione e regolazione. Per quanto riguarda il sottosistema di distribuzione, oltre alle pompe di circolazione, si potrebbe pensare di analizzare il percorso dei fluidi; un cattivo isolamento porta ad un aumento della dispersione termica e quindi ad un aumento dei consumi energetici. Analizzare il grado di isolamento porterebbe a un risparmio energetico. Per quanto riguarda il sottosistema di regolazione, i parametri termodinamici interni potrebbero essere controllati tramite specifici controllori esistenti o da testare.

#### **4.5. Efficienza energetica negli ospedali: analisi comparativa di diverse configurazioni**

Gli edifici ospedalieri sono ad alta intensità energetica a causa dei costi elevati di funzionamento, delle sofisticate apparecchiature mediche, delle rigorose procedure di pulizia e dei parametri ambientali interni. Funzionano 24 ore su 24, 7 giorni su 7, con requisiti standard elevati di ventilazione, condizionamento dell'aria e filtrazione, determinando grandi carichi di riscaldamento, raffreddamento e ventilazione degli ambienti [249].

Anche all'interno delle stesse zone climatiche, gli ospedali nei paesi sviluppati consumano ancora più energia e hanno un impatto ambientale maggiore rispetto ad altri edifici non residenziali [250]. In Europa, l'intensità energetica degli ospedali e di altre strutture sanitarie è di circa 730 kWh/(m<sup>2</sup>y) in Germania [251] e Spagna [153]. Considerando tutte le zone climatiche degli Stati Uniti, il consumo energetico degli ospedali è di 738.5 kWh/(m<sup>2</sup>y) in media, 2.6 volte superiore a quello di altri edifici commerciali [252]. In Cina, il fabbisogno energetico delle strutture ospedaliere rappresenta più del doppio di quello degli altri edifici pubblici [253]. Va

sottolineato che per molto tempo le aziende ospedaliere sono state concepite con l'unico scopo di soddisfare il comfort e il benessere dei pazienti, senza tenere conto delle pratiche di risparmio energetico [254]. Quest'ultimo, oggi, può essere implementato grazie alle nuove tecnologie e allo sviluppo scientifico, senza compromettere il comfort dell'occupante [255]. Un'altra questione, considerando alcuni paesi come quelli europei, è che il patrimonio edilizio ospedaliero è vecchio e obsoleto [256]. Ad esempio, nell'Italia meridionale e centrale il 70% degli ospedali pubblici sono stati costruiti prima del 1970, prima della prima legge sulla riduzione del consumo energetico negli edifici, risalente al 1976 [257]. Va sottolineato che a partire dal 2020 a causa della pandemia di COVID-19 le raccomandazioni per aumentare il flusso d'aria di ventilazione [258] hanno determinato un aumento del consumo energetico annuo di circa il 22.3% [228]. Di conseguenza è evidente l'enorme potenziale che può essere sfruttato in termini di risparmio energetico. Inoltre, ci sono obiettivi comunitari e internazionali da rispettare, ad esempio The European Green New Deal (Estratto il 17 gennaio 2023 da [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal/delivery/Europeangreen-deal\\_en](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal/delivery/Europeangreen-deal_en)) o l'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile degli edifici [259], compresi quelli che ospitano ospedali, sono soggetti a requisiti minimi di efficienza [229]. In Europa, fatti salvi i vincoli sul comfort ambientale da garantire, gli edifici ospedalieri in caso di ristrutturazione o ricostruzione devono essere oggi anche edifici a energia quasi zero. Uno sforzo in questa direzione viene fatto nella regione dei Balcani meridionali, con il progetto ZenH (ospedali a energia zero) [260] che mira a implementare facilmente gli obiettivi della Direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia (EPBD) [19].

Considerando che i sistemi HVAC rappresentano  $\approx 74\%$  di tutto il consumo energetico negli ospedali [261], un punto di svolta in questa direzione è sicuramente la ristrutturazione dei sistemi HVAC, che è anche il modo più semplice ed efficace per risparmiare energia, per la riqualificazione dell'involucro edilizio. D'altro canto, gli impianti energetici degli ospedali sono solitamente molto complessi e devono rispettare normative severe. Di conseguenza, vengono proposte diverse misure di risparmio energetico, considerando, ad esempio, un sistema di generazione ad alte prestazioni integrato con fonti energetiche rinnovabili [262]. In una revisione della letteratura, Teke e Timur [157] affermano che l'utilizzo di refrigeratori ad aria con compressori centrifughi e tecnologie di azionamento a velocità variabile potrebbe consentire un risparmio energetico annuale del 58% rispetto ai refrigeratori ad acqua. Inoltre, l'aggiunta di scambiatori per il recupero di calore rappresenta un vantaggio in termini energetico-economici, con un periodo di ammortamento di  $\approx 1 \div 2$  anni. Infine, la sostituzione di una caldaia tradizionale a gas naturale con sistemi di cogenerazione (CHP) o trigenerazione potrebbe aumentare l'efficienza del sistema di generazione, passando da circa il 60% a rispettivamente l'87%÷92% e l'85%÷90%, con un tempo medio di ritorno dell'investimento compreso tra 2.5 e 5 anni. Secondo Özahi et al. [263] l'installazione di un sistema VRF in edifici dalla struttura complessa può ridurre i costi del 44% rispetto ai sistemi HVAC convenzionali, come le caldaie ad acqua calda. Chen et al. [149] hanno proposto un nuovo sistema di quad-generazione negli ospedali per la produzione combinata di raffreddamento, riscaldamento, elettricità e gas che mostra un aumento dell'efficienza energetica. Considerando l'ospedale Kepala Batas in Malesia, Rahman, Lim et al. [262] hanno riscontrato, utilizzando l'audit energetico, che il risparmio energetico più elevato (45.54%) è dato dalla misura di retrofit sul sistema

di refrigerazione. Il monitoraggio sperimentale ha confermato addirittura che tale risparmio si aggira intorno al 50%. Tutti gli studi analizzati fanno riferimento ad una tecnologia specifica, spesso prototipi sperimentali non disponibili sul mercato, applicati individualmente ad un caso studio.

Oltre al sottosistema di generazione, anche il sottosistema di regolazione e gestione è molto importante per migliorare le prestazioni degli impianti HVAC ospedalieri [254]. Dulce-Chamorro e Martinez-de-Pison [228] hanno sviluppato un sistema di gestione degli edifici per ospedali basato su algoritmi genetici. L'hanno testato su un vero ospedale in Spagna, ottenendo un risparmio energetico annuo stimato tra il 7% e il 10%. In un ospedale della Corea del Sud, Song et al. [245] hanno confrontato due diversi metodi di controllo dei ventilatori per le unità di trattamento dell'aria (AHU) con ventilatori assiali: l'inverter a frequenza variabile (VFD) e il passo variabile delle pale (VP). In termini di potenza d'aria totale, l'efficienza massima del sistema è stata rispettivamente del 37% per il VFD e del 42% per il VP. Deshmukh et al. [264] hanno dimostrato l'importanza del rilevamento dei guasti nei sistemi HVAC, prevedendo un risparmio di 24.000 dollari all'anno grazie alla correzione del funzionamento della pompa di circolazione nel circuito di recupero del calore dell'unità di trattamento dell'aria (AHU) in un grande ospedale.

Per rispondere positivamente alla crisi energetica e ambientale è necessario includere programmi di incentivi nelle strategie nazionali per la ristrutturazione degli ospedali e delle strutture sanitarie [160].

Esistono alcuni documenti ben esaustivi che, tuttavia, fanno riferimento al retrofit dell'involucro edilizio delle strutture sanitarie [265]. Ma dalla precedente analisi panoramica, è emerso che: (i) l'energia consumata dai sistemi HVAC dell'ospedale rappresenta circa il 74% di tutto il consumo energetico; (ii) non esistono analisi sistematiche riguardanti tutti i possibili scenari di retrofit HVAC, considerando le soluzioni attualmente sul mercato; (iii) nessun articolo propone una classificazione delle tipologie impiantistiche e quale sia la migliore configurazione dei sistemi di conversione energetica nei diversi reparti; (iv) ci sono pochissimi studi sull'utilizzo delle fonti rinnovabili nelle strutture sanitarie. Pertanto, per colmare le lacune della ricerca evidenziate, il presente documento propone un'analisi rigorosa e sistematica dei possibili sottosistemi di generazione disponibili sul mercato che possono essere implementati in un retrofit HVAC per un ospedale. A questo scopo, un caso studio reale è rappresentato dall'Ospedale "F. Veneziale" di Isernia, nel sud Italia. Diverse tecnologie, come l'impianto fotovoltaico, la pompa di calore elettrica, la pompa di calore ad assorbimento alimentata da energia solare, unità di cogenerazione e recupero di calore, vengono analizzate dal punto di vista energetico e ambientale con l'introduzione di un Indice del Livello di Energia Importata. Pertanto, lo studio mira anche ad essere uno studio orientato alla progettazione per ospedali simili.

Il metodo sviluppato potrebbe essere così riassunto. Dopo la definizione del caso studio, è stato effettuato un audit energetico approfondito per conoscere l'effettivo utilizzo di energia per l'edificio considerato. Tale audit energetico è stato condotto da De Masi et al. [266]. Pertanto, è stato sviluppato e calibrato un modello numerico nel motore Energy Plus [33], seguendo le linee guida per la "calibrazione dell'intero edificio" delle normative di Misura e Verifica, considerando i consumi energetici mensili rilevati in fase di audit. Sulla base del modello calibrato che descrive lo stato di fatto, chiamato Base Case, sono stati sviluppati diversi scenari di ristrutturazione HVAC. Saranno indicati come casi alternativi proposti (PAC). In particolare, sono state

valutate diverse tecnologie disponibili sul mercato, comprese quelle innovative, come la pompa di calore elettrica sola e associata a moduli fotovoltaici, i collettori solari termici associati a una pompa di calore ad assorbimento, i moduli fotovoltaici e le unità di recupero del calore. Infine, i risultati ottenuti vengono analizzati considerando i consumi energetici per la ventilazione, il riscaldamento e il raffrescamento in termini di energia primaria e di impatto ambientale e in termini di emissioni di anidride carbonica equivalente. Sono state prese in considerazione due efficienze del sistema elettrico nazionale ( $\eta^{PP}$ ), calcolate da Ceglia et al. [267]. Esse sono 0.781 per lo Scenario 1 e 0.495 per lo Scenario 2. Si riferiscono agli indicatori di efficienza con e senza considerare il contributo di energia primaria delle FER (rispettivamente negli scenari 2 e 1). Si tratta di valori medi annuali dell'efficienza italiana, considerando il periodo compreso tra il 2015 e il 2019.

Gli indici valutati sulla base della simulazione energetica annuale sono:

- il risparmio di energia primaria (PES) rispetto al caso base (BC);
- le emissioni evitate di anidride carbonica ( $\Delta CO_2$ ) rispetto al caso base (BC);
- il nuovo indice Imported Energy Level Index (IELI) per le soluzioni alternative in cui viene considerato un sistema di cogenerazione o un campo fotovoltaico.

Il primo indice rappresenta la riduzione percentuale della domanda di energia primaria per il sistema HVAC delle soluzioni alternative proposte per il BC. In particolare, nei casi che prevedono una produzione in loco di energia elettrica, che può essere parzialmente immessa nella rete, tale quantità di energia viene assunta come una generazione evitata nel sistema elettrico nazionale. Pertanto, il PES viene valutato secondo l'equazione (4.16):

$$PES = \left(1 - \frac{E_p^{PAC}}{E_p^{BC}}\right) \times 100 \quad (4.16)$$

dove:

- $E_p^{PAC}$  è l'energia primaria totale richiesta annualmente dal sistema HVAC nei casi alternativi proposti, calcolata come la somma dell'energia primaria richiesta dal sistema elettrico nazionale,  $E_p^{PP,PAC}$  (ridotta dell'energia elettrica immessa nella rete), del consumo di gas delle caldaie ( $E_p^{B,PAC}$ ) e del cogeneratore, quando previsto ( $E_p^{CHP}$ ):

$$E_p^{PAC} = E_p^{PP,PAC} + E_p^{B,PAC} + E_p^{CHP} \quad (4.17)$$

- $E_p^{BC}$  l'energia primaria totale richiesta dal sistema HVAC nel caso base, calcolata su base annua come la somma dell'energia primaria richiesta dal sistema elettrico nazionale ( $E_p^{PP,BC}$ ), e del consumo di gas delle caldaie ( $E_p^{B,BC}$ ):

$$E_p^{BC} = E_p^{PP,BC} + E_p^{B,BC} \quad (4.18)$$

Il secondo indice valuta la percentuale di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> tra il BC e ogni PAC. È valutato come:

$$\Delta CO_2 = \left(1 - \frac{CO_2^{PAC}}{CO_2^{BC}}\right) \times 100 \quad (4.19)$$

Dove:

- $CO_2^{PAC}$  sono le emissioni di CO<sub>2</sub> attribuite ai Casi Alternativi Proposti calcolate su base annua come la somma delle emissioni relative alla domanda di energia elettrica (ridotta dall'energia elettrica immessa in rete),  $E_{el}^{PAC}$ , il consumo di gas delle caldaie ( $E_p^{B,PAC}$ ) e del cogeneratore, quando previsto ( $E_p^{CHP}$ ):

$$CO_2^{PAC} = \alpha \times E_{el}^{PAC} + \beta \times [E_p^{B,PAC} + E_p^{CHP}] \quad (4.20)$$

- $CO_2^{BC}$  rappresenta le emissioni di CO<sub>2</sub> attribuite al caso base calcolate su base annua come somma delle emissioni dovute alla domanda di energia elettrica,  $E_{el}^{BC}$ , e al consumo di gas delle caldaie ( $E_p^{B,BC}$ ):

$$CO_2^{BC} = \alpha \times E_{el}^{BC} + \beta \times E_p^{B,BC} \quad (4.21)$$

Il nuovo indice, invece, è introdotto per valutare il livello di energia prelevata dalla rete dall'edificio per stimare la dipendenza dalla rete elettrica. Si calcola come segue:

$$IELI = \frac{E_p^{PAC} + E_{el}^{fg} / \eta^{PP}}{E_p^{PAC} + (E_{el}^{fg} + E_{el}^{uos}) / \eta^{PP}} \quad (4.22)$$

Dove:

- $E_{el}^{fg}$  è l'elettricità immessa nella rete;
- $\eta^{PP}$  è l'efficienza del sistema elettrico nazionale;
- $E_{el}^{uos}$  è la quota di energia elettrica prodotta nel sistema (dall'impianto fotovoltaico o dal cogeneratore) utilizzata in loco.

L'informazione complementare che questo indice può rappresentare è il grado di autonomia energetica. Pertanto, in base ai risultati di questo indice, è possibile valutare la vulnerabilità di una struttura in termini energetici e di costi. Una struttura sanitaria con un livello IELI elevato è molto più esposta ai rischi di un'interruzione della fornitura di energia (ad esempio blackout elettrici) e di conseguenza necessita della progettazione e installazione di sistemi di backup con capacità sufficiente per far fronte a tale rischio. Inoltre,

un elevato livello di dipendenza energetica aumenta la possibilità di subire variazioni dei costi energetici, soprattutto in quei periodi caratterizzati da elevata instabilità geopolitica.

La Figura 76 mostra uno schema a blocchi della metodologia utilizzata per raggiungere gli obiettivi sopra menzionati.

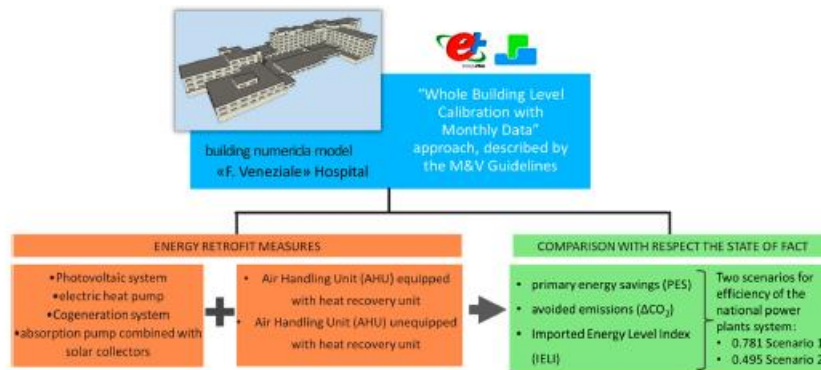


Figura 76. Schema a blocchi della metodologia utilizzata

Il caso studio è situato nell'entroterra del Sud Italia, nella città di Isernia. È caratterizzato da estati brevi (circa tre mesi), secche e prevalentemente serene e inverni lunghi (circa quattro mesi), freddi e nuvolosi. Appartiene alla zona climatica D, secondo la normativa italiana UNI 10349 [118], con 1866 gradi giorno di riscaldamento (HDD), con 20 °C come temperatura di base. Nella progettazione degli impianti termici i dati utilizzati sono: temperatura dell'aria esterna di progetto invernale pari a -2 °C; temperatura dell'aria esterna di progetto estivo pari a 29.9 °C. Nella Tabella 45 sono riportati tutti i dati climatici di progettazione, come definiti dagli standard nazionali.

È opportuno sottolineare che le prestazioni dei sistemi HVAC che verranno analizzati nello studio sono fortemente dipendenti dalla zona climatica considerata, anche a causa dell'utilizzo di strumenti dinamici che consentono di modellare prestazioni variabili anche al variare delle condizioni esterne. Pertanto, qualsiasi studio non è generalizzabile se non per la zona climatica presa in esame. In ogni caso, le informazioni riguardanti i dati di progetto del clima esterno potrebbero essere un utile riferimento per altri luoghi con le stesse condizioni climatiche.

ISERNIA– Latitude: 41°35'37"; Longitude: 14°13'47"; Altitude: 423 m											
Heating Design data						Cooling Design data					
Climate zone						D					
Outdoor temperature [°C]						-2					
Outdoor relative humidity [%]						48.8					
HDD						1866					
Wind speed [m/s]						3.90					
Average monthly temperatures [°C]											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
7.0	5.8	7.1	11.2	15.5	19.0	21.7	22.1	17.9	15.2	10.6	4.6
Average monthly relative humidity [%]											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
81.4	75.9	71.7	72.0	75.9	67.3	59.6	57.8	69.0	74.4	81.3	78.6

Tabella 45. Progettazione dei dati climatici

L'ospedale "Ferdinando Veneziale" (Figura 77a) è stato costruito tra gli anni '70 e '80 del Novecento ed è stato oggetto di una serie di ampliamenti e ristrutturazioni, nei primi anni 2000. Dal 2007 ad oggi sono in corso approfonditi interventi di adeguamento e manutenzione degli impianti e dei servizi. L'edificio, composto da volumi di diversa forma, si sviluppa lungo le direttrici Est-Ovest. Il volume lordo di 88250 m<sup>3</sup> è distribuito su sei piani fuori terra e due piani interrati. La parte dell'edificio che ospita i poli tecnologici e i locali tecnici ha pianta e volume rettangolari su un unico livello, situata in prossimità dell'edificio principale, a cui è collegata ma ben distinta (Figura 77).

La struttura è costituita da telai portanti di pilastri e travi in cemento armato e solai in muratura. Le pareti esterne hanno uno spessore complessivo di 0.50 m e una trasmittanza termica ( $U_{\text{value}}$ ) di circa 1.58 W/(m<sup>2</sup>K). Sono realizzati in muratura di mattoni o da pannelli prefabbricati in calcestruzzo. Per i solai e il basamento sono state utilizzate travi in calcestruzzo con laterizi interposti, senza isolamento ( $U_{\text{value}} \approx 1.80$  W/(m<sup>2</sup>K)), mentre per la copertura a terrazza è stato previsto uno strato isolante ( $U_{\text{value}} \approx 0.70$  W/(m<sup>2</sup>K)).

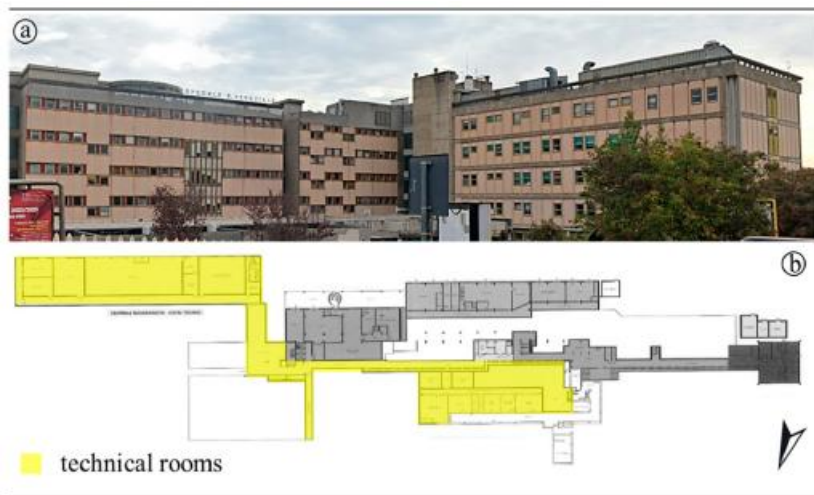


Figura 77. Ospedale 'Ferdinando Veneziale', vista esterna (a) e pianta del piano interrato -2 (b)

L'involucro trasparente è caratterizzato da un rapporto finestra/parete pari al 18%. La trasmittanza termica stimata della finestra è di 4.15 W/(m<sup>2</sup>K) a causa del vetro singolo e del telaio metallico.

In generale, in Italia i reparti ospedalieri sono caratterizzati unicamente da sistemi di riscaldamento con radiatori, le sale operatorie e le stanze da un sistema a tutta aria, mentre i corridoi, gli ambulatori e gli uffici da un sistema di climatizzazione misto aria-acqua. A causa di vari ampliamenti avvenuti nel corso degli anni, l'impianto di climatizzazione dell'azienda 'F. L'ospedale Veneziale è molto diversificato. Per i servizi di riscaldamento e acqua calda sanitaria (ACS) sono presenti due caldaie centralizzate per una potenza termica complessiva di 7000 kW ed un rendimento nominale del 96%. Con le pompe di circolazione principali il fluido termovettore viene movimentato dalle caldaie, poste ai piani interrati, ai diversi collettori e scambiatori di calore posti su ogni piano. L'acqua calda a 80°C viene fornita ai radiatori interni e alle serpentine di riscaldamento delle unità di trattamento dell'aria. Per l'ACS vengono utilizzati quattro serbatoi da 5000 l. Un totale di 11 UTA sono dotate di umidificatori ad acqua ma non includono sistemi di recupero del calore. Per il

servizio di raffrescamento, sono presenti due refrigeratori ad acqua con una capacità frigorifera di 1860 kW ciascuno. Inoltre, solo in alcune stanze sono installati sistemi split autonomi.

