



UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



**UNIVERSITA' DELLA CALABRIA**

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale

**Dottorato di Ricerca in  
Ingegneria Meccanica**

*Con il contributo di*

Commissione Europea, Fondo Sociale Europeo e Regione Calabria

**CICLO**

XXVI

**TITOLO TESI**

**SOLUZIONI DI INVOLUCRO E IMPIANTISTICHE INNOVATIVE PER  
EDIFICI A BASSO CONSUMO ENERGETICO**

**Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/11 *Fisica tecnica ambientale***

**Coordinatore:** Ch.mo Prof. Leonardo Pagnotta

Firma

**Supervisore:** Ch.mo Prof. Natale Arcuri

Firma

**Dottorando:** Dott. Francesco Reda

Firma

# Indice

INTRODUZIONE .....	5
<u>CAPITOLO 1 CONTESTO ENERGETICO.....</u>	<u>6</u>
1.1. Evoluzione temporale del consumo energetico mondiale .....	6
1.2 Consumo energetico in Europa e Italia .....	11
1.2.1 Consumi energetici in Italia.....	12
1.2.2 Il consumo energetico nel settore edilizio .....	13
1.3. Conferenze internazionali.....	17
1.3.1 Normative comunitarie [8] .....	19
<u>CAPITOLO 2     ELEMENTO DI INVOLUCRO DI COPERTURA: TETTO VERDE</u>	<u>25</u>
2.1 Introduzione.....	25
2.1.1 Aspetti energetici .....	26
2.1.2 Aspetti Economici .....	33
2.1.3 Caratteristiche tecniche ed analisi critica .....	35
2.2 Fenomeni termofisici, modelli matematici e software .....	42
2.2.1 Modello termofisico utilizzato.....	47
2.2.2 Software .....	57
2.2.3 Modello della copertura a verde in Design Builder.....	60
2.3 Caso studio: Cubo universitario 46 C.....	62
2.3.1 Caratteristiche tecniche.....	62
2.3.2 modello termofisico .....	79
2.3.3 Modello geometrico dell'edificio .....	84
2.3.4 Dati Climatici.....	85
2.4 Soluzioni Proposte e Risultati .....	90
2.4.1 Proprietà termofisiche dei sistemi di copertura analizzati .....	91
2.4.2 Risultati.....	93
2.4.3 Analisi dei Risultati .....	99

CONCLUSIONI.....	102
<u>CAPITOLO 3</u> <u>ELEMENTO DI INVOLUCRO OPACO: PCM INTEGRATO NEGLI</u> <u>ELEMENTI ESTERNI ED INTERNI.....</u>	<u>105</u>
3.1 Introduzione.....	105
3.1.1 Classificazione.....	106
3.1.2 Sali idrati.....	107
3.1.3 Usi edili.....	112
3.2 Performance Energetiche e modello termofisico .....	113
3.2.1 Integrazione in elementi di involucro edilizio .....	113
3.2.2 Integrazione in elementi di involucro edilizio esterno .....	114
3.2.3 Integrazione in elementi di involucro edilizio interno.....	117
3.2.4 Software e Modello termofisico .....	118
3.3 Caso Studio e soluzione proposte.....	126
3.3.1 Caratteristiche tecniche.....	126
3.3.2 Soluzioni integrate in pareti interne.....	130
3.3.3 Soluzioni integrate in pareti verticali esterne .....	131
3.4 Risultati .....	133
3.4.1 Caso di riferimento