La Figura 78 mostra lo schema di base del sistema HVAC presente nello stato attuale del caso studio ospedaliero. È da sottolineare che nello schema in figura le zone caratterizzate dalla stessa alimentazione sono state raggruppate in un'unica macrozona. Esistono tre macrozone condizionate con diversi fluidi termovettori: una macrozona servita con aria, una macrozona servita solo con acqua ed un'altra condizionata con aria e acqua.

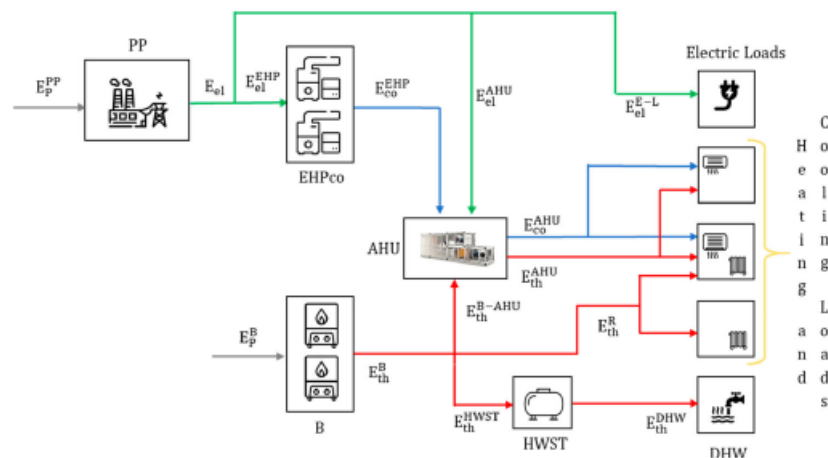


Figura 78. Sistema HVAC nel caso base (BC)

Nello specifico, nel caso del riscaldamento, il gas naturale, al quale è associata l'energia primaria  $E_p^B$ , alimenta le due caldaie (B). Considerando l'energia termica prodotta  $E_{th}^B$ , una parte di essa viene utilizzata direttamente per il riscaldamento degli ambienti ( $E_{th}^R$ ) tramite radiatori; altre parti, denominate  $E_{th}^{HWST}$  e  $E_{th}^{B-AHU}$ , sono utilizzate rispettivamente per la produzione di acqua calda sanitaria all'interno dei serbatoi (HWST) e per il condizionamento dell'aria nelle unità di trattamento aria (AHU). L'energia termica proveniente dalle UTA ( $E_{th}^{AHU}$ ) viene poi inviata alle zone dotate del sistema misto aria/acqua. L'energia primaria ( $E_p^{PP}$ ) da considerare nel raffrescamento è quella a monte della centrale elettrica (PP). L'elettricità ( $E_{el}$ ) viene utilizzata per alimentare i carichi elettrici ( $E_{el}^{E-L}$ ), le UTA ( $E_{el}^{AHU}$ ) e i due refrigeratori ( $E_{el}^{EHP}$ ). Questi ultimi sottraggono energia frigorifera ( $E_{CO}^{EHP}$ ) alle UTA. L'energia di raffreddamento delle UTA ( $E_{CO}^{AHU}$ ) viene quindi utilizzata per raffreddare le zone termali dell'ospedale.

#### 4.5.1. Modello numerico e calibrazione

Il modello numerico dell'Ospedale "F. Veneziale" è stato sviluppato nel motore EnergyPlus [33] attraverso la sua interfaccia grafica DesignBuilder [32]. È stato utilizzato l'algoritmo "Funzioni di trasferimento della conduzione" con un passo temporale pari a 2. Questo metodo definisce il flusso di calore attraverso l'involucro edilizio in funzione del valore del flusso di calore nell'istante di tempo precedente e dei valori delle temperature superficiali esterne ed interne nell'istante di tempo attuale e precedente. In questo modo non è necessario

calcolare il campo di temperatura all'interno dell'elemento, risultando un metodo veloce e molto potente. D'altra parte, alcune singolarità del flusso di calore, come i ponti termici, non possono essere valutate. Inoltre, un presupposto forte, nell'utilizzo del motore Energy Plus, è la considerazione della zona dell'aria interna perfettamente miscelata e di conseguenza viene considerato un solo valore di temperatura. Ovviamente, in realtà, questo presupposto non è vero, soprattutto per le zone alte dove esiste la possibilità di stratificazione della temperatura dell'aria.

Per quanto riguarda le condizioni climatiche esterne, si tiene conto della variabilità oraria di tutti i parametri climatici (quali temperatura dell'aria, umidità, velocità e direzione del vento, pioggia e radiazione solare) utilizzando i dati meteo resi disponibili dal CTI (Comitato Termotecnico Italiano - <https://www.cti2000.it/>). Per quanto riguarda i carichi interni, i principali parametri impostati sono riportati nella Tabella 46. I programmi di occupazione, funzionamento delle apparecchiature elettriche e luci artificiali sono stati implementati secondo i valori tipici delle strutture sanitarie, definiti dal software Design-Buider.

	Densità occupazionale [persone/m <sup>2</sup> ]	Tasso metabolico [W/persona]	Densità di potenza elettrica delle luci artificiali [W/m <sup>2</sup> ]	Densità di potenza delle apparecchiature elettriche [W/m <sup>2</sup> ]
Reparto generico	0.175	140	8.0	12.9
Aree di circolazione pubblica	0.213	140	3.0	5.0
Unità camera da letto	0.105	140	5.0	3.6
Reparto generico	0.175	140	8.0	8.0
Sala operatoria	0.125	160	17.0	8.0

**Tabella 46. Carichi interni**

Il modello numerico è stato calibrato secondo l'approccio "Whole Building Level Calibration with Monthly Data" introdotto dalle Linee guida M&V [31]. I consumi storici di gas ed energia elettrica sono stati raccolti dal 2005 al 2013. Il confronto tra consumo di gas naturale reale e simulato mostra un errore nel consumo energetico annuo pari a +0.1%, un coefficiente di variazione dell'errore quadratico medio pari a 3.44% e un errore di bias medio pari a -0.8%. Risultati simili sono stati ottenuti per l'elettricità. Tutti questi rientrano nei livelli di accettabilità definiti dalla norma presa in considerazione. Pertanto, il modello potrebbe essere considerato calibrato e coerente con la realtà.

#### 4.5.2. Le configurazioni HVAC proposte

Il primo intervento energetico effettuato è l'installazione di un impianto fotovoltaico (PV). Dopo la valutazione delle aree disponibili, si è optato per l'installazione del fotovoltaico sulle pensiline esposte a sud nell'area adiacente all'ospedale. La Figura 79 illustra il layout di base del sistema HVAC con fotovoltaico. I servizi di riscaldamento e raffreddamento sono nella stessa configurazione del caso base. L'energia elettrica prodotta dai moduli fotovoltaici ( $E_{el}^{PV}$ ) se in eccesso viene immessa in rete, mentre se è inferiore alla domanda, viene integrata dall'energia elettrica prelevata dalla rete ( $E_{el}^{PP}$ ).

I moduli fotovoltaici utilizzati nelle simulazioni sono i pannelli SunPower Maxeon 3. Ogni pannello è dotato di 122 celle monocristalline con una potenza di picco di 430 W ed un'efficienza del 22.7% [268]. La Tabella 47 riassume le caratteristiche tecniche del modulo utilizzato. Per coprire l'area prescelta sono necessari 400 moduli per una potenza di picco totale di 172 kW.

La seconda misura di retrofit è la sostituzione delle due caldaie centralizzate con un sistema di cogenerazione (CHP). La Figura 80 mostra la disposizione di base del sistema HVAC in questo caso. Il cogeneratore è alimentato a gas naturale (l'energia primaria associata è  $E_p^{CHP}$ ) che viene convertito in energia elettrica ( $E_{el}^{CHP}$ ) ed energia termica ( $E_{th}^{CHP}$ ). Quest'ultima è utilizzata per le UTA ( $E_{th}^{CHP-AHU}$ ) e i radiatori ( $E_{th}^R$ ). Quando la cogenerazione non è in grado di soddisfare tutta la domanda elettrica, parte dell'energia viene prelevata dalla rete elettrica; se invece la cogenerazione produce più del necessario, il surplus viene immesso in rete.

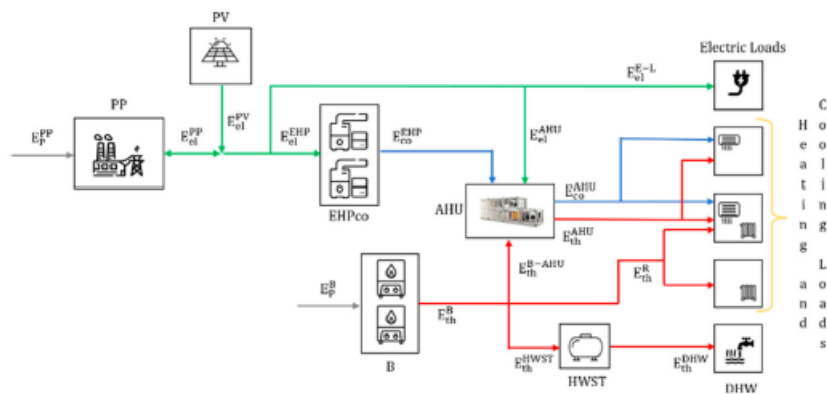


Figura 79. Schema di base del sistema HVAC con l'impianto fotovoltaico

Produttore	SunPower
Tipo di modulo	Mexeon 3
Città di produzione del modulo PV	Messico
Tecnologia delle celle	Monocristalline
Potenza relativa per modulo [Wp]	430
Efficienza del modulo [%]	22.7
Dimensioni e peso	1690mm x 1046 mm x 40mm; 21.2 kg

Tabella 47. Caratteristiche tecniche del modulo fotovoltaico utilizzato

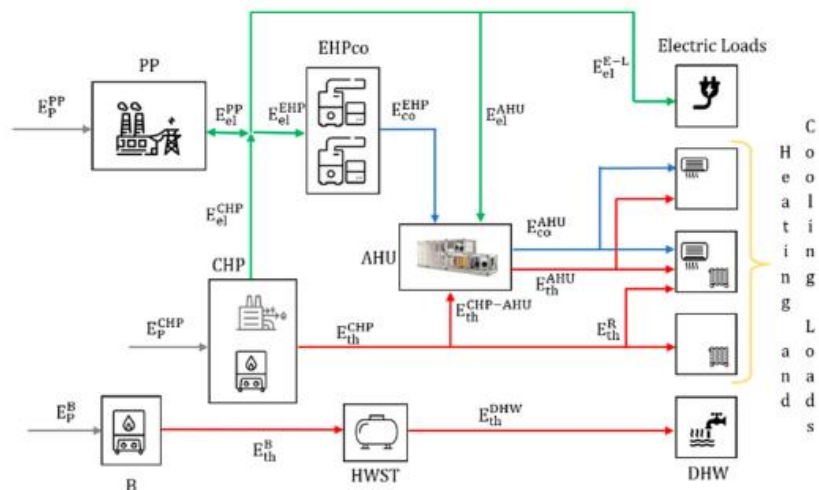


Figura 80. Schema di base del sistema HVAC con un impianto di cogenerazione

Per quanto riguarda i flussi energetici frigoriferi non sono state apportate modifiche alla configurazione base. Da sottolineare che esiste un'unica caldaia che produce ACS e, quando il cogeneratore non è in grado di far fronte ai carichi termici, funziona come riserva.

Dall'analisi delle richieste di energia termica per il riscaldamento dell'ospedale su base oraria è possibile ricostruire la curva di carico ed è stato individuato un valore di picco di circa 172 kW per un tempo di funzionamento di 4000 h. Questo valore di potenza viene poi preso come riferimento per la scelta del cogeneratore. Viene scelto il modello Enerblu Cogenerazione "REC2 140 G" dotato di motore a scoppio e alimentato a gas naturale [269]. La Tabella 48 mostra i dati tecnici del generatore utilizzato.

Potenza elettrica nominale [kW]	136
Potenza termica nominale [kW]	207
Efficienza elettrica [%]	34.7
Efficienza termica [%]	52.8
Efficienza globale [%]	87.5
Tipo di combustibile	Gas naturale
Modello del cogeneratore	REC2 140 G

Tabella 48. Caratteristiche tecniche del cogeneratore utilizzato

Un'ulteriore configurazione consiste nella sostituzione della caldaia e del refrigeratore con una pompa di calore elettrica reversibile (EHP). Lo schema è mostrato in Figura 81. In questo caso, avendo a disposizione un sistema di generazione a bassa temperatura, è stata predisposta la sostituzione dei radiatori con i più efficienti ventilconvettori per il riscaldamento degli ambienti. La domanda di energia elettrica per il funzionamento dell'EHP ( $E_{el}^{EHP}$ ) viene convertita in energia termica ( $E_{th}^{EHP}$ ) ed energia di raffreddamento ( $E_{CO}^{EHP}$ ). Il primo viene utilizzato direttamente nelle UTA e nei ventilconvettori; il secondo viene sottratto solo al sistema UTA. L'ACS non viene prodotta dalla pompa di calore ma dalla caldaia.

Nel caso reale vengono utilizzate 7 pompe di calore con 1090 kW di potenza termica ciascuna. L'EHP scelto è "i-FX-N-G01/SL-A" di Mitsubishi Electric [270] le cui principali caratteristiche tecniche sono riportate nella Tabella 49.

Un'altra configurazione sviluppata prevede l'installazione contemporanea delle pompe di calore elettriche reversibili e dell'impianto fotovoltaico. La Figura 82 mostra lo schema del layout. Le tecnologie utilizzate sono le stesse presentate nei singoli PAC con la sola pompa di calore e modulo fotovoltaico. In questo caso l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico ( $E_{el}^{PV}$ ) viene utilizzata per alimentare l'EHP ( $E_{el}^{EHP}$ ), i ventilatori dell'UTA ( $E_{el}^{AHU}$ ) e i carichi elettrici puri dell'edificio ( $E_{el}^{E-L}$ ). Se non è sufficiente a soddisfare tutti i carichi elettrici, l'energia elettrica viene prelevata dalla rete; se invece la produzione supera il fabbisogno, questa energia elettrica viene ceduta alla rete. Anche in questo caso per la produzione di ACS viene utilizzata una caldaia separata e analogamente i radiatori sono stati sostituiti con ventilconvettori. Il numero delle tecnologie utilizzate, la tipologia e la disposizione sono le stesse dei casi già trattati.

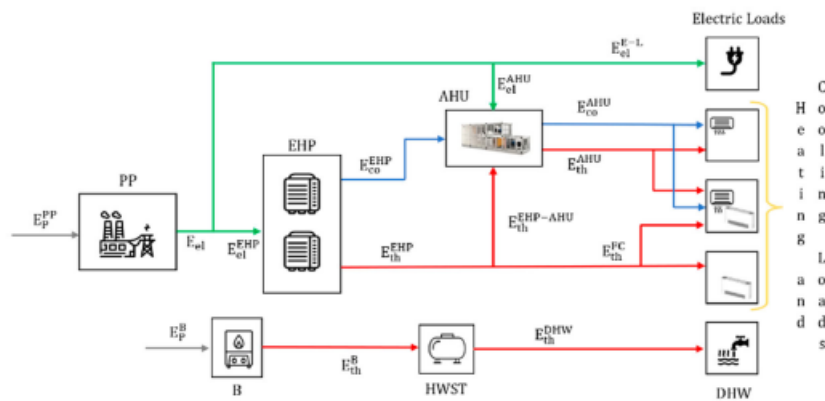


Figura 81. Schema di base del sistema HVAC con pompa di calore elettrica

Potenza frigorifera [kW]	1113
EER [/]	2.9
Potenza termica totale [kW]	1090
COP [/]	3.47

Tabella 49. Caratteristiche tecniche dell'EHP utilizzata

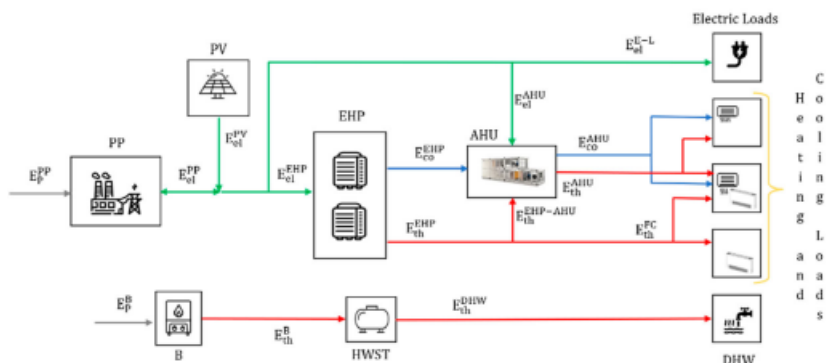


Figura 82. Schema di base del sistema HVAC con pompa di calore elettrica e impianto fotovoltaico

L'ultima configurazione di retrofit sviluppata prevede l'integrazione di collettori solari termici (STC) con la caldaia e una pompa di calore ad assorbimento (AHP) dotata di torre evaporativa. Questa valutazione preliminare non ha tenuto conto del consumo di acqua della torre evaporativa e dei trattamenti che quest'ultima deve ricevere per evitare problemi di disincrostazione. Purtroppo per far funzionare questo PAC ci sono ulteriori costi energetici e spese economiche legate a questi trattamenti, oltre che all'acqua da integrare per bilanciare quella evaporata.

La Figura 83 mostra il layout di base. L'STC è collegato a un serbatoio dell'acqua calda (HWST). L'energia termica prodotta ( $E_{th}^{TANK}$ ) alimenta l'AHP ( $E_{th}^{AHP}$ ) e la parte restante viene fornita ai ventilconvettori ( $E_{th}^{FC}$ ) e alle UTA ( $E_{th}^{AHU}$ ). In questo caso, il servizio di ACS proviene anche esso all'HWST. Quando i collettori solari non sono in grado di soddisfare la richiesta di energia termica AHP, interviene una caldaia di riserva. Per dimensionare il campo solare si considerano le superfici disponibili esposte a sud. In particolare, vengono utilizzati collettori solari a tubi sottovuoto "Aton G 22" di Kloben Industries [271]. Le loro caratteristiche sono riassunte nella Tabella 50. Dalla superficie disponibile per il campo solare, la potenza assorbita è di 301 kW. Per questo motivo è stato scelto un assorbitore Maya Yazaki "M100" da 503 kW, con una capacità frigorifera di 352 kW [272]. I dati principali delle UTA sono riportati in Tabella 51. La torre evaporativa è infine dimensionata con una potenza dissipata di 855 kW. In particolare, sono state scelte due torri da 767 kW ciascuna (2220×2420 mm), 'H1/10' di Ilmed Impianti [273].

Infine, viene effettuata anche un'analisi di sensibilità aggiungendo un recuperatore di calore a ciascuna UTA negli interventi proposti e finora mostrati. In particolare, il recuperatore utilizzato è il "Adv Next Air" [274] i cui principali dati tecnici sono riportati nella Tabella 52.

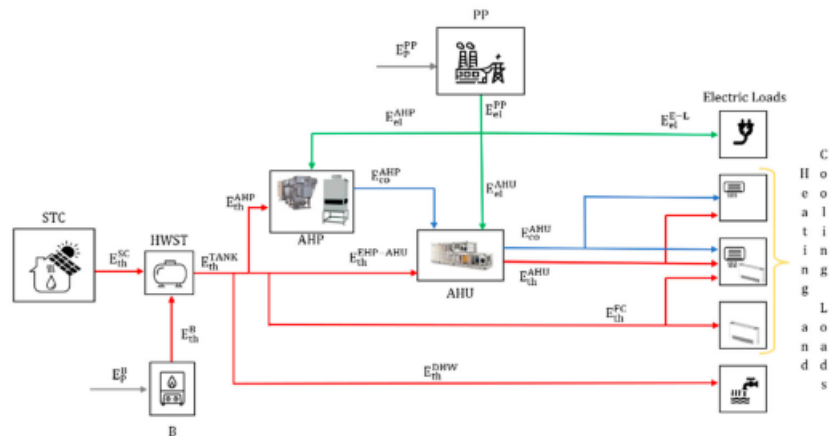


Figura 83. Schema di base del sistema HVAC con collettori solari termici e pompa di assorbimento

Superficie lorda [m <sup>2</sup> ]	4.71
Lunghezza [mm]	2446
Altezza [mm]	1925
Efficienza ottica $\eta_o$ (1000 W/m <sup>2</sup> ) [%]	71.8

Perdita di calore di primo ordine $a_1$ [W/ m <sup>2</sup> K]	1.051
Perdita di calore di secondo ordine $a_2$ [W/ m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ]	0.0004
Angolo di incidenza [°]	50
$K_{\theta b}(\theta_{laterale})$	1.09
$K_{\theta b}(\theta_{trasversale})$	0.90

**Tabella 50. Caratteristiche tecniche del collettore solare termico utilizzato**

Potenza di assorbimento [kW]	503
Capacità di raffreddamento [kW]	352
Potenza dissipata [kW]	855
Potenza assorbita per l'alimentazione [W]	630

**Tabella 51. Caratteristiche tecniche della pompa di calore ad assorbimento utilizzata**

La portata nominale di recupero [m <sup>3</sup> /h]	8900
Efficienza a portate bilanciate [/]	74.9
Tipo di unità di recupero del calore	Flusso incrociato

**Tabella 52. Caratteristiche tecniche dell'unità di recupero calore utilizzata**

### 4.5.3. Risultati

In questa sezione vengono riportati i risultati della simulazione dinamica in termini di fabbisogno di energia primaria ed emissioni di CO<sub>2</sub> per ciascun caso considerato. Come detto, sono state prese in considerazione due efficienze del sistema elettrico nazionale: la prima è pari a 0.781 (Scenario 1) e la seconda è pari a 0.495 (Scenario 2). Viene inoltre stimato l'impatto del recupero termico sui risultati energetici e ambientali del sistema edificio-impianto.

#### *ANALISI ENERGETICA*

La Figura 84 mostra l'energia primaria ( $E_p$ ) e il risparmio di energia primaria (PES) per le diverse soluzioni considerate e confrontati con il BC. Nel primo scenario di efficienza del sistema elettrico nazionale l'analisi dei dati evidenzia il fatto che, rispetto al BC, che è il più energivoro, gli interventi che presentano una minore domanda di energia primaria e, quindi, un maggiore risparmio di energie primarie sono quelle che considerano un AHP alimentato da STC e cogenerazione. Con l'introduzione della cogenerazione si ha un PES di circa il 21% poiché parte dell'energia elettrica necessaria a soddisfare i carichi elettrici viene prodotta in loco. Allo stesso modo, quando si considerano gli AHP, si verifica un PES di circa il 20%. In questo caso il risparmio deriva dal fatto che una parte significativa dell'energia frigorifera è ottenuta gratuitamente grazie alla conversione dell'energia solare termica in AHP. L'intervento peggiore, invece, è rappresentato dall'installazione dell'EHP. Richiede un consumo di energia primaria quasi pari a quello del BC e raggiunge un risparmio di

energia primaria di circa l'1%. Questo risultato è dovuto al fatto che non esiste una fonte rinnovabile che soddisfi il fabbisogno energetico del sistema edificio-impianto.



Figura 84. Fabbisogno di energia primaria e risparmio di energia primaria nello Scenario 1

La stessa analisi viene fatta anche nel secondo scenario considerando un'efficienza del sistema energetico nazionale pari a 0.495. La Figura 85 mostra i risultati. Con una minore efficienza del sistema di centrale, aumenta la domanda di energia primaria di tutte le soluzioni, soprattutto quella delle configurazioni con i carichi elettrici più elevati, ovvero quelle basate su EHP. Il contributo dell'impianto fotovoltaico non è molto significativo, il fabbisogno di energia primaria della soluzione che prevede EHP e impianto fotovoltaico è leggermente inferiore a quello dell'impianto con solo EHP; si riduce da 15.41 GWh a 14.51 GWh ma rimane superiore a quello del BC (13.9 GWh). Pertanto, trascurando il contributo delle FER al sistema elettrico nazionale, le PAC in cui la richiesta di energia elettrica è più elevata, ovvero quelle in cui si utilizza un EHP, vedono un netto peggioramento delle proprie prestazioni energetiche. La minore efficienza del sistema PP determina un aumento della domanda di energia primaria. Quando, invece, si considerano le fonti energetiche rinnovabili, ad esse non è associata alcuna energia primaria e quindi, a parità di quantità di energia elettrica fornita, la relativa energia primaria si riduce, il che equivale a un  $\eta^{PP}$  più elevato.

La migliore configurazione impiantistica in questo scenario è quella basata sulla cogenerazione, che garantisce un PES superiore al 21% con una domanda primaria di 10.9 GWh.

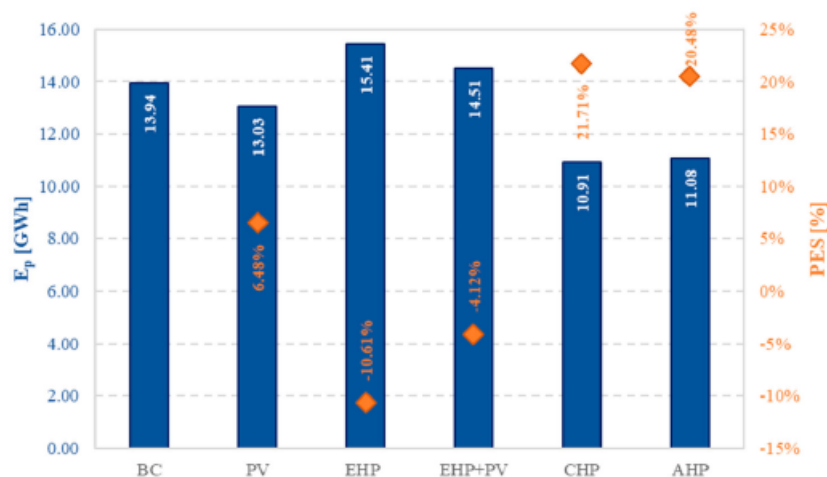


Figura 85. Fabbisogno di energia primaria e risparmio di energia primaria nello scenario 2

Per valutare la dipendenza energetica dell'ospedale dalle forniture energetiche esterne, lo IELI, precedentemente introdotto, è stato calcolato solo per quegli interventi che prevedono una certa produzione di energia elettrica, quelli con moduli fotovoltaici e cogenerativi. I risultati ottenuti sono mostrati nella Tabella 53. In entrambi gli scenari la dipendenza più bassa si riscontra quando sono installati sistemi di cogenerazione, mentre la quota di energia importata è maggiore nei casi con impianti fotovoltaici.

In generale, analizzando i dati, si può concludere che questo edificio, in tutte le configurazioni impiantistiche in cui è presente una generazione elettrica e un'interazione bidirezionale con la rete, dipende fortemente dagli apporti energetici esterni. Questa situazione è dovuta principalmente alla bassa produzione di energia elettrica (per il carico) e non dipende dalla non contemporaneità tra generazione e carico; infatti, la quantità di energia elettrica immessa nel sistema elettrico nazionale non è sempre significativa.

IELI	Scenario 1 ( $\eta^{pp} = 0.781$ )	Scenario 2 ( $\eta^{pp} = 0.495$ )
PV	94.92%	93.61%
EHP + PV	94.85%	94.20%
CHP	92.61%	90.73%

Tabella 53. Indice del livello di energia importata per le soluzioni alternative nei due scenari considerati

### ANALISI AMBIENTALE

In Figura 86 sono riportati i valori di emissione di anidride carbonica equivalente per tutte le soluzioni impiantistiche e le variazioni percentuali (asse rosso a destra) degli interventi proposti rispetto al BC. Anche in termini di emissioni di CO<sub>2</sub> si conferma che l'impianto in cui è prevista la pompa di calore elettrica è l'intervento peggiore, addirittura ha emissioni di anidride carbonica più elevate rispetto al caso base e quindi una variazione negativa (-3.49%). Le EHP possono essere considerate una soluzione interessante se accompagnate dall'installazione di un impianto fotovoltaico ( $\Delta\text{CO}_2 = 2.18\%$ ). D'altro canto, ancora una volta la cogenerazione si rivela l'intervento migliore, poiché consente di ottenere una riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> rispetto al caso base di circa il 21%.

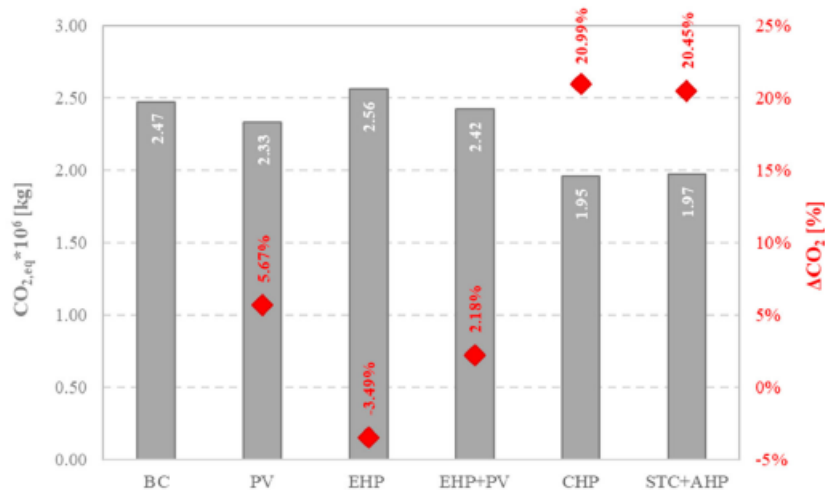


Figura 86. Emissioni di anidride carbonica e variazione (rispetto al BC) nello Scenario 1

### ANALISI DI SENSITIVITA' CON RECUPERO DI CALORE

Le analisi proposte in precedenza vengono ripetute in questa sezione considerando che l'UTA dell'ospedale è dotata di recuperatori di calore a piastre a flussi incrociati. In questo caso, oltre ai benefici del recupero energetico, nelle analisi è stata considerata la maggiore richiesta di energia elettrica per la ventilazione. Le sei soluzioni alternative per l'HVAC vengono confrontate nei due diversi scenari. Le barre della Figura 87 mostrano che i valori di energia primaria dei sei impianti alternativi indagati nel primo scenario per l'efficienza del sistema elettrico nazionale si riducono nel caso base, con pannelli fotovoltaici e con AHP alimentati da STC, mentre aumentano nel caso con EHP, anche in abbinamento al sistema fotovoltaico e al sistema di cogenerazione. Queste ultime circostanze si verificano a causa della maggiore incidenza sulla domanda elettrica dell'energia richiesta dai ventilatori aggiuntivi necessari per il recupero di calore a vantaggio ottenuto nelle richieste di riscaldamento e raffreddamento. Di conseguenza, il risparmio di energia primaria degli interventi proposti non aumenta mai rispetto al BC con recupero di calore. La migliore tecnologia, il refrigeratore ad assorbimento alimentato da energia solare termica, presenta un risparmio di energia primaria di circa il 27% rispetto al caso base. Questo risparmio aumenta al 42.8% se si confronta la soluzione proposta con il BC senza recupero di calore. Invece la tecnologia peggiore risulta essere la pompa di calore elettrica: quest'ultima presenta una domanda di energia primaria superiore al caso base di 1.45 GWh e quindi un PES negativo.



Figura 87. Domanda di energia primaria ( $E_p$ ) e risparmio di energia primaria (PES) nello scenario 1

Nello scenario di minore efficienza del sistema elettrico nazionale (Figura 88) il comportamento energetico degli impianti non cambia rispetto al caso precedente, ovviamente, i fabbisogni di energia primaria aumentano in ciascuna delle soluzioni proposte. In particolare, si registra un notevole peggioramento delle due proposte con la pompa di calore elettrica e quindi nemmeno l'impianto fotovoltaico permette di risparmiare energia primaria rispetto al BC.

Confrontando gli interventi con e senza recupero di calore, si riscontra un peggioramento del risparmio di energia primaria nello scenario 2 a causa del carico elettrico aggiuntivo per la ventilazione e del maggiore impatto dell'elettricità sulla domanda di energia. L'unica eccezione è nella soluzione con AHP. Anche in termini di emissioni di anidride carbonica, confrontando i diversi interventi con e senza recupero di calore, si nota che la riduzione percentuale delle emissioni di anidride carbonica peggiora in tutti gli interventi proposti tranne nel caso di AHP e STC.

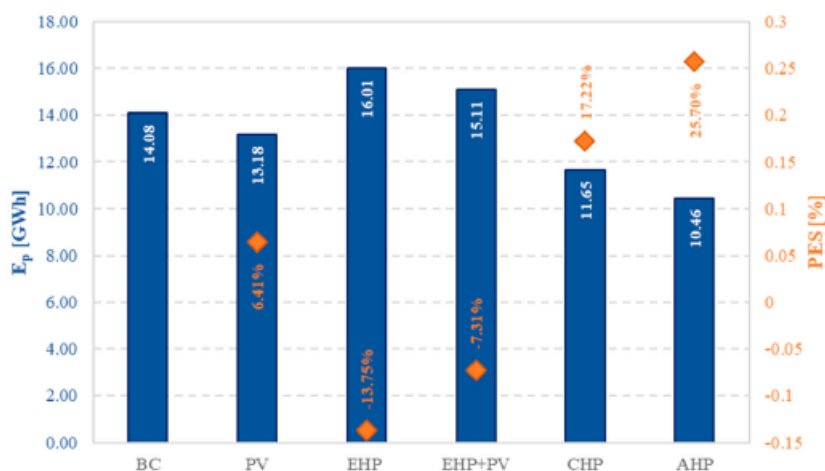


Figura 88. Domanda di energia primaria ( $E_p$ ) e risparmio di energia primaria (PES) nello scenario 2

Infine, anche nel caso del recuperatore di calore, viene calcolata la dipendenza della struttura dalle forniture esterne. La Tabella 54 mostra i risultati ottenuti. L'andamento dell'indice è lo stesso dei casi in cui non vengono utilizzati i recuperatori di calore, ma i valori dell'indice IELI aumentano, tranne che nel primo scenario e con l'impianto fotovoltaico. L'edificio analizzato è lungi dall'essere autosufficiente dal punto di vista energetico, ma dipende fortemente da approvvigionamenti esterni.

IELI	Scenario 1 ( $\eta^{PP} = 0.781$ )	Scenario 2 ( $\eta^{PP} = 0.495$ )
PV	94.82%	93.67%
EHP + PV	95.01%	94.42%
CHP	92.79%	91.12%

**Tabella 54. Indice del livello di energia importata per le soluzioni alternative nei due scenari considerati con recuperi di calore**

#### **4.6. Importanza della progettazione degli emettitori di aria nelle strutture sanitarie: mappe fluidodinamiche computazionali**

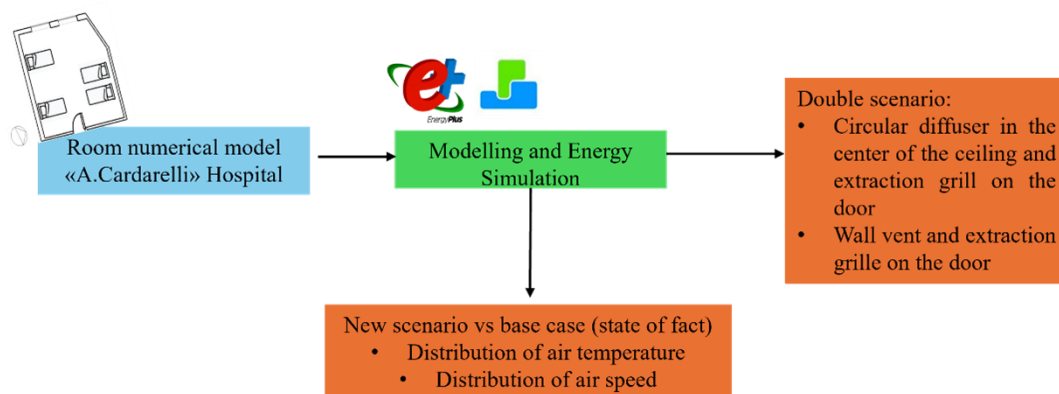
Le strutture sanitarie sono ambienti particolarmente complessi poiché convivono persone con esigenze di comfort diverse: i pazienti, a causa della loro mobilità limitata, necessitano di ritmi metabolici più bassi mentre il personale sanitario necessita di ritmi metabolici più elevati [194]. Inoltre, una buona qualità dell'aria all'interno delle stanze di degenza favorisce da un lato un recupero più rapido del paziente e dall'altro un ambiente di lavoro confortevole per il personale. Inoltre, una buona ventilazione riduce la diffusione di malattie nei blocchi chirurgici e nelle sale operatorie. Lu et al., mediante un approccio numerico, hanno studiato la distribuzione dei contaminanti all'interno di una stanza di degenza utilizzando diversi tipi di ventilazione (stratificata, mista, discendente e a spostamento) e hanno dimostrato che la ventilazione stratificata riduce al minimo il rischio di contaminazione del personale [275]. Sheng et al., con l'obiettivo di migliorare le condizioni termiche hanno proposto un nuovo tipo di ventilazione a induzione verticale [276]. Invece, alcuni studi hanno rilevato che le posizioni delle bocchette di ingresso e di uscita influenzano significativamente l'efficienza di rimozione dei patogeni [277] e anche il comfort termico [205]. In breve, all'interno di una struttura sanitaria, una buona ventilazione dovrebbe essere uno degli aspetti principali da prendere in considerazione durante la fase di progettazione o di ristrutturazione di edifici esistenti [191] sia per garantire un basso rischio di contaminazione sia per raggiungere il benessere. C'è un'evidente necessità di ricerca interdisciplinare nel campo per affrontare le sfide urgenti [278]. Uno studio multidisciplinare che combina modelli avanzati di computer, test sperimentali e progetti sperimentali in loco potrebbe fornire prove per identificare intervalli ottimali per temperatura, umidità e ACH insieme a strategie di progettazione della ventilazione appropriate [205]. In questo contesto, l'obiettivo del documento è l'introduzione di un metodo per valutare possibili strategie di progettazione per i sistemi di riscaldamento, raffreddamento e ventilazione che consentano di ridurre al minimo le infezioni e rendere l'ambiente ospedaliero più sano. Viene investigato il potenziale della simulazione della dinamica computazionale dei fluidi al fine di esplorare l'influenza di diversi percorsi di movimento della posizione degli emettitori, nonché l'efficienza della ventilazione sotto diverse configurazioni di immissione di aria.

Gli ospedali sono strutture molto complesse, per cui il loro requisito fondamentale è avere un ambiente il più "pulito" possibile dal punto di vista dei contaminanti. A seguito della pandemia da Covid-19, i prerequisiti per raggiungere obiettivi di salubrità sono diventati ancora più stringenti. Esistono diversi studi scientifici che confrontano le strategie di ventilazione ma non esiste un metodo standardizzato o l'analisi dell'influenza dei parametri esterni e interni basata su dati reali monitorati nelle stanze dei pazienti. Per queste ragioni, il lavoro si concentra sulla strategia di ventilazione adottata in una stanza di degenza reale del reparto di chirurgia dell'ospedale "Cardarelli" di Campobasso (Italia). Partendo dalla validazione di un modello numerico mediante concentrazione di anidride carbonica misurata, la ventilazione naturale, effettivamente presente nella stanza, viene confrontata con quella meccanica con due diverse emettitori come possibile configurazione di ristrutturazione. Più nel dettaglio, si considera:

- installazione di un diffusore circolare al centro del soffitto e griglia di estrazione sulla porta;
- installazione di una bocchetta a parete e griglia di estrazione sulla porta.

Per creare mappe di distribuzione della qualità interna, il modello calibrato è stato simulato in termini di fabbisogno energetico e parametri interni; quindi, è stato utilizzato il modulo per la fluidodinamica computazionale (CFD) di DesignBuilder.

La CFD applicata agli edifici fornisce al progettista informazioni sulle probabili velocità dell'aria, pressioni e temperature che si verificano nella stanza con condizioni al contorno specificate, tra cui clima, guadagni di calore interni e sistemi attivi. DesignBuilder CFD si basa su un metodo noto come volume finito che comporta la soluzione di un insieme di equazioni differenziali parziali che descrivono il trasporto di quantità di impulso, energia e turbolenza. Le equazioni differenziali parziali vengono convertite in un insieme di equazioni algebriche simultanee. Più in dettaglio, la stanza in analisi è divisa in un insieme di celle rettilinee adiacenti non sovrapposte (griglia a volume finito). Le equazioni algebriche vengono impostate per ogni cella della griglia e l'intero insieme di equazioni viene risolto utilizzando un metodo numerico. Nelle due configurazioni di ristrutturazione selezionate, le condizioni al contorno sulla temperatura dell'aria in ingresso e sulla sua portata vengono aggiornate in base al tipo di sistema e alla scheda tecnica degli emettitori. L'approccio metodologico è riassunto nella Figura 89.



**Figura 89. Approccio metodologico dello studio**

Il modello numerico è quello della stanza multipla, già descritta e calibrata precedentemente.

La stanza non è dotata di impianto di aria condizionata; i radiatori sono installati e collegati ad una caldaia centrale interrata per la richiesta di riscaldamento. La ventilazione naturale è consentita dalle finestre mentre non è presente una ventilazione centralizzata. L'ufficio manutenzione dell'ospedale, anche tenendo conto delle indicazioni dei pazienti, sta lavorando al rifacimento dell'impianto attivo e tra gli interventi c'è l'installazione di un impianto centralizzato di riscaldamento, ventilazione e aria condizionata. L'analisi contribuisce alla progettazione confrontando due diversi terminali: un diffusore circolare posizionato al centro del soffitto e una bocchetta di immissione a parete. Per quanto riguarda il diffusore, è stato considerato il diffusore elicoidale termostatico a geometria variabile, con diametro nominale di 250 mm. Dovendo condizionare la stanza, è stato scelto un grado di lancio di  $67.5^\circ$ . Inoltre, è stato scelto un diffusore con portata d'aria di  $521 \text{ m}^3/\text{h}$  e velocità di aspirazione dell'aria di  $3 \text{ m/s}$  [279]. Per la bocchetta di immissione è stata considerata una doppia fila di alette orientabili singolarmente della "tecno-ventil". In particolare, è stata scelta una bocchetta con portata d'aria pari a circa  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  [280]. La griglia di estrazione, in entrambi i casi, è stata posizionata sulla porta.

#### **4.6.1. Risultati CFD**

##### *DIFFUSORE CIRCOLARE*

La Figura 90 mostra la distribuzione della temperatura nel caso base e considerando il diffusore che immette nella stanza aria fresca in condizioni neutre ( $26^\circ\text{C}$ ) principalmente per la ristrutturazione e la rimozione degli inquinanti. La ventilazione uniforma il campo termico con una temperatura massima all'interno della posizione del paziente vicina ai  $26^\circ\text{C}$  mentre è di  $27^\circ\text{C}$  quando si considera la ventilazione naturale. A causa dell'effetto Coanda, l'aria si attacca al soffitto e poi cade sulle pareti, uniformando le temperature e riducendo il tempo di residenza dell'aria del 70%. Come mostrato nella Figura 91, il diffusore assicura una rapida equalizzazione della velocità e quindi l'area occupata dal paziente non è influenzata dal getto. La Figura 92 mostra la distribuzione della temperatura quando viene utilizzata la bocchetta di ingresso e in questo caso il valore massimo diminuisce per effetto di maggiore induzione assicurata dall'emettitore e raggiunge circa  $25^\circ\text{C}$  nella posizione del paziente. Anche in questo caso la condizione migliore si registra in presenza di ventilazione poiché in prossimità del paziente la velocità dell'aria è di circa  $0.25 \text{ m/s}$  (Figura 93), valore richiesto dalle normative per il comfort. Il tempo di residenza è ridotto dell'80% e questo assicura il miglior comportamento di questo tipo di emettitore.

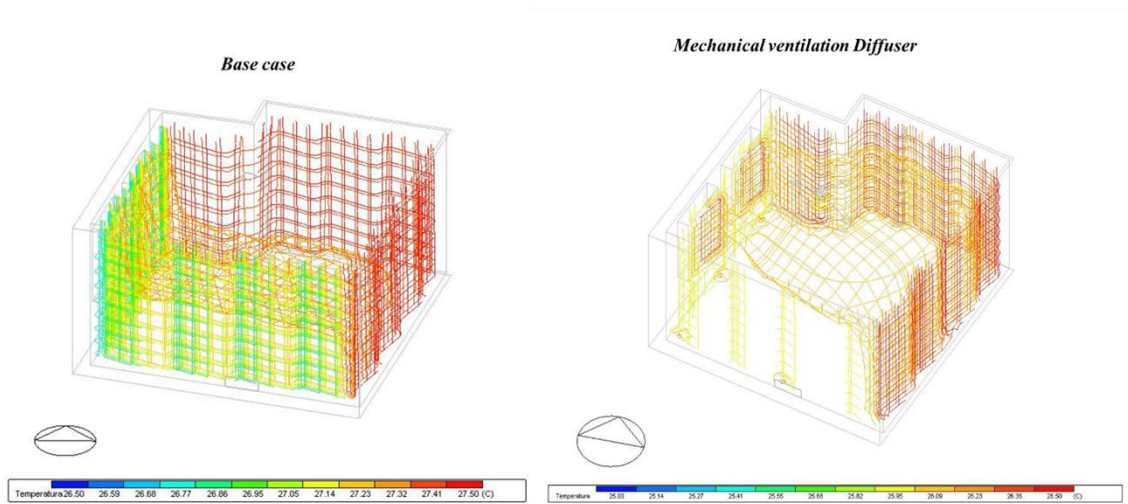


Figura 90. Distribuzione della temperatura nella cassa base e con diffusore al centro del soffitto

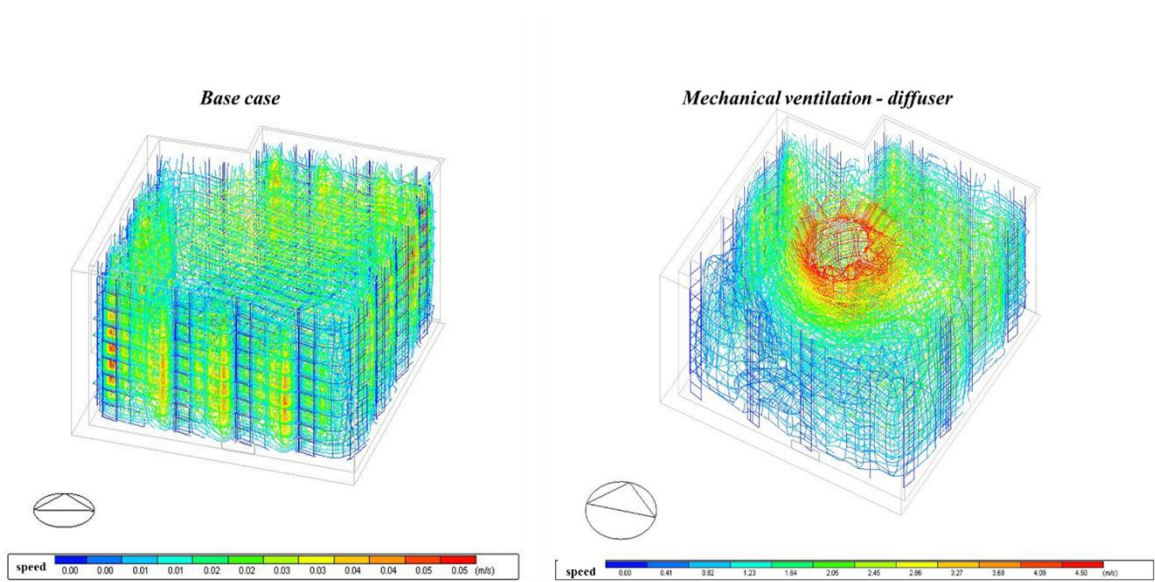


Figura 91. Distribuzione della velocità dell'aria nel case base e con un diffusore al centro del soffitto

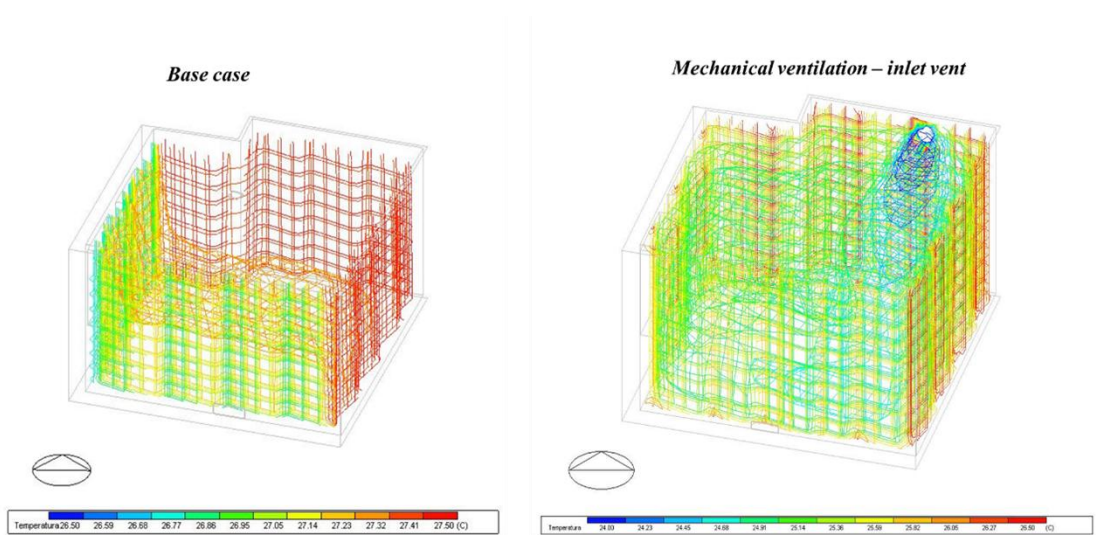
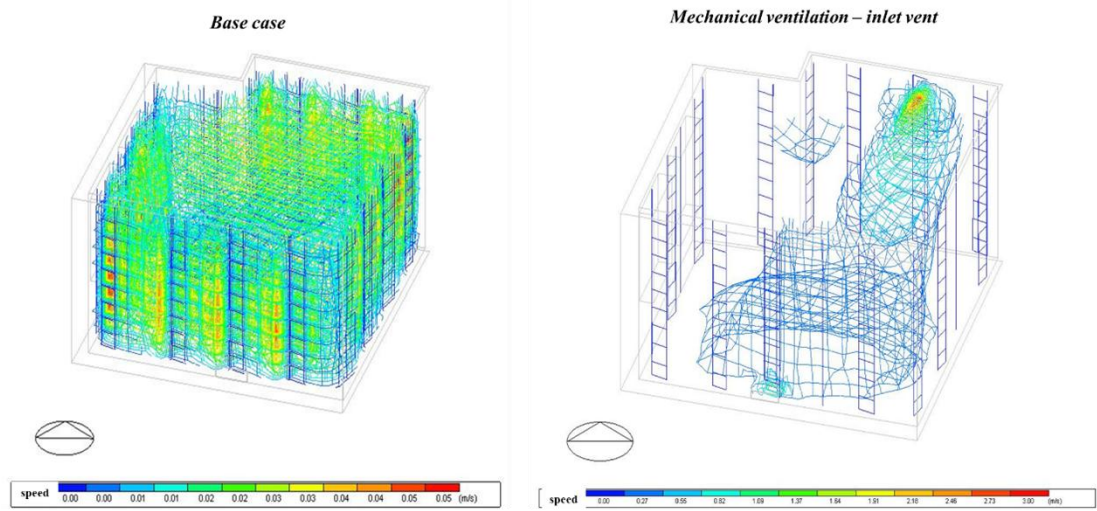


Figura 92. Distribuzione della temperatura nella cassa base e con griglia di aspirazione installata a parete



**Figura 93. Distribuzione della velocità dell'aria nella cassa base e con griglia di aspirazione installata a parete**

I risultati indicano che l'uso della CFD fornisce una visione spazio-temporale completa per l'analisi delle condizioni interne che può essere combinata con la ricostruzione della potenziale dispersione di agenti patogeni aerei indotta dall'ospedale; ciò potrebbe facilitare lo studio interdisciplinare del comfort e della sicurezza nosocomiali tra ingegneri edili, personale medico, specialisti del controllo delle infezioni ed esperti epidemiologici.

## CONCLUSIONI

L'energia è un elemento essenziale per la funzionalità delle strutture ospedaliere e per questo deve essere costantemente misurata e tenuta sotto controllo nei suoi aspetti tecnici, manutentivi, economico finanziari, tariffari ed amministrativi. Secondo recenti rilevazioni condotte in ospedali situati in zona climatica caratterizzata da Gradi Giorno maggiori di 2'000 Kd, il consumo specifico medio annuo, per il solo riscaldamento, risulta di circa 800 - 900 kWh/p.l., mentre il corrispondente consumo specifico annuo rilevato nel settore civile residenziale, per la stessa zona climatica, risulta mediamente di 275 - 400 kWh/persona. Ne risulta, tra i due tipi di utenza, un rapporto di 3:1 della richiesta specifica media, dovuta alle diverse esigenze di fruizione (sia termiche, sia temporali), ma spesso anche ad una gestione poco razionale dell'energia, che si registra abbastanza spesso nelle strutture di tipo pubblico. Pertanto, un ospedale può essere anche visto come un laboratorio energetico nel quale le fonti di energia elettrica e termica si intersecano ed interagiscono tra loro e con l'utenza per offrire un servizio il più possibile sicuro, affidabile e continuo. L'implementazione di questi servizi richiede investimenti che possono essere recuperati dalla gestione razionale dell'energia: tecnologie e sistemi gestionali appropriati e razionali si traducono in un tangibile beneficio economico-finanziario. Alla diminuzione dei posti letto e del numero di istituti ospedalieri, corrisponde un progressivo aumento dei posti letto per ciascun istituto. In effetti, la tendenza alla concentrazione delle strutture sanitarie è stata dettata dalla esigenza di rendere disponibile all'utenza apparati e strumenti diagnostici e terapeutici ad alta specializzazione medica, non altrimenti fruibili in strutture ospedaliere frazionate o sottodimensionate, realizzando così elevate economie di gestione. Questo trend è anche frutto di nuove politiche di gestione che, per ottemperare alla richiesta di un servizio sanitario sempre migliore, portano a concentrare le funzioni e le prestazioni sanitarie in strutture grandi, ognuna delle quali, però, richiede una maggiore quantità, una migliore qualità e varietà di fonti energetiche.

In quest'ambito, il progetto di ricerca sviluppato durante il periodo di dottorato ha avuto come obiettivo fondamentale l'innovazione in campo ospedaliero con riferimento a due macro-temi convergenti, quello dei materiali e soluzioni innovativi per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche e quello del microclima e le diagnosi energetica ed ambientale di ospedali esistenti. Partendo da un approfondimento delle principali problematiche connesse alla progettazione integrata delle strutture ospedaliere e delle normative connesse allo svolgimento delle attività nosocomiali, il progetto di ricerca è stato incentrato sull'analisi di soluzioni anche innovative per la minimizzazione dei consumi energetici e il controllo ottimizzato del microclima sia in termini di comfort che di qualità dell'aria. L'incalzante necessità di adeguare lo standard costruttivo ai requisiti normati energetici ed ambientali ha condotto alla diffusione sul mercato edilizio di prodotti e sistemi, talvolta molto innovativi, che hanno trovato una limitata applicazione tecnica. In dettaglio, l'attività di ricerca in materia ha riguardato sia il testing in condizioni reali di utilizzo di alcuni materiali e soluzioni ritenute particolarmente idonee al clima mediterraneo, sia l'approfondimento sui modelli teorici e matematici in regime mono- e bi-dimensionale con i quali tali elementi vengono implementati attualmente nei software di simulazione. Tra i materiali e le soluzioni per l'involucro sono stati analizzati i calcestruzzi geopolimerici e i materiali a cambiamento di fase (PCM). Tali attività sono state condotte in collaborazione con il gruppo di Fisica Tecnica

Ambientale che ha messo a disposizione i suoi laboratori anche in virtù dell'accordo di ricerca vigente tra l'Università degli Studi del Sannio (Dipartimento di Ingegneria) e l'Università del Molise (Dipartimento di Medicina).

Per stabilire un pacchetto di pareti in calcestruzzo geopolimerico e materiale a cambiamento di fase che possa fornire soluzioni sostenibili per le prestazioni degli edifici nei climi mediterranei e per trovare i principali risultati della progettazione complessiva, è stata messa a punto un'analisi in due fasi per determinare una configurazione ottimale utilizzando come caso studio laboratorio MATRIX dell'Università degli Studi del Sannio. Lo studio di ottimizzazione sviluppato è stato il punto di partenza per la successiva installazione e analisi sperimentale in quanto sono stati investigati gli effetti del tipo e dello spessore dell'isolamento, dell'intercapedine d'aria e dei tipi di PCM. Più in dettaglio, la parete di base della sala prove con pannelli isolanti sottovuoto e la configurazione di base del progetto con pannello interno con 4 cm di poliuretano e 6 cm di intercapedine d'aria (non ventilata), 2 cm di intercapedine d'aria esterna non ventilata e 10 cm di poliuretano sul lato esterno sono state confrontate con altri pacchetti in termini di minimizzazione dei carichi di riscaldamento e raffreddamento, minimizzazione delle ore di disagio e fabbisogno energetico primario annuale. Tre sono le soluzioni sul fronte di Pareto; tutte sono caratterizzate dal massimo isolamento termico sul lato esterno e interno della parete, che consente di minimizzare le perdite ma può causare un incremento del surriscaldamento. Esse differiscono per esposizione e punto di fusione del materiale. Tuttavia, i risparmi conseguibili sono comparabili e, rispettivamente in regime invernale ed estivo, sono pari a -22% e -57% rispetto alla configurazione di progettazione di base. Successivamente è stato condotto lo studio sperimentale. Il sistema installato sulla base delle precedenti ottimizzazioni è costituito da tre elementi principali: pannello interno, strato isolante in schiuma intermedio e pannello esterno in calcestruzzo geopolimerico; un modulo di queste strutture è stato modificato aggiungendo alcuni pannelli Templok (spessore 6.4 mm) con una temperatura di fusione nominale di 25°C. L'analisi dei dati sperimentali si è concentrata sullo studio delle temperature superficiali e dei flussi di calore in diverse posizioni dello strato che componeva la configurazione dell'involucro in esame. Questi dati sono stati elaborati e proposti per le settimane e i giorni più interessanti e poi sono stati calcolati diversi indici globali e nuovi come la percentuale di tempo nell'intervallo di fusione ( $time_M\%$ ), la riduzione dello stress termico, il rilascio/accumulo di calore, la differenza di temperatura superficiale su diversi strati e le sollecitazioni superficiali massime e minime.

Gli indici proposti sono utili per valutare i benefici dovuti al materiale a cambiamento di fase in condizioni reali esterne e interne evidenziando il principale effetto che l'aggiunta di uno strato di PCM ha sul comportamento termico di una struttura in calcestruzzo innovativa, caratterizzata da un elevato livello di materiali riciclati.

I risultati indicano che le sollecitazioni superficiali massime sono sempre inferiori nel modulo con PCM (denominato  $\Delta T_{s\_DBmin}$ ), ad esempio durante il 15 giugno è -2.1 °C mentre è -6.7 °C senza PCM. L'indice di stress termico è frequentemente compreso tra -17% e -37% con valori di picco fino a -50%. Nella prima settimana di maggio la temperatura superficiale dello strato geopolimerico variava da 13.6°C a 26.5°C quando associato a PCM e tra 12.5°C e 31.3°C senza di esso. Il PCM riesce generalmente a dimezzare i flussi di calore

in entrata nelle condizioni esterne più critiche (tarda mattina o pomeriggio). Ad esempio, la mattina del giorno più caldo di luglio, il flusso di calore in entrata sullo strato geopolimerico nel modulo senza PCM varia tra 7.13 e 14.7 W/m<sup>2</sup> mentre nel modulo con PCM non sale di 4.4 W/m<sup>2</sup>. Infine, considerando l'accumulo/rilascio di calore sul lato ambiente, il PCM aumenta la capacità di immagazzinare energia di circa l'89% mentre riduce di circa il 33% gli apporti di calore e quindi potrebbe contribuire a risparmiare il consumo di energia in un edificio reale. Si può concludere che i dati in ambiente reale, per un monitoraggio continuo a lungo termine, confermano l'efficacia del PCM.

Successivamente è stato studiato l'Impatto del sistema di vetratura sulla prestazione energetica di un edificio nZEB, un edificio a energia quasi zero costruito a Benevento. Il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione è possibile solo attraverso un'attenta progettazione degli edifici a energia quasi zero tenendo conto delle condizioni climatiche attuali e future affidabili. Nelle attuali condizioni climatiche gli effetti di molti vetri statici sul fabbisogno energetico per riscaldamento e raffreddamento sono contrastanti e la massima riduzione di energia primaria è stata osservata con doppi vetri a bassa emissività a selettività spettrale ( $\Delta EP \approx -3\%$ ). Quando si analizza il clima futuro, la minimizzazione dell'energia primaria è strettamente legata al contenimento del fabbisogno energetico per il raffreddamento. Considerando l'intervento di retrofit, le migliori soluzioni statiche sono quelle identificate con D\_LESSC 6-13 Arg e D\_B 6-13 Arg con cui  $\Delta Cr$  è rispettivamente circa il 25% e il 23% al 2050.

I doppi vetri a bassa emissività a selettività spettrale sono la soluzione che porta al minimo fabbisogno energetico per il raffreddamento, sia con le attuali (TMY) che con le future (CC\_MT e CC\_LT) condizioni climatiche. Questa soluzione statica è in grado di ottimizzare i controlli del guadagno solare e della perdita di calore. Tuttavia, nonostante la possibile transizione verso un clima dominato dal raffreddamento per Benevento, questa vetrata è la meno resiliente mostrando il massimo aumento di kWh nel fabbisogno energetico per il raffreddamento, se la stessa soluzione simulata nelle attuali condizioni climatiche (TMY) viene presa come riferimento ( $\Delta E_c \approx 995$  kWh).

Analizzati materiali e soluzioni innovativi per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche degli edifici si è passati allo studio della sostenibilità energetica e il management delle strutture ospedaliere.

In particolare, è stata presentata l'applicazione di una metodologia multistadio per la selezione delle misure di efficienza da applicare agli edifici ospedalieri. Tale metodologia si basa su un audit energetico dettagliato con un protocollo di misurazione completo al fine di fornire la descrizione più affidabile delle diverse zone termiche, sia in termini di parametri interni che di sistemi HVAC. Con queste informazioni è stato definito un modello numerico ed è stato anche spiegato il processo di calibrazione. La seconda fase ha comportato la selezione di misure di efficienza passive e attive la cui redditività è stata valutata utilizzando indici economici, ambientali ed economici.

L'applicazione di questa metodologia al caso studio della Clinica Ruesh, con sede a Napoli (Italia), supporterà i progettisti nell'identificazione delle informazioni necessarie e nell'implementazione di metodi completi per la definizione del bilancio energetico. In termini di progettazione della ristrutturazione, una riduzione del fabbisogno totale di energia primaria del 19% e delle emissioni inquinanti del 49% richiede: (a) l'adozione di

doppi vetri selettivi con infissi in alluminio e tapparelle motorizzate in PVC; (b) la sostituzione delle lampade esistenti con LED; c) l'installazione di una nuova pompa di calore polivalente; (d) e l'installazione di sistemi VRF nelle stanze dei pazienti. Si consiglia inoltre l'installazione di un impianto fotovoltaico integrato e colorato da 72 kWp. Senza considerare gli incentivi, secondo un calcolo attualizzato del payback, queste misure di efficienza possono essere ripagate in circa 10 anni, e il NPV<sub>40</sub> è di 1120856 euro. Gli incentivi rappresentano una prospettiva interessante in questo settore; infatti, il periodo di rimborso può essere dimezzato e il NPV<sub>40</sub> sarebbe pari a EUR 512373.00.

I risultati di questa indagine verranno utilizzati come punto di partenza per ulteriori confronti delle misurazioni post-ristrutturazione; dall'altro, lo studio vuole contribuire a colmare una lacuna presente nella letteratura scientifica riguardante l'effetto dell'integrazione di più tipologie di misure anche sulla qualità indoor, studiando la ristrutturazione di ospedali e strutture sanitarie. Inoltre, va sottolineato che l'approccio metodologico sviluppato potrebbe essere facilmente replicabile per la ristrutturazione di altre tipologie edilizie in qualsiasi località climatica.

Sulla scia della riqualificazione energetica è stato poi valutato il retrofit delle strutture ospedaliere attraverso indici di comfort termico. Lo studio ha proposto un metodo per valutare l'efficacia di misure di efficienza da applicare alle stanze di degenza partendo dall'ottimizzazione delle condizioni di comfort termoigrometrico. Il metodo introdotto si basa sia su studi numerici che sperimentali ed è applicato al caso di studio di un blocco operatorio di un ospedale italiano. Il clima di riferimento è quello temperato dell'Italia centro-meridionale. Diversi indici, derivati da importanti studi nel campo del comfort termico, sono stati valutati a partire dalla variabile misurata all'interno di due stanze e confrontati con il voto di sensazione termica fornito dai pazienti. Quindi, a partire dalla diagnosi energetica dell'edificio, è stato sviluppato un modello numerico dell'ospedale per il quale è stata effettuata una serie di retrofit.

Le fasi analitiche e sperimentali per il caso di studio suggeriscono:

- il voto medio previsto non è adeguato per descrivere le condizioni termiche all'interno dei reparti operatori;
- per la stanza singola, l'indice di comfort ottimale è il Grado-ora di temperatura operativa (DH) calcolato sommando i fattori di ponderazione e quindi moltiplicando per il tempo di esposizione secondo la norma EN 16798 poiché coincide con il giudizio del paziente;
- per la stanza multipla l'indice di comfort ottimale è il volume di disagio calcolato secondo la norma EN 7730 in quanto presenta una deviazione dal giudizio reale del 2%.

La fase numerica indica che la selezione di misure di efficienza in base alla percezione del comfort termico può portare a scelte diverse dalle più diffuse politiche nazionali di ristrutturazione. Infatti, l'isolamento della parete esterna non è redditizio perché aumenterebbe il disagio termico; anzi, l'adozione di Louvre di proiezione di 1.0 sembra la soluzione più adeguata perché la temperatura operativa media può essere ridotta di oltre 1°C e si può ottenere una distribuzione più simmetrica delle variabili interne.

L'approccio proposto sarà applicato a un ampio campione di stanze e pazienti dell'ospedale per superare la principale limitazione dello studio derivante dal fatto che sono stati presi in considerazione giudizi soggettivi

di un numero limitato di pazienti e quindi della struttura sanitaria. Tuttavia, in questa fase è stato introdotto e testato un metodo che può essere facilmente esteso allo studio dell'intero ospedale. Inoltre, i risultati possono essere di ausilio a progettisti e ricercatori quando si debba affrontare la ristrutturazione di questa tipologia di edifici in climi diversi da quello tropicale per il quale è disponibile una diffusa letteratura.

Le strutture sanitarie sono molto complesse e quindi servono molte informazioni sul sistema edificio-impianto per poter pensare di progettare veri e propri interventi di risparmio energetico. Per cui valutato il comfort si è passati poi allo studio degli impianti presenti all'interno delle strutture ospedaliere. Per prima cosa è stata condotta una analisi di letteratura. Da tale analisi è emerso che, quando si descrive un impianto esistente all'interno della struttura, non lo si fa in modo dettagliato. Per questo motivo, le informazioni relative agli impianti installati nelle strutture sanitarie sono molto scarse. Pertanto queste poche informazioni non consentono di fare diagnosi operative precise e quindi non consentono di pianificare veri e propri interventi di risparmio energetico.

Le ricerche future potrebbero aggiungere, innanzitutto, informazioni riguardanti la differenziazione degli impianti nei diversi reparti: nelle indagini sugli impianti è emerso che la struttura sanitaria è considerata nel suo complesso. Altre informazioni da aggiungere riguardano principalmente i sottosistemi di distribuzione e regolazione. Per quanto riguarda il sottosistema di distribuzione, oltre alle pompe di circolazione, si potrebbe pensare di analizzare il percorso dei fluidi; un cattivo isolamento porta ad un aumento della dispersione termica e quindi ad un aumento dei consumi energetici. Analizzare il grado di isolamento porterebbe a un risparmio energetico. Per quanto riguarda il sottosistema di regolazione, i parametri termodinamici interni potrebbero essere controllati tramite specifici controllori esistenti o da testare.

Analizzata la letteratura è stata successivamente condotta un'analisi energetico-ambientale su un reale edificio ospedaliero di 88250 m<sup>3</sup> situato nel Sud Italia. Utilizzando un modello numerico calibrato, si sono ottenuti i seguenti risultati:

- considerando le efficienze del sistema elettrico nazionale pari a 0.781 gli interventi che comportano un maggiore risparmio di energia primaria sono quelli che considerano una pompa di calore ad assorbimento alimentata da collettori solari termici (circa il 20%) e la cogenerazione (circa il 21%);
- con un rendimento inferiore del sistema centrale (0.495) aumenta la domanda di energia primaria di tutte le soluzioni e il contributo dell'impianto fotovoltaico è poco significativo. La migliore configurazione impiantistica è basata sulla cogenerazione che garantisce un risparmio di energia primaria del 22%, mentre quella peggiore si basa su una pompa di calore elettrica (EHP) che non garantisce risparmi;
- considerando l'impianto fotovoltaico o di cogenerazione, la produzione di energia elettrica è bassa rispetto al carico, quindi l'edificio dipende fortemente dalle forniture energetiche esterne, con un Imported Energy Level Index (IELI) superiore al 90% in tutte le configurazioni, con o senza recuperatore di calore nell'Unità di Trattamento Aria (UTA);

- in termini di emissioni di CO<sub>2</sub>, l'EHP può essere considerata una soluzione interessante se accoppiata ad un impianto fotovoltaico ( $\Delta\text{CO}_2 = 2.18\%$ ). In ogni caso, la cogenerazione è la misura migliore con una riduzione di CO<sub>2</sub> di circa il 21% rispetto al caso base;
- considerando l'installazione di recuperatori di calore nelle UTA, il risparmio di energia primaria della soluzione migliore (refrigeratore ad assorbimento alimentato da energia solare termica) è di circa il 43% rispetto al caso base;
- confrontando gli interventi con e senza recupero di calore, si riscontra un peggioramento del risparmio di energia primaria e delle emissioni di anidride carbonica a causa del carico elettrico aggiuntivo per la ventilazione e del maggiore impatto dell'energia elettrica sulla domanda di energia primaria nel secondo scenario del sistema elettrico nazionale efficienza.

Il metodo adottato, pur essendo vincolato alla tipologia costruttiva dell'edificio e alla localizzazione climatica analizzata, potrà essere replicato in altre aree geografiche e per diverse tipologie edilizie.

Infine è stata valutata l'importanza della progettazione degli emettitori di aria nelle strutture sanitarie e l'incidenza dell'illuminazione sul comfort.

Mantenere un basso rischio di infezione e un ambiente sano in una stanza per pazienti ventilata naturalmente dovrebbe richiedere un flusso d'aria elevato e parametri di progettazione rigorosi che evitino deviazioni nella direzione del flusso d'aria tra zone con diversi tipi di pazienti. Inoltre, il surriscaldamento è un problema significativo dovuto al cambiamento climatico. Date queste complessità e sfide, è fondamentale affrontare la progettazione della ventilazione in contesti sanitari con una prospettiva multidisciplinare e basata sulle prove. Nel caso specifico è stata considerata una stanza multipla nel reparto di chirurgia dell'ospedale "A. Cardarelli" di Campobasso (Italia) come un caso di studio reale. Sostituendo la ventilazione naturale con quella meccanica si è riscontrato che:

- il campo termico diventa più uniforme con una temperatura massima vicino al paziente di circa 26 °C;
- con il diffusore centrale il tempo di residenza dell'aria è ridotto del 70% e dell'80% con la ventola, rispetto alla ventilazione naturale;
- sia per la ventola che per il diffusore, l'area occupata dal paziente non è interessata dal getto d'aria;
- nel caso della presa d'aria posta a parete la temperatura raggiunta all'interno della stanza è di circa 25°C in prossimità del paziente e la velocità dell'aria è di circa 0.25 m/s.

Pertanto, per il caso di studio, la soluzione migliore sembra essere l'adozione di una presa d'aria a parete, ma più in generale, la progettazione della soluzione migliore dovrebbe tenere conto di fattori ambientali interni, incertezza nel comportamento del patogeno, preferenza umana e conformità ai protocolli e dati insufficienti o obsoleti.

Per quanto riguarda il sistema di illuminazione l'occupante dell'edificio giudica l'ambiente più caldo di quanto descritto se viene utilizzato un modello di comfort termico statico. Quindi, riducendo il set point di 2 °C rispetto al valore di riferimento (20 °C secondo la legge italiana) si ottiene comunque una sensazione di comfort termico. Uno studio condotto sullo stesso edificio durante l'inverno precedente ha dimostrato che utilizzando

un valore di set point di 18.7 °C si riducono i consumi di riscaldamento di circa il 21% rispetto all'utilizzo di un valore di set point pari a 20 °C. Inoltre, se l'occupante rimane a una temperatura inferiore (18 °C) e deve scegliere di attivare l'impianto di illuminazione è maggiormente influenzato dalla temperatura di colore nella valutazione istantanea del comfort termico. Infine, se sono presenti luci calde è preferibile che siano controllate dall'utente mentre le luci fredde sono preferibili che siano controllate automaticamente. Il limite del presente studio risiede nel numero non significativo di soggetti esposti al test.

## LISTA DEGLI ARTICOLI

Nella sezione seguente, l'elenco degli articoli scientifici scritti all'interno del mio gruppo di ricerca, durante i tre anni di Dottorato di Ricerca.

[I] Ascione, F., De Masi, R.F., Del Regno, N., De Rossi, F., Gigante, A., Ruggiero, S. Numerical Optimization for the design of geopolymer concrete walls with phase change materials in the Mediterranean climate. *Buildings*. 2022, 12:1353. <https://doi.org/10.3390/buildings12091353>.

[II] De Masi, R.F., Del Regno, N., Festa, V., Gigante, A., Ruggiero, S., Vanoli, G.P. Innovative wall package made of macro-encapsulated phase change material and geopolymer concrete: in-field thermal analysis for a Mediterranean climate. *Architectural Science Review*. 2024, 67:132-152. <https://doi.org/10.1080/00038628.2023.2243245>.

[III] De Masi, R.F., Del Regno, N., Gigante, A., Parrotta, M., Ruggiero, S., Vanoli, G.P. Impact of glazing system on the energy performance of a nZEB under climate change scenarios. 8<sup>th</sup> International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech). 2023. [10.23919/SpliTech58164.2023.10193504](https://doi.org/10.23919/SpliTech58164.2023.10193504).

[IV] Del Regno, N., De Masi, R.F., Festa, V., Ruggiero, S., Vanoli, G.P. The incidence of lighting system on thermal comfort sensation: experimental evaluation. *Advances in Clean Energy Systems and Technologie*. 2024, 387-394. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-49787-2\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-031-49787-2_34).

[V] Del Regno, N., Gigante, A., Ruggiero, S., Tariello, F., Vanoli, G.P. Energy efficiency in hospitals: comparative analysis of different HVAC configurations. *Advances in Building Energy Research*. 2023, 17:554-577. <https://doi.org/10.1080/17512549.2023.2266464>.

[VI] De Masi, R.F., Del Regno, N., Gigante, A., Ruggiero, S., Russo, A., Tariello, F., Vanoli, G.P. The importance of investing in the energy refurbishment of hospitals: results of a case study in a Mediterranean climate. *Sustainability*. 2023, 15(14): 11450. <https://doi.org/10.3390/su151411450>.

## ***Bibliografia***

- [1] World Urbanization Prospects: the 2018 Revision – Key Facts. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Disponibile su: [un\\_2018\\_factsheet1.pdf](#)
- [2] M. Santamouris, N. Papanikolaou, I. Livada, I. Koronakis, C. Georgakis, A. Argiriou, D. N. Assimakopoulos, On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings, *Solar Energy*, Vol. 70, No. 3, pp. 201-216, 2001.
- [3] Warren R., Arnell N., Nicholls R., Levy R., Price J., Understanding the regional impacts of climate change. Research Report Prepared for the Stern Review on the Economics of Climate Change, Working Paper 90, Tyndall Center for climate change research, 2006.
- [4] M. Santamouris, *Cooling of Buildings, Past Present and Future*, Energy and Buildings, 2016.
- [5] T. Kuramochi, N. Höhne, M. Schaeffer, J. Cantzler, B. Hare, Y. Deng, S. Sterl, M. Hagemann, M. Rocha, P. A. Yanguas-Parra, G. Mir Ecofys Netherlands B. V., Utrecht, The Netherlands, Lindee Wong, Tarik El-Laboudy, Karlien Wouters, Delphine Deryng & Komelis Blok, Ten key short-term sectoral benchmarks to limit warming to 1.5°C. *Climate Policy*, 18(3), 287-305.
- [6] J. Rogelj, D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Gizburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, M. V. Vilariño, Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15\\_Chapter2\\_Low\\_Res.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf)
- [7] A. Koezjakov, D. Urge-Vorsatz, W. Crijns-Graus, M. Van den Broek. The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings. *Energy and Buildings*, 165 (2018), 233-245.
- [8] J. Karliner, S. Slotterback, R. Boyd, B. Ahby, K. Steele. Health care's climate footprint. How the health sector contributes to the global climate crisis and opportunities for actions. Disponibile online: <https://global.noharm.org/media/4370/download?inline=1>.
- [9] BPIE (Building Performance Institute Europe), Europe's buildings under the microscope – A country-by-country review of the energy performance of buildings. Disponibile online: [https://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR\\_EU\\_B\\_under\\_microscope\\_study.pdf](https://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf)
- [10] European Commission. In focus: energy efficiency in buildings. Disponibile online: [https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17\\_en](https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_en)
- [11] LCB-HEALTHCARE. Low carbon buildings in the Healthcare Sector-State of the art report. 2011. Disponibile online: [https://europe.noharm.org/sites/default/files/documents-files/2646/Low%20Carbon%20Buildings%20in%20the%20Healthcare%20Sector\\_Report\\_FINAL.pdf](https://europe.noharm.org/sites/default/files/documents-files/2646/Low%20Carbon%20Buildings%20in%20the%20Healthcare%20Sector_Report_FINAL.pdf)
- [12] Schimschar S., Grözinger J., Korte H., Boermans T., Lilova V., Bhar R. Panorama of the European non-residential construction sector. Final report. Ecofys, 2011. Disponibile online: <https://leonardo-energy.pl/wp-content/uploads/2018/03/Europejski-sektor-budownictwa-niemieszkalnego.pdf>

- [13] Ministero della Salute, Nuovo Sistema Informativo Sanitario (NSIS). Elenco Aziende Sanitarie Locali e Strutture di ricovero. [https://www.salute.gov.it/portale/documentazione/p6\\_2\\_8\\_1\\_1.jsp?id=13](https://www.salute.gov.it/portale/documentazione/p6_2_8_1_1.jsp?id=13)
- [14] Singer B.C., Tschudi W. F. High performance healthcare buildings: a roadmap to improved energy efficiency. Lawrence Berkeley National Laboratory. 2009
- [15] Čongradac V., Prebiračević B., Jorgovanović N., Stanišić D. Assessing the energy consumption for heating and cooling in hospitals. *Energy and Buildings*, 2012, 48, 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.022>
- [16] Buonomano A., Calise F., Ferruzzi G., Palombo A. Dynamic energy performance analysis: Case study for energy efficiency retrofits of hospital buildings. *Energy*, 2014, 78, 555-572. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.042>
- [17] Squire M.M., Munsamy M., Lin G., Telukdarie A., Igusa T. Modeling hospital energy and economic costs for COVID-19 infection control interventions. *Energy & Buildings*, 2021, 242, 110948. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110948>
- [18] European Parliament, Directive 2002/91/CE of the European Parliament and of The Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Communities*, L. 1/65, 4.1.2003.
- [19] European Parliament, Directive 2010/31/UE of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union*. L. 153/13, 18.6.2010.
- [20] European Parliament, Directive (UE) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/UE on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/UE on energy efficiency. *Official Journal of the European Union*, L. 156/75, 19.6.2018.
- [21] European Parliament, Directive 2012/27/UE of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/CE and 2010/30/UE and repealing Directives 2004/8/CE and 2006/32/CE. *Official Journal of the European Union*, L. 315/1, 14.11.2012.
- [22] DECRETO-LEGGE 4 giugno 2013, n.63 – Normattiva.
- [23] LEGGE 3 agosto 2013, n.90 – Normattiva.
- [24] DM, 2015. Decreto Ministeriale Italiano DM 26/06/2015. *Bollettino Ufficiale dello Stato* n.39 del 15 luglio 2015.
- [25] Ministero delle Imprese e del Made in Italy. Decreto Interministeriale 26 giugno 2015 – Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.
- [26] Decreto del Presidente della Repubblica 14 gennaio 1997. Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento alle regioni e alle province autonome di Trento e di Bolzano, in materia di requisiti strutturali, tecnologici ed organizzativi minimi per l'esercizio delle attività sanitarie da parte delle

- strutture pubbliche e private. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.42 del 20-02-1997 – Suppl. Ordinario n.37. Disponibile online: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1997/02/20/097A1165/sg>.
- [27] Norma UNI 10339. Impianti aeraulici per la climatizzazione – classificazione, prescrizioni e requisiti prestazionali per la progettazione e la fornitura. Revisione del 17 ottobre 2008.
- [28] UNI EN 16798-1: 2019. Energy Performance of Buildings Indoor Environmental Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics. Module m1-6. Definitive Text Made Available (DAV): Sierra Vista, AZ, USA, 2019.
- [29] ASHRAE 62-1989. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
- [30] UNI CEI EN 16231:2012. Metodologia di benchmarking dell'efficienza energetica.
- [31] F. V. Silva, M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts Version 4.0.
- [32] DesignBuilder v.4.7.
- [33] U.S. Department of Energy, EnergyPlus simulation software, versione 8.1.0.
- [34] UNI/TS 11300.
- [35] UNI EN ISO 13790:2008. Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento.
- [36] G. Comini, G. Croce, E. Nobile. Fondamenti di termofluidodinamica computazionale. Servizi Grafici Editoriali. 2014.
- [37] UNI CEI EN 16247:2022. Diagnosi energetiche
- [38] Decreto Legislativo 30 maggio 2008, n.115. attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE. Disponibile online: <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2008;115>
- [39] UNI CEI EN 16247-1:2022. Diagnosi energetiche – Parte 1: Requisiti generali.
- [40] European Commission, 2020. Circular Economy Action Plan – for a Cleaner and More Competitive Europe. [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en).
- [41] Bertin, I. M. Saadé, Le roy, R., Jaeger, J. M., Feraille, A. Environmental Impacts of Design Reuse Practices in the Building Sector. Journal of Cleaner Production. 2022, 349:131228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131228>.
- [42] Nematchoua, M., Tchinda, R., Orosa, J. A. Thermal comfort and energy consumption in modern versus traditional buildings in Cameroon: A questionnaire-based statistical study. Applied Energy. 2014, 114:687-699. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.036>.
- [43] Upadhyay, A. K. Climate information for building designers: a graphical approach. Architectural Science Review. 2017, 61 (1-2): 58-67. <https://doi.org/10.1080/00038628.2017.1389690>.
- [44] Ortega Del Rosario, M. De L.A., Austin, M. C., Bruneau, D., Nadeau, J.P., Sébastien, P., Jaupard, D. Operation assessment of an air-PCM unit for summer thermal comfort in a naturally

- ventilated building. *Architectural Science Review*. 2021, 64 (1-2): 37-46. <https://doi.org/10.1080/00038628.2020.1794782>.
- [45] Kylii, A., Fokaides, P.A. Numerical simulation of phase change materials for building applications: a review. *Advances in Building Energy Research*. 2017, 11 (1): 1-25. <https://doi.org/10.1080/17512549.2015.1116465>.
- [46] Bassecq, V., Michaux, G., Inard, C., Blondeau, P. Short-term storage systems of thermal energy for buildings: a review. *Advances in Building Energy Research*. 2013, 7(1): 66-119. <https://doi.org/10.1080/17512549.2013.809271>.
- [47] Boussaba, L., Lefebvre, G., Makhoulf, S., Grados, A., Royon, L. Investigation and properties of a novel composite bio-PCM to reduce summer energy consumptions in buildings of hot and dry climates. *Solar Energy*. 2021, 214: 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.060>.
- [48] Kendrick, C., Walliman, N. Removing Unwanted Heat in Lightweight Buildings Using Phase Change Materials in Building Components: Simulation Modelling for PCM Plasterboard. *Architectural Science Review*. 2007, 50 (3): 265-273. <https://doi.org/10.3763/asre.2007.5032>.
- [49] Mukram, T. A., Daniel, J. A review of novel methods and current developments of phase change materials in the building walls for cooling applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022, 49: 101709. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101709>.
- [50] Arumugam, P., Ramalingam, V., Vellaichamy, P. Optimal positioning of phase change material and insulation through numerical investigations to reduce cooling loads in office buildings. *Journal of Energy Storage*. 2022, 52 (part B): 104946. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104946>.
- [51] Wang, X., Li, W., Luo, Z., Wang, K., Shah, S. P. A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application. *Energy and Buildings*. 2022, 260: 111923. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111923>.
- [52] Junaid, M. F., Rehman, Z., Čekon, M., Čurpek, J., Farooq, R., Cui, H., Khan, I. Inorganic phase change materials in thermal energy storage: A review on perspectives and technological advances in building applications. *Energy and Buildings*. 2021, 252: 111443. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111443>.
- [53] Dehkordi, B. S., Afrand, M. Energy-saving owing to using PCM into buildings: Considering of hot and cold climate region. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022, 52 (part B): 102112. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102112>.
- [54] Markarian, E., Fazelpour, F. Multi-objective optimization of energy performance of a buildings considering different configurations and types of PCM. *Solar Energy*. 2019, 191: 481-496. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.003>.
- [55] Sarri, A., Bechki, D., Bouguettaia, H., Al-Saadi, S. N., Boughali, S., Farid, M. M. Effect of using PCMs and shading devices on the thermal performance of buildings in different Algerian climates. A simulation-based optimization. *Solar Energy*. 2021, 217: 375-389. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.024>.

- [56] Mechouet, A., Oualim, E. M., Mouhib, T. Effect of mechanical ventilation on the improvement of the thermal performance of PCM-incorporated double external walls: A numerical investigation under different climatic conditions in Morocco. *Journal of Energy Storage*. 2021, 38: 102495. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102495>.
- [57] Sun, X., Zhang, Y., Xie, K., Medina, M. A. A parametric study on the thermal response of a building wall with a phase change material (PCM) layer for passive space cooling. *Journal of Energy Storage*. 2022, 47: 103548. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103548>.
- [58] Adilkhanova, I., Memon, S. A., Kim, J., Sheriyev, A. A novel approach to investigate the thermal comfort of the lightweight relocatable building integrated with PCM in different climates of Kazakhstan during summertime. *Energy*, 2021, 217: 119390. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119390>.
- [59] Hamidi, Y., Aketouane, Z., Malha, M., Bruneau, D., Bah, A., Goiffon, R. Integrating PCM into hollow brick walls: Toward energy conservation in Mediterranean regions. *Energy and Buildings*. 2021, 248: 111214. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111214>.
- [60] M'hamdi Y., Baba, K., Tajayouti, M., Nounah, A. Energy, environmental, and economic analysis of different buildings envelope integrated with phase change materials in different climates. *Solar Energy*. 2022, 243: 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.07.031>.
- [61] Ismail, R. M., Megahed, N. A., Eltarability, S. Numerical investigation of the indoor thermal behaviour based on PCMs in a hot climate. *Architectural Science Review*. 2021, 65(3): 196-276. <https://doi.org/10.1080/00038628.2022.2058459>.
- [62] Wijesuriya, S., Tabares-Velasco, P. C. Experimental apparatus and methodology to test and quantify thermal performance of micro and macro-encapsulated phase change materials in building envelope applications. *Journal of Energy Storage*. 2020, 32: 101770. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101770>.
- [63] Wijesuriya, S., Tabares-Velasco, P. C. Empirical validation and comparison of methodologies to simulate micro and macro-encapsulated PCMs in the building envelope. *Applied Thermal Engineering*. 2021, 188: 116646. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116646>.
- [64] Wu, D., Rahim, M., Ganaoui, M., Djedjig, R., Bennacer, R., Liu, B. Experimental investigation on the hygrothermal behavior of a new multilayer building envelope integrating PCM with bio-based material. *Building and Environment*. 2021, 201: 107995. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107995>.
- [65] Al-Yasiri, Q., Szabó, M. Experimental evaluation of the optimal position of a microencapsulated phase change material incorporated composite roof under hot climate conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021 (a), 45: 101121. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101121>.

- [66] Al-Yasiri, Q., Szabó, M. Effect of encapsulation area on the thermal performance of PCM incorporated concrete bricks: A case study under Iraq summer constructions. *Case Studies in Construction Materials*. 2021 (b), 15: e00686. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00686>.
- [67] Abbas, H. M., Jalil, J. M., Ahmed, S. T. Experimental and numerical investigation of PCM capsules as insulation materials inserted into a hollow brick wall. *Energy and Buildings*. 2021, 246: 111127. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111127>.
- [68] Arumugam, C., Shaik, S. Air-conditioning cost saving and CO<sub>2</sub> emission reduction prospective of buildings designed with PCM integrated blocks and roofs. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021, 48: 101657. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101657>.
- [69] Hassan, A., Rashid, Y., Mourad, A. I., Ismail, N., Laghari, M. L. Thermal and structural characterization of geopolymer-coated polyurethane foam-phase change material capsules/geopolymer concrete composites. *Materials*. 2019, 12(5): 796. <https://doi.org/10.3390/ma12050796>.
- [70] Ramakrishnan, S., Pasupathy, K., Sanjayan, J. Synthesis and properties of thermally enhanced aerated geopolymer concrete using form-stable phase change composite. *Journal of Building Engineering*. 2021, 40: 102756. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102756>.
- [71] Cao, V. D., Bui, T. Q., Kjøniksen, A. Thermal analysis of multi-layers walls containing geopolymer concrete and phase change materials for building applications. *Energy*. 2019, 186: 115792. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.122>.
- [72] Sukontasukkul, P., Sangpet, T., Newlands, M., Tangchirapat, W., Limkatanyu, S., Chindaprasirt, P. Thermal behaviour of concrete sandwich panels incorporating phase change material. *Advances in Building Energy Research*. 2022 (1), 16: 64-88. <https://doi.org/10.1080/17512549.2020.1788990>.
- [73] Disponibile online: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en).
- [74] Soliman, A., Hafeez, G., Erkmén, E., Ganesan, R., Ouf, M., Hammad, A., Ericker, U., Moselhi, O. Innovative construction material technologies for sustainable and resilient civil infrastructure. *Materials Today: Proceedings*. 2022, 60:365-372. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.248>.
- [75] Xie, J., Zhao, J., Wang, J., Fang, C., Yuan, B., Wu, Y. Impact behaviour of fly ash and slag-based geopolymeric concrete: the effects of recycled aggregate content, water-binder ratio and curing age. *Construction and Building Materials*. 2022, 331: 127359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127359>.
- [76] Verma, M., Dev, N., Rahman, I., Nigam, M., Ahmed, M., Mallick, J. Geopolymer concrete: a material for sustainable development in Indian construction industries. *Crystals*. 2022, 12(4): 514. <https://doi.org/10.3390/cryst12040514>.

- [77] Mohammed, B. S., Liew, M. S., Alaloul, W. S., Al-Fakih, A., Ibrahim, W., Adamu, M. Development of rubberized geopolymer interlocking bricks. *Case Studies in Construction Materials*. 2018, 8: 401-408. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.007>.
- [78] Gerges, N.N., Issa, C. A., Fawaz, S. A. Rubber concrete: mechanical and dynamical properties. *Case Studies in Construction Materials*. 2018, 9: e00184. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00184>.
- [79] Cui, Y., Hao, H., Li, J., Chen, W., Zhang, X. Structural behavior and vibration characteristics of geopolymer composite lightweight sandwich panels for prefabricated buildings. *Journal of Building Engineering*. 2022, 57: 104872. [10.1016/j.jobbe.2022.104872](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104872).
- [80] Longo, F., Lassandro, P., Moshiri, A., Phatak, T., Aiello, M. A., Krakowiak, K. J. Lightweight geopolymer-based mortars for the structural and energy retrofit of buildings. *Energy and Buildings*. 2020, 225: 110352. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110352>.
- [81] Colangelo, F., De Luca, G., Ferone, C., Mauro, A. Experimental and numerical analysis of thermal and hygrometric characteristics of building structures employing recycled plastic aggregates and geopolymer concrete. *Energies*. 2013, 6(11): 6077-6101. <https://doi.org/10.3390/en6116077>.
- [82] Wu, C., Huang, C., Li, Y., Lee, W., Cheng, T. Utilization of basic oxygen furnace slag in geopolymeric coating for passive radiative cooling application. *Sustainability*. 2020, 12(10): 3967. <https://doi.org/10.3390/su12103967>.
- [83] Su, Z., Hou, W., Sun, Z., Lv, W. Study of in situ foamed fly ash geopolymer. *Materials*. 2020, 13(18): 4059. <https://doi.org/10.3390/ma13184059>.
- [84] Parcesepe, E., De Mai, R.F., Lima, C., Mauro, G. M., Maddaloni, G., Pecce, M.R. Experimental evaluation of the mechanical strengths and the thermal conductivity of GGBFS and silica fume based alkali-activated concrete. *Materials*. 2021, 14(24):7717. <https://doi.org/10.3390/ma14247717>.
- [85] Dhasindrakrishna, K., Pasupathy, K., Ramakrishnan, S., Sanjayan, J. Progress, current thinking and challenges in geopolymer foam concrete technology. *Cement and Concrete Composites*. 2021, 116: 103886. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103886>.
- [86] Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., Wang, H. Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2015, 62: 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.013>.
- [87] Wang, Y., Zheng, T., Zheng, X.F., Liu, Y., Darkwa, J., Zhou, G. Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*. 2020. 251:118960. [10.1016/j.conbuildmat.2020.118960](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118960).

- [88] Henon, J., Alzina, A., Absi, J., Smith, D.S., Rossignol, S. Analytical estimation of skeleton thermal conductivity of a geopolymer foam from thermal conductivity measurements. *The European Physical Journal Special Topics*. 2015, 224: 1715-1723. [10.1140/epjst/e2015-02493-8](https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02493-8).
- [89] Łach, M., Pławecka, K., Bak, A., Adamczyk, M., Bazan, P., Kozub, B., Komierjenko, K., Lin, W. Review of solutions for the use of phase change materials in geopolymers. *Materials*. 2021, 14(20): 6044. <https://doi.org/10.3390/ma14206044>.
- [90] Asadi, I., Baghban, M.M, Hashemi, M., Izadyr, N., Sajadi, B. Phase change materials incorporated into geopolymer concrete for enhancing energy efficiency and sustainability of buildings: a review. *Case Studies in Construction Materials*. 2022, 17: e01162. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01162>.
- [91] Hassan, A., Mourad, A.I., Rashid, Y., Ismail, N., Laghari, M.S., Thermal and structural performance of geopolymer concrete containing phase change material encapsulated in expanded clay. *Energy and Buildings*. 2019, 191: 72-81. [10.1016/j.enbuild.2019.03.005](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.005).
- [92] Pilehvar, S., Sanfelix, S.G., Szczotok, A.M., Rodríguez, J.F., Valentini, L., Lanzón, M. Pamies, R., Kjøniksen, A. Effect of temperature on geopolymer and Portland cement composites modified with micro-encapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials*. 2020, 252:119055. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119055>.
- [93] Cao, V.D., Pilehvar, S., Salas-Bringas, C., Szczotok, A.M., Rodriguez, J.F., Carmona, M., Al-Manasir, N., Kjøniksen, A. Microencapsulated phase change materials for enhancing the thermal performance of Portland cement concrete and geopolymer concrete for passive building applications. *Energy Conversion and Management*. 2017, 133: 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.061>.
- [94] Cao, V.D., Pilehvar, S., Salas-Bringas, C., Szczotok A.M., Valentini, L., Carmona, M., Rodriguez, J.F., Kjøniksen, A. Influence of microcapsule size and shell polarity on thermal and mechanical properties of thermoregulating geopolymer concrete for passive building applications. *Energy Conversion and Management*. 2018, 164: 198-209. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.076>.
- [95] Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE: Peachtree Corners, GA, USA, 2004.
- [96] De Masi, R.F., De Rossi, F., Ruggiero, S., Vanoli, G.P. Numerical optimization for the design of living walls in the Mediterranean climate. *Energy Conversion and Management*. 2019, 195: 573-586. [10.1016/j.enconman.2019.05.043](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.043).
- [97] Carlucci, S., Cattarin, G., Causone, F., Pagliano, L., Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). *Energy and Buildings*. 2015, 104: 378-394. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.064>.

- [98] Nguyen, A., Reiter, S., Rigo, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*. 2014, 113: 1043-1058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>.
- [99] Ascione, F., De Masi, R.F., De Rossi, F., Ruggiero, S., Vanoli, G.P. MATRIX, a multi activity test-room for evaluating the energy performances of “building/HVAC” systems in Mediterranean climate: experimental set-up and CFD/BPS numerical modelling. *Energy and building*. 2016, 126: 424-446. [10.1016/j.enbuild.2016.05.044](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.044).
- [100] ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Guideline 14: Measurement of Energy and Demand and Savings; 1791 Tullie Circle: NE – Atlanta, GA, 2002. ISSN 1049-894X,
- [101] UNI EN ISO 7730: 2006. Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local thermal Comfort Criteria. Italian Organization for Standardization (UNI). Milano, Italy, 2006.
- [102] UNI TS 11300-1:2014. Energy Performance of Buildings, Part 1. Evaluation of Energy Need for Space Heating and Cooling. Italian Organization for Standardization (UNI). Milano, Italy, 2014.
- [103] Rubel, F., Kottek, M. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*. 2010, 19 (2): 135-141. [10.1127/0941-2948/2010/0430](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0430).
- [104] Report D6.1
- [105] UNI EN ISO 6946: 2008. Building Components and Building Elements – Thermal Resistance and Thermal Transmittance – Calculation Method. Italian Organization for Standardization (UNI). Milano, Italy, 2008.
- [106] UNI 10351: 2015. Building Materials and Products – Hygrothermal Properties – Procedure for Determining the Design Values. Italian Organization for Standardization (UNI). Milano, Italy, 2015.
- [107] UNI EN ISO 10456:2008. Building Materials and Products – Hygrothermal Properties – Tabulated Design Values and Procedures for Determining Declared and Design Thermal Values. Italian Organization for Standardization (UNI). Milano, Italy, 2008.
- [108] Decreto Ministeriale 26.06.2015, annex B. Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici. Disponibile online: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/07/15/15A05198/sg>.
- [109] Manso, M., Castro-Gomes, J.P. Thermal analysis of a new modular system for green walls. *Journal of Building Engineering*. 2016, 7: 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.03.006>.
- [110] De Jesus, M.P., Lourenço, J.M., Arce, R.M., Macia, M. Green façades and in situ measurements of outdoor building thermal behaviour. *Building and Environment*. 2017, 119: 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.041>.
- [111] Microtek Laboratories. Disponibile online: <https://www.microteklabs.com/>.

- [112] Micronal-app.
- [113] Ozdenefe, M., Dewsbury, J. Thermal performance of a typical residential Cyprus building with phase change materials. *Building Services Engineering Research & Technology*. 2015, 37(1): 85-102. <https://doi.org/10.1177/0143624415603004>.
- [114] Rubitherm. Disponibile online: <https://www.rubitherm.eu/en/productCategories.html>.
- [115] Karthikeyan, N., Sathishkumar, A., Raj W, D.J. Effects on setting, strength and water resistance of sorel cement on mixing fly ash as an additive. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2014, 3: 252-256. [https://www.ijmerr.com/v3n2/ijmerr\\_v3n2\\_31.pdf](https://www.ijmerr.com/v3n2/ijmerr_v3n2_31.pdf).
- [116] Tabares-Velasco, P.C., Christensen, C., Bianchi, M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. *Building and Environment*. 2012, 54: 186-196. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.019>.
- [117] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEE. Transactions on Evolutionary Computation*. 2002, 6: 182-197. [https://sci2s.ugr.es/sites/default/files/files/Teaching/OtherPostGraduateCourses/Metaheuristics/Deb\\_NSGAII.pdf](https://sci2s.ugr.es/sites/default/files/files/Teaching/OtherPostGraduateCourses/Metaheuristics/Deb_NSGAII.pdf).
- [118] UNI 10349-1:2016. Heating and cooling of buildings – Climatic Data – Part 1: Monthly means for evaluation of energy need for space heating and cooling and methods for splitting global solar irradiance into the direct and diffuse parts and for calculate the solar irradiance on tilted planes.
- [119] Decreto del Presidente della Repubblica. 26 agosto 1993, n.412. Regolamento recante norme per la progettazione, l’installazione, l’esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell’art.4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n.10. [https://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1993\\_0412.htm](https://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1993_0412.htm).
- [120] De Masi, R.F., Gigante, A., Ruggiero, S., Vanoli, G.P. Impact of weather data and climate change projections in the refurbishment design of residential buildings in cooling dominated climate. *Applied Energy*. 2021, 303: 117584. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117584>.
- [121] Kaşka, Ö., Yumrutaş, R. Experimental investigation for total equivalent temperature difference (TETD) values of building walls and flat roofs. *Energy Conversion and Management*. 2009, 50(11): 2818-2825. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.027>.
- [122] Ascione, F., De Masi, R.F., Del Regno, N., De Rossi, F., Gigante, A., Ruggiero, S. Numerical optimization for the design of geopolymers concrete walls with phase change materials in Mediterranean climate. *Buildings*. 2022, 12(9): 1353. <https://doi.org/10.3390/buildings12091353>.
- [123] The Green Instruct Project, 2022. <https://www.greeninstruct.eu/>.
- [124] Tavares, P., Bernardo, H., Gaspar, A., Martins, A. Control criteria of electrochromic glasses for energy savings in Mediterranean buildings refurbishment. *Solar Energy*. 2016, 134: 236-250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.022>.

- [125] Casini, M. Active dynamic windows for buildings: a review. *Renewable Energy*. 2018, 119: 923-934. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.049>.
- [126] Ghosh, A., Norton, B. Advances in switchable and highly insulating autonomous (self-powered) glazing systems for adaptive low energy buildings. *Renewable Energy*. 2018, 126: 1003-1031. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.038>.
- [127] Somasundaram, S., Thangavelu, S.R., Chong, A. Improving building efficiency using low-e coating based retrofit double glazing with solar films. *Applied Thermal Engineering*. 2020, 171: 115064. [10.1016/j.applthermaleng.2020.115064](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115064).
- [128] D'Agostino, D., Parker, D., Epifani, I., Crawley, D., Lawrie, L. How will future climate impact the design and performance of nearly zero energy buildings (NZEBs)? *Energy*. 2022, 240: 122479. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122479>.
- [129] Ascione, F., Borrelli, M., De Masi, R.F., Rossi, F., Vanoli, G.P. A framework for NZEB design in Mediterranean climate: Design, building and set-up monitoring of a lab-small villa. *Solar Energy*. 2019, 184: 11-29. [10.1016/j.solener.2019.03.083](https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.083).
- [130] Hall, I.J., Prairie, R.R., Anderson, H.E., Boes, E.C. Generation of a typical meteorological year. *Proceedings of the 1978 annual meeting of the American Section of the International Solar Energy Society*. 1978, 669-671.
- [131] Climate Change World Weather File Generator for Worldwide Weather DATA – CCWorldWeatherGen: Sustainable Energy Research Group. Disponibile online: <https://energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen/>.
- [132] Decreto ministeriale del 6 ottobre 2022, n.383. Piano nazionale contenimento dei consumi di gas nazionale – Misura di contenimento del riscaldamento. Disponibile online: <https://www.mase.gov.it/content/decreto-ministeriale-del-6-ottobre-2022-n-383-piano-nazionale-contenimento-dei-consumi-di>.
- [133] Hoyt, T., Arens, E., Zhang, H. Extending air temperature setpoints: simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. *Building and Environment*. 2015, 88(1): 89-96. [10.1016/j.buildenv.2014.09.010](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.010).
- [134] Buratti, C., Belloni, E., Merli, F., Ricciardi, P. A new index combining thermal, acoustic, and visual comfort of moderate environments in temperate climates. *Building and Environment*. 2018, 139: 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.038>.
- [135] Frontczak, M., Wargocki, P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*. 2011, 46: 922-937. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>.
- [136] Frontczak, M., Andersen, R.V., Wargocki, P. Questionnaire survey on factors influencing comfort with indoor environmental quality in Danish housing. *Building and Environment*. 2012, 50: 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.012>.

- [137] Ricciardi, P. Buratti, C. Environmental quality of university classrooms: subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions. *Building and Environment*. 2018, 127: 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.030>.
- [138] Krüger, E.L., Tamura, C., Trento, T.W. Identifying relationships between daylight variables and human preferences in a climate chamber. *Science of The Total Environment*. 2018, 642: 1292-1302. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.164>.
- [139] Xue, P., Mak, C.M., Cheung, H.D. The effects of daylighting and human behavior on luminous comfort in residential buildings: a questionnaire survey. *Building and Environment*. 2014, 81: 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.011>.
- [140] Castaldo, V.L., Pigliautile, I., Rosso, F., Pisello, A.L., Cotana, F. Investigation of the impact of subjective and physical parameters on the indoor comfort of occupants: a case study in central Italy. *Energy Procedia*. 2017, 126: 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.132>.
- [141] Andargie, M.S., Azar, E. An applied framework to evaluate the impact of indoor office environmental factors on occupants' comfort and working conditions. *Sustainable Cities and Society*. 2019, 46: 101447. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101447>.
- [142] Laurentin, C., Bermitto, V., Fontoynt, M. Effect of thermal conditions and light source type on visual comfort appraisal. *Lighting Research & Technology*. 2016, 32, Issue 4. <https://doi.org/10.1177/09603271000320040>.
- [143] Fakhari, M., Fayaz, R., Asadi, S. Lighting preferences in office spaces concerning the indoor thermal environment. *Frontiers of Architectural Research*. 2021, 10 (3): 639-651. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.03.003>.
- [144] Wuni, I.Y., Shen, G.Q., Robert, O. Scientometric review of global research trends on green buildings in construction journals from 1992 to 2018. *Energy and Buildings*. 2019, 190: 69-85. [10.1016/j.enbuild.2019.02.010](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.010).
- [145] Bujak, J.W. Production of waste energy and heat in hospital facilities. *Energy*. 2015, 91:350-362. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.053>.
- [146] Shi, Y., Yan, Z., Li, C., Li, C. Energy consumption and building layouts of public hospital buildings: A survey of 30 buildings in the cold region of China. *Sustainable Cities and Society*. 2021, 74: 103247. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103247>.
- [147] de Oliveira, K.B., dos Santos, E.F., Neto, A.F., de Mello Santos, V.H., de Oliveira, O.J. Guidelines for efficient and sustainable energy management in hospital buildings. *Journal of Cleaner Production*. 2021, 329: 129644. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129644>.
- [148] Wang, T., Li, X., Liao, P., Fang, D. Building energy efficiency for public hospitals and healthcare facilities in China: Barriers and drivers. *Energy*. 2016, 103: 588-597. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.039>.

- [149] Chen, X., Chen, Y., Zhang, M., Jiang, S., Gou, H., Pang, Z., Shen, B. Hospital-oriented quad-generation (HOQG) – A combined cooling, heating, power and gas (CCHPG) system. *Applied Energy*. 2021, 300: 117382. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117382>.
- [150] Morgenstern, P., Li, M., Raslan, R., Ruysssevelt, P., Wright, A. Benchmarking acute hospitals: Composite electricity targets based on department consumption intensities? *Energy and Buildings*. 2016, 118: 277-290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.052>.
- [151] Szklo, A.S., Soares, J.B., Tolmasquim, M.T. Energy consumption indicators and CHP technical potential in the Brazilian hospital sector. *Energy Conversion and Management*. 2004, 43: 2075-2091. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.10.019>.
- [152] García-Sanz-Calcedo, J., Gómez-Chaparro, M., Sanchez-Barroso, G. Electrical and thermal energy in private hospitals: Consumption indicators focused on healthcare activity. *Sustainable Cities and Society*. 2019, 47: 101482. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101482>.
- [153] González A., García-Sanz-Calcedo, J., Salgado, D.R. A quantitative analysis of final energy consumption in hospitals in Spain. *Sustainable Cities and Society*. 2018, 36: 169-175. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.029>.
- [154] Hwang, D.K., Cho, J., Moon, J. Feasibility study on energy audit and data driven analysis procedure for building energy efficiency: bench-marking in Korean hospital buildings. *Energies*. 2019, 12(15): 3006. <https://doi.org/10.3390/en12153006>.
- [155] Zini, M., Carcasci, C. Machine learning-based monitoring method for the electricity consumption of a healthcare facility in Italy. *Energy*. 2023, 262 (part B): 125576. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125576>.
- [156] Zhuang, D., Gan, V.J.L., Tekler, Z.D., Chong, A., Tian, S., Shi, X. Data-driven predictive control for smart HVAC system in IoT-integrated buildings with time-series forecasting and reinforcement learning. *Applied Energy*. 2023, 338: 120936. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120936>.
- [157] Teke, A., Timur, O. Assessing the energy efficiency improvement potentials of HVAC systems considering economic and environmental aspects at the hospitals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, 33: 224-235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.002>.
- [158] Fifield, L.J., Lomas, K.J., Girigharan, R., Allison, D. Hospital wards and modular construction: summertime overheating and energy efficiency. *Building and Environment*. 2018, 141: 28-44. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.041>.
- [159] Duad, A.K.M., Ahmad, E.Z., Razak, T.R., Jarimi, H. Expertise-based systematic guidelines for chiller retrofitting in healthcare facilities. *Journal of Building Engineering*. 2023, 74: 106708. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106708>.
- [160] Prada, M., Prada, I.F., Cristea, M., Popescu, D.E., Bungău, C., Aleya, L., Bungău, C.C. New solutions to reduce greenhouse gas emissions through energy efficiency of buildings of special

- importance – Hospitals. *Science of the Total Environment*. 2020, 718: 137446. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137446>.
- [161] Cesari, S., Valdiserri, P., Coccagna, M., Mazzacane, S. Energy savings in hospital patient rooms: the role of windows size and glazing properties. *Energy Procedia*. 2018, 148: 1151-1158. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.027>.
- [162] Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R.F., Vanoli, G.P. Rehabilitation of the building envelope of hospitals: achievable energy savings and microclimatic control on varying the HVAC systems in Mediterranean climates. *Energy and Buildings*. 2013, 60: 125-138. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.021>.
- [163] Billanes, J.D., Ma, Z., Jørgensen, B.N. The Bright Green Hospitals. Case studies of hospitals' energy efficiency and flexibility in Philippines. 8<sup>th</sup> International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Colombo, Sri Lanka, 21-22 December 2018. [10.1109/ICPESYS.2018.8626916](https://doi.org/10.1109/ICPESYS.2018.8626916).
- [164] Peirow, S., Astarai, F.R., Asl, A.S. Techno-economic and environmental assessment of a hybrid renewable energy system for a hospital using multi-criteria decision-making method. *Energies*. 2023, 16(4): 1916. <https://doi.org/10.3390/en16041916>.
- [165] Kassem, Y., Gökçekuş, H., Güvensoy, A. Techno-economic feasibility of grid-connected solar PV system at near East University Hospital, Northern Cyprus. *Energies*, 2021, 14(22): 7627. <https://doi.org/10.3390/en14227627>.
- [166] Kahwash, F., Barakat, B. Taha, A., Abbasi, Q.H., Imran, M.A. Optimising electrical power supply sustainability using a grid-connected hybrid renewable energy system- An NHS hospital case study. *Energies*. 2021, 14(21): 7084. <https://doi.org/10.3390/en14217084>.
- [167] Buonomano, A., Calise, F., Ferruzzi, G., Vanoli, L. A novel renewable polygeneration system for hospital buildings: Design, simulation and thermo-economic optimization. *Applied Thermal Engineering*. 2014, 67(1-2): 43-60. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.008>.
- [168] Kantola, M., Saari, A. Renewable vs. traditional energy management solutions – A Finnish hospital facility case. *Renewable Energy*. 2013, 57: 539-545. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.023>.
- [169] Moon, H., Jeon, J., Nam, Y. Development of optimal design method for ground-source heat-pump system using particle swarm optimization. *Energies*. 2020, 13(18): 4850. <https://doi.org/10.3390/en13184850>.
- [170] Izadi, A., Shahafve, M., Ahmadi, P., Hanafizadeh, P. Design, and optimization of COVID-19 hospital wards to produce Oxygen and electricity through solar PV panels with hydrogen storage systems by neural network-genetic algorithm. *Energy*. 2023, 263(part A): 125578. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125578>.
- [171] ISO 9869-1:2014; Thermal Insulation-Building Elements-In Situ Measurements of Thermal Resistance and Thermal Transmittance-Part 1: Heat Flow Meter Method. ISO: GENEVE, Switzerland, 2014.

- [172] EN 13187:1997; Thermal Performance of Buildings-Qualitative Detection of Thermal Irregularities in Building Envelopes-Infrared Method. Comite Europeen de Normalisation: Avenue Marnix, Belgium, 1998.
- [173] UNI EN 15459-1:2018. Prestazione Energetica degli Edifici-Sistemi di Riscaldamento e Sistemi di Raffrescamento Idronici Negli Edifici-Parte 1: Procedura di Valutazione Economica per i Sistemi Energetici negli Edifici. Modulo m1-14. UNE: Madrid, Spain, 2018.
- [174] UNI 10349-2:2016. Riscaldamento e Raffrescamento degli Edifici-Dati Climatici-Parte 2: Dati di Progetto. UNI: Milano, Italia, 2016.
- [175] CEI EN IEC 61439-1. Apparecchiature Assiemate di Protezione e di Manovra per Bassa Tensione (Quadri BT). Parte 1: Regole Generali. CEI-Comitato Elettrotecnico Italiano; Milano, Italia, 2022.
- [176] Ruggiero, S., Tariello, F., Vanoli, G.P. Evaluation of comfort considering the peculiarities of hospitalization: bedding, clothing and reduced activity of patients. *Buildings*. 2022, 12(3): 343. <https://doi.org/10.3390/buildings12030343>.
- [177] TERMUS BIM. Disponibile online: <https://www.acca.it/software-certificazione-energetica>.
- [178] UNI EN ISO 14683; 2018. Ponti Termici in Edilizia-Coefficiente di Trasmissione Lineica-Metodi Semplificativi e Valori di Riferimento. UNI: Milano, Italia, 2018.
- [179] Grassi, W., Testi, D., Menchetti, E., Della Vista, D., Bandini M., Niccoli, L., Grassini, G.L. Fasano, G. Valutazione dei Consumi nell'Edilizia Esistente e Benchmark Mediante Codici Semplificativi: Analisi di Edifici Ospedalieri; Report RSE/2009/117, ENEA. 2009.
- [180] Delibera di Giunta Regionale n. 451 e n. 664/2002. Programma Regionale Campania FESR 2021-2027. Priorità: 2. Energia, Ambiente e Sostenibilità. Disponibili online: <https://www.regione.campania.it/assets/documents/avviso-efficiamento-energetico.pdf>.
- [181] Del Ferraro, S., Iavicoli, S. Russo, S., Molinaro, V. A field study on thermal comfort in an Italian hospital considering differences in gender and age. *Applied Ergonomics*. 2015, 50: 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.03.014>.
- [182] Zhang, H.; Xie, X.; Hong, S.; Lv, H. Impact of metabolism and the clothing thermal resistance on inpatient comfort. *Energy and built Environment*. 2021, 2:223-232. [10.1016/j.enbenv.2020.07.002](https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.07.002).
- [183] Obeidat, B., & Zahrawi, R. (2024). Exploring the impact of built environment design on oncology inpatient rooms: a single-based study of King Abdullah University Hospital. *Architectural Engineering and Design Management*, 20(4), 972–995. <https://doi.org/10.1080/17452007.2024.2338283>.
- [184] Yuan, F.; Yao, R.; Sadrizadeh, S.; Li, B.; Cao, G.; Zhang, S.; Zhou, S.; Liu, H.; Bogdan, A.; Croitoru C.; Melikoc, A.; Short, C. A.; Professor, Li B. Thermal comfort in hospital buildings- A literature review. *Journal of Building Engineering*. 2022, 45:103463. [10.1016/j.jobee.2021.103463](https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103463).

- [185] Caixeta, M. C. B. F., & Fabricio, M. M. A conceptual model for the design process of interventions in healthcare buildings: a method to improve design. *Architectural Engineering and Design Management*. 2012, 9(2): 95–109. <https://doi.org/10.1080/17452007.2012.738040>.
- [186] Wanigarathna, N., Sherratt, F., Price, A., & Austin, S. Healthcare designers' use of prescriptive and performance-based approaches. *Architectural Engineering and Design Management*. 2016, 12(6): 427–441. <https://doi.org/10.1080/17452007.2016.1212692>
- [187] Raja, S., Rabinowitz, E. P., Sayer, M. A., & da Fonseca, M. Patient comfort discussing sensitive behavioral health topics. *Journal of Communication in Healthcare*. 2022, 16(3): 239–244. <https://doi.org/10.1080/17538068.2022.2152228>.
- [188] Khodakarami, J.; Nasrollahi, N. Thermal comfort in hospitals – A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, 16: 4071–4077. [10.1016/j.rser.2012.03.054](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.054).
- [189] P. O. Fanger, Thermal Comfort. *Analysis and Applications in Environmental Engineering*, 244, 1970.
- [190] E. E. Broday, J.A. Moreto, A.A. de Paula Xavier, R. de Oliveira, The approximation between thermal sensation votes (TSV) and predicted mean vote (PMV): A comparative analysis. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2019, 69: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.09.007>.
- [191] Rahman, N. M. A.; Haw, Lim, Chin; Fazlizan, A.; Hussin, A.; Imran, M. S. Thermal comfort assessment of naturally ventilated public hospital wards in the tropics. *Building and Environment*. 2022, 207:108480. [10.1016/j.buildenv.2021.108480](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108480).
- [192] Peng, T.; Zhang, Y.; Jiang, X.; Yang, Y.; Fang, Z. Investigation of pregnant women thermal comfort in the waiting area of the hospital in South China, Guangzhou. *Journal of Building Engineering*. 2021, 44:103254. [10.1016/j.jobbe.2021.103254](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103254).
- [193] Rus, T., Nemeti, G., Domnita, F. V., Goidescu, I. G., & Muresan, D. Indoor thermal environment evaluation of postpartum patients in a tertiary level maternity in Romania during summer. *Science and Technology for the Built Environment*, 2021, 27(7): 948–959. <https://doi.org/10.1080/23744731.2021.1906084>.
- [194] Khalid, W.; Zaki, S. A.; Rijal, Hom B.; Yakub, F. Investigation of comfort temperature and thermal adaption for patients and visitors in Malaysian hospitals. *Energy & Buildings*. 2019, 183:484–499. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.019>.
- [195] Tang, H.; Ding, J.; Lin, Z. On-site measurement of indoor environment quality in a Chinese healthcare facility with a semi-closed hospital street. *Building and Environment*. 2020, 173: 106637. [10.1016/j.buildenv.2019.106637](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106637).
- [196] Willems, S., Saelens, D., & Heylighen, A. Discrepancies between predicted and actual indoor environmental (dis)comfort: the role of hospitalized patients' adaptation strategies. *Building Research & Information*, 2022, 50(7): 792–809. <https://doi.org/10.1080/09613218.2022.2038060>.

- [197] Derks, M. T. H.; Mishra, A. K.; Loomans, M. G. L. C.; Kort, H. S. M. Understanding thermal comfort perception of nurses in a hospital ward work environment. *Building and Environment*. 2018, 140: 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.039>.
- [198] Pourshaghaghay, A.; Omidvari, M. Examination of thermal comfort in a hospital using PMV-PPD model. *Applied Ergonomics*. 2012, 43:1089-1095. [10.1016/j.apergo.2012.03.010](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2012.03.010).
- [199] Akova, İ., Kiliç, E., Sümer, H., & Keklikçi, T. Prevalence of sick building syndrome in hospital staff and its relationship with indoor environmental quality. *International Journal of Environmental Health Research*. 2020, 32(6):1204–1219. <https://doi.org/10.1080/09603123.2020.1862067>.
- [200] Hashiguchi, N.; Hirakawa, M.; Tochihara, Y.; Kaji, Y.; Karaki, C. Thermal environment and subjective responses of patients and staff in a hospital during winter. *Journal of physiological anthropology and applied human science*. 2004. [10.2114/jpa.24.111](https://doi.org/10.2114/jpa.24.111).
- [201] Skoog, J.; Fransson, N.; Jagemar, L. Thermal environment in Swedish hospitals. Summer and winter measurements. *Energy and Buildings*. 2005, 37:872-877. [10.1016/j.enbuild.2004.11.003](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.11.003).
- [202] Alotaibi, B. S.; Lo, S.; Southwood, E.; Coley, D. Evaluating the suitability of standard thermal comfort approaches for hospital patients in air-conditioned environments in hot climate. *Building and Environment*. 2020, 169: 106561. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106561>.
- [203] Rus, T.; Cruciat, G.; Nemeti, G.; Mare, R.; Muresan, D. Thermal comfort in maternity wards: Summer vs. winter conditions. *Journal of Building Engineering*. 2022, 51: 104356. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104356>.
- [204] Nelson J O Rodrigues, Ricardo F Oliveira, Senhorinha F C F Teixeira, Alberto Sérgio Miguel, José Carlos Teixeira, João S Baptista, Thermal comfort assessment of a surgical room through computational fluid dynamics using local PMV index. 2015;51(3):445-56. [10.3233/WOR-141882](https://doi.org/10.3233/WOR-141882).
- [205] Pereira, P. F. da C.; Broday, E. E; Xavier, A. A. de Paula. Thermal comfort applied in hospital environments: a literature review. *Applied Science*. 2020, 10:7030. <https://doi.org/10.3390/app10207030>.
- [206] Willems, S., Saelens, D., & Heylighen, A. Patient well-being, adaptation of and to indoor conditions, and hospital room design: two mixed methods case studies. *Building Research & Information*, 2021, 50(1–2): 105–133. <https://doi.org/10.1080/09613218.2021.2004386>.
- [207] Eisazadeh, N., Troyer, F. D., & Allacker, K. Integrated energy, daylighting, comfort and environmental performance analysis of window systems in patient rooms. *Architectural Science Review*. 2022, 65(5):319–337. <https://doi.org/10.1080/00038628.2022.2099806>.
- [208] Del Regno, N., Gigante, A., Ruggiero, S., Tariello, F., & Vanoli, G. P. Energy efficiency in hospitals: comparative analysis of different HVAC configurations. *Advances in Building Energy Research*. 2023, 17(5):554–577. <https://doi.org/10.1080/17512549.2023.2266464>.

- [209] Memari, S., Kocaturk, T., Lozanovska, M., Andrews, F., & Tucker, R. Future proofing for hospital building design: from research to practice. *Architectural Engineering and Design Management*. 2023, 19(6):681–700. <https://doi.org/10.1080/17452007.2022.2162842>.
- [210] Gargaro, D.; Rainieri, C.; Fabbrocino, G. Structural and seismic monitoring of the “Cardarelli” Hospital in Campobasso. *X International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN 2017*. 2017, 936-941. [10.1016/j.proeng.2017.09.244](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.244).
- [211] INES, Massifier La Construction de Maisons a ` Energie ´ Positive, 2021, 2021, <https://www.ines-solaire.org/news/massifier-la-construction-de-maisons-a-energiepositive/>.
- [212] Li P.; Parkinson, T.; Schiavon, S.; Froese, T. M.; De Dear, R.; Rysanek, A.; Staub-French, S. Improved long-term thermal comfort indices for continuous monitoring. *Energy & Buildings*. 2020, 224:110270. [10.1016/j.enbuild.2020.110270](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110270).
- [213] CEREMA, ADEME, Batiments ^ D’emostrateurs ` a Basse Consommation d’energie. Enseignements Op’eracionnels Tir’es de 141 Constructions et R’enovations Du Programme PREBAT, 2018.
- [214] Journal Officiel de la R’epublique Française, D’ecret No 2021-1004 Du 29 Juillet 2021 Relatif Aux Exigences de Performance Energ ´ etique et Environnementale Des Constructions de B^ atiments En France M’etropolitaine, 2021. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>.
- [215] Nicolas Cabassud, Laurent Guldner, Pr’esentation de La R’eglementation Environnementale 2020, 2021. May 25.
- [216] J.B. Nielsen, I. Ambrose, A new ventilation strategy for humidity control in dwellings - a demonstration project, in: 16th AIVC Conference “Implementing The Results Of Ventilation Research”, Palm Springs, USA, 1995. [http://www.aivc.org/sites/default/files/members\\_area/medias/pdf/Conf/1995/Nielsen.pdf](http://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/Conf/1995/Nielsen.pdf).
- [217] Lopez, M. J. R.; Moujalled, B.; Guyot, G.; Golly, B.; Ondarts, M.; Wurtz, F.; Gonze, E. Analysis and comparison of thermal comfort indicators based on a long-term campaign in low energy residences. *Journal of Building Engineering*. 2023, 65:105707. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105707>.
- [218] D.M. 26 giugno 2016 – Adeguamento linee guida nazionali – Requisiti minimi - Il ministro dello sviluppo economico di concerto con il ministro dell’ambiente e della tutela del territorio e del mare, il ministro delle infrastrutture e dei trasporti e con il ministro per la semplificazione e la pubblica amministrazione.
- [219] D’Agostino D., Cuniberti B., Bertoldi P. Energy consumption and efficiency technology measures in European non-residential buildings. *Energy and Buildings*. 2017; 153: 72-86. [10.1016/j.enbuild.2017.07.062](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.062).
- [220] Eurostat, European System of Accounts – ESA, Office for Official Publications of European Communities, Luxembourg, 1995, pp. 1196. [Energy Balances - Eurostat](https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&plugin=1).
- [221] [https://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR\\_EU\\_B\\_under\\_microscope\\_study.pdf](https://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf).

- [222] San José Alonso J.F., Guijarro Rubio A.B., Castro Ruiz F., Villafruela Espina J. M. Indicators of thermal energy in the hospitals of Castilla y Leon. 2009; 641-648.
- [223] Montero, I., Miranda, M.T., Barrena, F. Sepúvela, F.J., Arranz, J.I. Analysis of photovoltaic self-consumption systems for hospitals in southwestern Europe. *Energy and Buildings*. 2022, 269: 112254. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112254>.
- [224] Terna. Dati statistici sull'energia elettrica in Italia. 2022.
- [225] Moher D., Liberati A., Tetzlaff J., Altman D.G. The PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Med*. 2009, 6, e1000097. <https://www.prisma-statement.org/>.
- [226] Maddalena T.E., Müller S.A., dos Santos R.M., Salzmann C., Jones C.N. Experimental data-driven model predictive control of a hospital HVAC system during regular use. *Energy & Buildings*. 2022; 271: 112316. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.07323>.
- [227] Cheng H., Liu Z., Chen L., Chen H. Abnormal energy consumption detection using ensemble model for water chilling unit on HVAC system. *Energy & Buildings*. 2023; 297: 113419. [10.1016/j.enbuild.2023.113419](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113419).
- [228] Dulce-Chamorro E., Martinez-de-Pison F.J. An advanced methodology to enhance energy efficiency in a hospital cooling-water system. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43: 102839. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102839>.
- [229] Rahman N.M.A., Lim C.H., Fazlizan A. Optimizing the energy saving potential of public hospital through a systematic approach for green building certification in Malaysia. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43: 103088. [10.1016/j.jobe.2021.103088](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103088).
- [230] Radwan A.F., Hanafy A.A., Elhelw M., El-Sayed A.E.A. Retrofitting of existing buildings to achieve better energy-efficiency in commercial building case study: Hospital in Egypt. *Alexandria Engineering Journal*. 2016; 55: 3061-3071. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.08.005>.
- [231] Wang Xu, Xu Ye, Fu Z., Guo J., Li Wei, Zhu Yue. A dynamic interactive optimization model of CCHP system involving demand-side and supply-side impacts of climate change. Part II: application to a hospital in Shanghai, China. *Energy Conversion and Management*. 2022; 252: 115139. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115139>.
- [232] Sadi M., Arabkoohsar A. Exergy, economic and environmental analysis of a solar-assisted cold supply machine for district energy systems. *Energy*. 2020; 206: 118210. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118210>.
- [233] García-Sanz-Calcedo J., Nuno de Sousa Neves, Fernandes J.P.A. Measurement of embodied carbon and energy of HVAC facilities in healthcare centres. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 289: 125151. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125151>.
- [234] Rasouli M, Akbari S., Simonson C.J., Besant R.W. Energetic, economic and environmental analysis of a health-care facility HVAC system equipped with a run-around membrane energy exchanger. *Energy and Buildings*. 2014; 69: 112-121. [10.1016/j.enbuild.2013.06.036](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.036).

- [235] As M., Bilir T. Enhancing energy efficiency and cost-effectiveness while reducing CO2 emissions in a hospital building. *Journal of Building Engineering*. 2023; 78: 107792. [10.1016/j.jobe.2023.107792](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107792).
- [236] Buonomano A., Calise F., Ferruzzi G., Palombo A. Dynamic energy performance analysis: Case study for energy efficiency retrofits of hospital buildings. *Energy*. 2014; 78: 555-572. [10.1016/j.energy.2014.10.042](https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.042).
- [237] Denilson Boschiero do Espirito Santo. An energy and exergy analysis of a high-efficiency engine trigeneration system for a hospital: A case study methodology based on annual energy demand profiles. *Energy and Buildings*. 2014; 76: 185-198. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.014>.
- [238] Gambarotta A., Malabarba R., Morini M., Randazzo G., Rossi M., Saletti C., Vieri A. Demonstrating a smart controller in a hospital integrated energy system. *Smart Energy*. 2023; 12: 100120. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100120>.
- [239] Atienza-Márquez A., Muñoz F. D., Hernández F.F., López J.M.C. Domestic hot water production system in a hospital: Energy audit and evaluation of measures to boost the solar contribution. *Energy*. 2022; 261: 125275. [10.1016/j.energy.2022.125275](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125275).
- [240] Biglia A., Caredda F.V., Fabrizio E., Filippi M., Mandas N. Technical-economic feasibility of CHP systems in large hospitals through the Energy Hub method: The case of Cagliari AOB. *Energy and Buildings*. 2017; 147: 101-112. [0.1016/j.enbuild.2017.04.047](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.047).
- [241] Vanhoudt D., Desmedt J., Van Bael J., Robeyn N., Hoes H. An aquifer thermal storage system in a Belgian hospital: Long-term experimental evaluation of energy and cost savings. *Energy and Buildings*. 2011; 43: 3657-3665. [10.1016/j.enbuild.2011.09.040](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.040).
- [242] Pagliarini G., Corradi C., Rainieri S. Hospital CHCP system optimization assisted by TRNSYS building energy simulation tool. *Applied Thermal Engineering*. 2012; 44: 150-158. [10.1016/j.applthermaleng.2012.04.001](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.04.001).
- [243] Bhatia A., Singh H.R. Energy performance assessment of a multi super specialty hospital building in composite climate zone in India: A case study. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 47:3024-3028. [10.1016/j.matpr.2021.05.495](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.495).
- [244] De Masi R.F., Del Regno N., Gigante A., Ruggiero S., Russo A., Tariello F., Vanoli G.P. The importance of investing in the energy refurbishment of hospitals: results of a case study in a Mediterranean climate. *Sustainability*. 2023; 15: 11450. <https://doi.org/10.3390/su151411450>.
- [245] Song I.H., Lhee J.H., Jeong J.W. Energy efficiency and economic analysis of variable frequency drive and variable pitch system: A case study of axial fan in hospital. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43: 103213. [10.1016/j.jobe.2021.103213](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103213).
- [246] Ozyogurtcu G., Mobedi M., Ozerdem B. Economical assessment of different HAVC systems for an operating room: Case study for different Turkish climate regions. *Energy and Buildings*. 2011; 43: 1536-1543. [10.1016/j.enbuild.2011.02.013](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.013).

- [247] Fifield L.J., Lomas K.J., Giridharan R., Allison D. Hospital wards and modular construction: Summertime overheating and energy efficiency. *Buildings and Environment*. 2018; 141: 28-44.
- [248] Sukarno R., Putra N., Hakim I. I., Rachman F. F., Mahlia T. M. I. Utilizing heat pipe heat exchanger to reduce the energy consumption of airborne infection isolation hospital room HVAC system. *Journal of Building Engineering*. 2021; 35: 102116. [10.1016/j.jobbe.2020.102116](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102116).
- [249] Nourdine, B., Saad, A. Energy consumption in hospitals. 4<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Information Technologies ICEIT'2020.07-07 March 2020.
- [250] Papadopoulos, A.M. Energy efficiency in hospitals: historical development, trends and perspectives. *Energy Performance of buildings*. 2015, 217-233. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20831-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20831-2_11).
- [251] González González, A., García-Sanz-Calcedo, J., Salgado, D.R. Evaluation of energy consumption in German hospitals: benchmarking in the public sector. *Energies*. 2018, 11(9): 2279. <https://doi.org/10.3390/en11092279>.
- [252] Bawaneh, K., Nezami, F.G., Rasheduzzaman, Md., Deken, B. Energy consumption analysis and characterization of healthcare facilities in the United States. *Energie*. 2019, 12(19): 3775. <https://doi.org/10.3390/en12193775>.
- [253] Ji, R., Qu, S. Investigation and evaluation of energy consumption performance for hospital buildings in China. *Sustainability*. 2019, 11(6): 1724. <https://doi.org/10.3390/su11061724>.
- [254] Nourdine, B., Saad, A. About energy efficiency in Moroccan health care buildings. *Materials Today: Proceedings*. 2021, 39(part 3): 1141-1147. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.135>.
- [255] Psillaki, M., Apostolopoulos, N., Makris, I., Liargovas, P., Apostolopoulos, S., Dimitrakopoulos, P., Skilas, G. Hospital's energy efficiency in the perspective of saving resources and providing quality services through technological options: A systematic literature review. *Energies*. 2023, 16(2):755. <https://doi.org/10.3390/en16020755>.
- [256] Bakhtiari, H., Akander, J., Cehlin, M. Evaluation of thermal comfort in a historic building refurbished to an office building with modernized HVAC systems. *Advances in Buildings Energy Research*. 2020, 14: 218-237. <https://doi.org/10.1080/17512549.2019.1604428>.
- [257] Sdino, L., Brambilla, A., Dell'Ovo, M., Sdino, B., Capolongo, S. Hospital construction cost affecting their lifecycle: an Italian overview. *Healthcare*, 2021, 9(7): 888. <https://doi.org/10.3390/healthcare9070888>.
- [258] Morawska, L., Tang, J.W., Bahnfleth, W., Bliysen, P.M., Boerstra, A., Buonanno, G., Cao, J., Dancer, S., Floto, A., Franchimon, F., Haworth, C., Hogeling, J. Isaxon, C., Jimenez, J.L., Kumitski, J., Li, Y., Loomans, M., Marks, G., Marr, L.C., Mazzarella, L., Yao, M. How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environment International*. 2020, 142: 105832. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105832>.

- [259] United Nations General Assembly. Resolution adopted by the general assembly on 25 September 2015, transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development; united nations general assembly: New York, NY, USA, 2015.
- [260] Dimoudi, A., Kantzioura, A., Toumpoulides, P., Zoras, St, Serghides, D., Dimitriou, St, Thravalou, St, Metaj, M., Mara, E., Dorri, A. The energy performance of hospital buildings in the South Balkan Region: the prospects for Zero-Energy Hospitals. *Sustainable Energy Development and Innovation*. 2022, 757-763.
- [261] ASHRAE. HVAC design manual for hospitals and clinics (2<sup>nd</sup> edition). 2013.
- [262] Rahman, N.M.A., Haw, L.C., Fazlizan, A. A literature review of naturally ventilated public hospital ward in Tropical climate countries for thermal comfort and energy saving improvements. *Energie*. 2021, 14(2): 435. <https://doi.org/10.3390/en14020435>.
- [263] Özehi, E., Abuşoğlu, A., Kutlar, A.İ., Dağci, O. A comparative thermodynamic and economic analysis and assessment of a conventional HVAC and a VRF system in a social and cultural building. *Energy and Buildings*. 2017, 140: 196-209. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.008>.
- [264] Deshmukh, S., Glicksman, L., Norford, L. Case study: fault detection in air-handling units in buildings. *Advances in Building Energy Research*. 2018, 14(3):1-17. [10.1080/17512549.2018.1545143](https://doi.org/10.1080/17512549.2018.1545143).
- [265] Guo, S., Wang, W., Zhou, Y. Research on energy saving and economy of old buildings based on parametric design: a case study of a hospital in Linyi City, Shandong Province. *Sustainability*. 2022, 14(24): 16681. <https://doi.org/10.3390/su142416681>.
- [266] De Masi, R.F., Ascione, F., Sosto, G., Vanoli, G.P. Cost-effective energy refurbishment of health care facilities in heating dominated climates of Italian backcountry. The case study of the Hospital Veneziale of Isernia. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017, 10:756-768. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2017.756.768>.
- [267] Ceglia, F., Marrasso, E., Roselli, C., Sasso, M. Time-evolution and forecasting of environmental and energy performance of electricity production system ad national and at bidding zone level. *Energy Conversion and Management*. 2022, 265: 115772. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115772>.
- [268] SunPower. n. d. Scheda tecnica: <https://sunpower.maxeon.com/it/prodotti-pannellifotovoltaici/pannelli-fotovoltaici>.
- [269] Enerblu Cogeneration. Scheda tecnica: [http://www.enerblu-cogeneration.com/product\\_models/307-rec2-140-g.pdf](http://www.enerblu-cogeneration.com/product_models/307-rec2-140-g.pdf).
- [270] Mitsubishi Electric. Scheda tecnica: i-FX-N-G01 0472 - 1152 | MEHITS (melcohit.com).
- [271] Kolben Industries. Scheda tecnica: [http://www.kloben.it/uploads/files/ProductAttachment/850000395\\_scheda\\_tecnica\\_COLLETTORE\\_ATON\\_G\\_22.pdf](http://www.kloben.it/uploads/files/ProductAttachment/850000395_scheda_tecnica_COLLETTORE_ATON_G_22.pdf).

- [272] Yazaki, M. Scheda tecnica: [https://maya-airconditioning.com/pdf/WFC%20Series%20LD\\_001\\_IT.pdf](https://maya-airconditioning.com/pdf/WFC%20Series%20LD_001_IT.pdf).
- [273] Ilmed Impianti. Scheda tecnica: <https://www.ilmedimpianti.com/wp-content/uploads/2021/07/tt-ita.pdf>.
- [274] Adv Next Air. Scheda tecnica: <https://www.rhoss.it/it/prodotti/adv-next-air-01%C3%B716/>.
- [275] Lu, Y., Oladokun, M., Lin, Z. Reducing the exposure risk in hospitals wards by applying stratum ventilation system. *Building and Environment*. 2020, 183: 107204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107204>.
- [276] Sheng, S., Yamanaka, T., Kobayashi, T., Choi, N., Chou, N. Experimental study and CFD modelling of four-bed hospital ward with all-air wall induction unit for air-conditioning. *Building and Environment*. 2022, 222:109388. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109388>.
- [277] King, M., Noakes, C.J., Sleight, P.A. Modeling environment contamination in hospital single-and-four bed rooms. *Indoor Air*. 2015, 25(6): 694-707. [10.1111/ina.12186](https://doi.org/10.1111/ina.12186).
- [278] Tsang, T.W.H., Mui, K.W., Wong, L.T. Computational Fluid Dynamic (CFD) studies on airborne transmission in hospitals: a review on the research approaches and the challenges. *Journal of Building Engineering*. 2022, 63(20): 105533. [10.1016/j.jobe.2022.105533](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105533).
- [279] AirCar. Scheda tecnica: DGVT.pdf (aircar.it).
- [280] Tecno Ventil. Scheda tecnica: da.pdf (tecnoventil.it).

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Procedura di diagnosi energetica prevista dalla norma UNI 16247-1 [39].....	42
Figura 2. (a) MATRIX layout. (b) Installazione del sistema in fase di ricerca per ulteriori studi .....	56
Figura 3. Schema delle configurazioni simulate: (a) PCM sul lato interno; (b) PCM sul lato esterno .....	58
Figura 4. Funzione entalpia-temperatura: (A) Comfortboard®; (B) Weber.mur clima®; (C) Dry Clay Plaster; (D) SmartBoardTM .....	60
Figura 5. Funzione entalpia-temperatura di: (A) RT26®; (B) RT28HC®; (C) RT31®; (D) SP26E®; (E) SP29Eu®;.....	61
Figura 6. Funzione entalpia-temperatura del MOC con PCM integrato .....	62
Figura 7. PCM sul lato interno: confronto basato sul carico di riscaldamento (EH) e di raffreddamento (EC) .....	64
Figura 8. PCM sul lato interno: confronto basato sul fabbisogno energetico primario e sulle ore di disagio.....	66
Figura 9. PCM sul lato esterno: confronto basato sul carico di riscaldamento e raffreddamento .....	67
Figura 10. PCM sul lato esterno: confronto in base al fabbisogno energetico primario e alle ore di disagio.....	69
Figura 11. PCM su entrambi i lati: confronto basato sul carico di riscaldamento e raffreddamento.	70
Figura 12. PCM su entrambi i lati: confronto basato sul carico di riscaldamento e raffreddamento	72
Figura 13. Ottimizzazione dei PCM: confronto basato sul carico di riscaldamento e raffreddamento .....	73
Figura 14. PCM installato con le sue dimensioni .....	76
Figura 15. (a) Disposizione del pannello GI; (b) caratteristiche termofisiche .....	78
Figura 16. Vista 3D della parete di prova con il foro per ospitare il pannello GI.....	79
Figura 17. Caratteristiche dimensionali del giunto in legno.....	79
Figura 18. (a) Installazione completa di GI (novembre 2019); (b) lavoro per l'applicazione PCM (maggio 2021) .....	79
Figura 19. (a) Schema dei sensori esterni; (b) vista reale del cartongesso esterno .....	80
Figura 20. (a) Sensori su blocchi geopolimerici; (b) sensori su PCM .....	81
Figura 21. Andamento delle temperature superficiali all'interfaccia degli strati, 11-16 maggio .....	83
Figura 22. Andamento delle temperature superficiali all'interfaccia degli strati, 7-12 luglio .....	83
Figura 23. timeM% – percentuale di tempo nell'intervallo di fusione: (a) giorno; (b) notte .....	85
Figura 24. Differenza di temperatura superficiale sui pannelli GI: 10–16 maggio .....	86
Figura 25. Flusso di calore, 10-16 maggio: (a) strato geopolimerico; (b) strato interno.....	87
Figura 26. Differenza di temperatura superficiale sui pannelli GI: 14-20 giugno .....	88
Figura 27. Flusso di calore, 14-20 giugno: (a) strato geopolimerico; (b) strato interno.....	90
Figura 28. Differenza di temperatura superficiale sui pannelli GI: 19–25 luglio .....	90
Figura 29. Flusso di calore, 19-25 luglio: (a) strato geopolimerico; (b) strato interno .....	92
Figura 30. Distribuzione dell'indice di attenuazione dello stress termico sullo strato geopolimerico .....	93
Figura 31. Accumulo/rilascio di calore tramite la superficie laterale dell'ambiente e lo strato di geopolimero .....	94
Figura 32. a) Studio di caso reale; b) Modello di simulazione dell'edificio.....	96

Figura 33. Risultati della simulazione energetica con file climatico attuale (TMY) .....	98
Figura 34. Variazioni percentuali del fabbisogno energetico per riscaldamento e raffreddamento - CC_2050.....	99
Figura 35. Variazioni percentuali del fabbisogno energetico per riscaldamento e raffreddamento - CC_2050.....	100
Figura 36. Differenza (kWh) nel fabbisogno energetico per il raffreddamento.....	101
Figura 37. Vista esterna (a) e planimetria (b) dell'nZEB .....	104
Figura 38. Posizionamento della stazione microclimatica (a); datalogger (b) lampada con temperatura colore calda (c) e fredda (d).....	105
Figura 39. Calcolo del PMV e media oraria del voto degli occupanti (a) e istantanea (b) .....	107
Figura 40. Immagine satellitare dell'edificio (riquadro blu) e del contesto urbano circostante .....	112
Figura 41. Involucro dell'edificio: facciata sud.....	113
Figura 42. Ubicazione della parete (A); posizioni dei sensori all'interno (B) e all'esterno (C) .....	114
Figura 43. Finestre: (A) lato esterno—sud; (B) lato interno .....	115
Figura 44. Immagini IR e fotografiche interne della stanza rivolta a sud-est.....	116
Figura 45. Photographic and IR images of the MHCS .....	117
Figura 46 Immagini fotografiche e IR del pannello MHCS.....	117
Figura 47. Unità di trattamento dell'aria principali: (A) (piano-1) radiologia; (B) (2° piano) sala parto; (C) (3° piano) assistenza infermieristica.....	118
Figura 48. Impianto fotovoltaico installato .....	119
Figura 49. Dispositivi del sistema di illuminazione.....	120
Figura 50. Elettricità attiva: valore medio giornaliero al mese .....	121
Figura 51. (A) Ubicazione della stanza del paziente sottoposta ad indagine; (B) sensori nella stanza .....	122
Figura 52. PMV e PPD il 9 marzo .....	123
Figura 53. Rendering del modello di simulazione (a) e un'immagine della facciata nord-est (b) ...	124
Figura 54. Confronto dei servizi energetici per la calibrazione del modello di calcolo .....	124
Figura 55. Ospedale “Cardarelli” di Campobasso .....	132
Figura 56. a) Disposizione del reparto chirurgico b) attenzione alle stanze singola e multipla.....	133
Figura 57. Stazione autonoma installata nella stanza singola a) e nella stanza multipla b); data logger c).....	133
Figura 58. Condizioni meteo esterne 28 luglio 2022.....	140
Figura 59. Dati interni relativi alla camera singola, 28 luglio 2022 .....	141
Figura 60. Dati di comfort relativi alla camera singola, 28 luglio 2022.....	142
Figura 61. Dati interni relativi alla sala multipla, 28 luglio 2022 .....	143
Figura 62. Dati di comfort relativi alla camera multipla, 28 luglio 2022 .....	143
Figura 63. Indici di comfort e variazione percentuale rispetto al giudizio del paziente, stanza singola .....	147
Figura 64. Indici di comfort e variazione percentuale rispetto al giudizio del paziente, stanza multipla .....	147
Figura 65. Errore orario (ERR orario) per la temperatura dell'aria interna (A) e la temperatura radiante media (B), stanza multipla .....	149
Figura 66. Variazione ottimale dell'indice di comfort dopo l'ammodernamento, per stanza singola .....	150

Figura 67. Variazione ottimale dell'indice di comfort dopo l'ammodernamento, per stanza multipla .....	151
Figura 68. Temperatura operativa: distribuzione cumulativa per la stanza singola .....	152
Figura 69. Umidità relativa: distribuzione cumulativa per la stanza singola .....	152
Figura 70. Temperatura operativa: distribuzione cumulativa per la stanza multipla .....	153
Figura 71. Umidità relativa: distribuzione cumulativa per la stanza multipla .....	153
Figura 72. Consumo finale di energia in Europa nell'anno 2022 nei settori commerciale e dei servizi pubblici [220] .....	154
Figura 73. Consumi energetici nel settore dei servizi in Italia nel 2022 [224] .....	155
Figura 74. andamento dei prezzi dell'energia in Europa e in Italia negli ultimi tre anni [220] .....	156
Figura 75. Articoli trovati nel database accademico ScienceDirect.....	157
Figura 76. Schema a blocchi della metodologia utilizzata .....	170
Figura 77. Ospedale 'Ferdinando Veneziale', vista esterna (a) e pianta del piano interrato -2 (b) .	171
Figura 78. Sistema HVAC nel caso base (BC) .....	172
Figura 79. Schema di base del sistema HVAC con l'impianto fotovoltaico .....	174
Figura 80. Schema di base del sistema HVAC con un impianto di cogenerazione .....	175
Figura 81. Schema di base del sistema HVAC con pompa di calore elettrica .....	176
Figura 82. Schema di base del sistema HVAC con pompa di calore elettrica e impianto fotovoltaico .....	176
Figura 83. Schema di base del sistema HVAC con collettori solari termici e pompa di assorbimento .....	177
Figura 84. Fabbisogno di energia primaria e risparmio di energia primaria nello Scenario 1 .....	179
Figura 85. Fabbisogno di energia primaria e risparmio di energia primaria nello scenario 2 .....	180
Figura 86. Emissioni di anidride carbonica e variazione (rispetto al BC) nello Scenario 1 .....	181
Figura 87. Domanda di energia primaria (Ep) e risparmio di energia primaria (PES) nello scenario 1 .....	182
Figura 88. Domanda di energia primaria (Ep) e risparmio di energia primaria (PES) nello scenario 2 .....	182
Figura 89. Approccio metodologico .....	184
Figura 90. Distribuzione della temperatura nella cassa base e con diffusore al centro del soffitto .	186
Figura 91. Distribuzione della velocità dell'aria nel case base e con un diffusore al centro del soffitto .....	186
Figura 92. Distribuzione della temperatura nella cassa base e con griglia di aspirazione installata a parete.....	186
Figura 93. Distribuzione della velocità dell'aria nella cassa base e con griglia di aspirazione installata a parete.....	187

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Ventilazione minima prescritta dalla norma UNI 10339 [27].....	17
Tabella 2. Classi di filtri ed efficienza di filtrazione prescritte dalla norma UNI 10339 [27].....	18
Tabella 3. Categorie di qualità dell'ambiente e rispettivi livelli di aspettativa previsti dalla norma UNI EN [28] .....	18
Tabella 4. Tassi di ventilazione per la diluizione delle emissioni dovute agli occupanti in base alle differenti categorie ( $qP$ )previsti dalla norma UNI EN 16798 [28].....	19
Tabella 5. Tassi di ventilazione per la diluizione delle emissioni dovute agli occupanti in base alle differenti categorie ( $qB$ ) previsti dalla norma UNI EN 16798 [28] .....	19
Tabella 6. Concentrazione differenziale limite rispetto a quella esterna di anidride carbonica CO <sub>2</sub> , assumendo un'emissione standard pari a 20 l/h per persona [28].....	20
Tabella 7. Condizioni di pressione prescritte ai locali ospedalieri dalla normativa ASHRAE 62-1989 [29].....	20
Tabella 8. Livelli di diagnosi energetica previsti dalla norma UNI 16247 [37].....	35
Tabella 9. Articoli di ricerca con casi di studio .....	47
Tabella 10. Proprietà della configurazione di progettazione di base .....	57
Tabella 11. Proprietà dei materiali da costruzione con PCM microincapsulato .....	60
Tabella 12. Proprietà dei PCM macroincapsulati.....	61
Tabella 13. Funzione entalpia-temperatura del MOC con Micronal PCM.....	62
Tabella 14. Soluzioni per l'analisi parametrica con PCM su entrambi i lati.....	70
Tabella 15. Risultati delle configurazioni ottimali .....	73
Tabella 16. Dati tecnici del pannello Templok.....	76
Tabella 17. Composizione chimica dei sali idrati .....	76
Tabella 18. Specifiche tecniche dei sensori per il monitoraggio.....	81
Tabella 19. Specifiche tecniche della stazione meteorologica .....	82
Tabella 20. Differenza di temperatura massima e minima sul blocco geopolymer: 10–16 maggio ..	86
Tabella 21. Differenza di temperatura massima e minima sul blocco geopolymer: 14–20 giugno...	89
Tabella 22. Differenza di temperatura massima e minima sul blocco geopolymer: 19–25 luglio.....	91
Tabella 23. Variabili di progetto .....	97
Tabella 24. Dati tecnici dei sensori utilizzati.....	105
Tabella 25. Caratteristiche termofisiche della parete di tufo .....	114
Tabella 26. Caratteristiche termofisiche della parete in calcestruzzo isolata .....	114
Tabella 27. Dati globali trasparenti dell'involucro per livello ed esposizione.....	115
Tabella 28. Dati prestazionali ricavati dalle schede tecniche .....	117
Tabella 29. Descrizione dei principali sistemi HVAC .....	119
Tabella 30. Misure elettriche .....	121
Tabella 31. Parametri prestazionali energetici dello stato di fatto .....	125
Tabella 32. Riepilogo dell'analisi energetica .....	127
Tabella 33. Dati sulla vita utile e sul tasso di manutenzione annuale degli interventi ipotizzati .....	127
Tabella 34. Esempio di questionario somministrato ai pazienti.....	135
Tabella 35. Valori massimi, minimi e ottimali raccomandati dalle diverse norme .....	135
Tabella 36. Indice di calibrazione e valori accettabili.....	139
Tabella 37. Riepilogo dei dati meteorologici durante il periodo di monitoraggio .....	140

Tabella 38. Variabilità degli indici di comfort, 28 luglio .....	144
Tabella 39. Variabilità degli indici di comfort, 31 luglio .....	146
Tabella 40. Parametri statistici calcolati per la calibrazione del modello numerico .....	148
Tabella 41. Caratteristiche del sottosistema di generazione installato nelle strutture sanitarie .....	158
Tabella 42. Analisi dei sottosistemi di distribuzione installati nelle strutture sanitarie .....	161
Tabella 43. Informazioni sul sottosistema di regolazione installato nelle strutture sanitarie .....	162
Tabella 44. Analisi dei sottosistemi di emissione installati nelle strutture sanitarie .....	164
Tabella 45. Progettazione dei dati climatici.....	170
Tabella 46. Carichi interni .....	173
Tabella 47. Caratteristiche tecniche del modulo fotovoltaico utilizzato.....	174
Tabella 48. Caratteristiche tecniche del cogeneratore utilizzato .....	175
Tabella 49. Caratteristiche tecniche dell'EHP utilizzata.....	176
Tabella 50. Caratteristiche tecniche del collettore solare termico utilizzato .....	178
Tabella 51. Caratteristiche tecniche della pompa di calore ad assorbimento utilizzata.....	178
Tabella 52. Caratteristiche tecniche dell'unità di recupero calore utilizzata .....	178
Tabella 53. Indice del livello di energia importata per le soluzioni alternative nei due scenari considerati.....	180
Tabella 54. Indice del livello di energia importata per le soluzioni alternative nei due scenari considerati con recuperi di calore .....	183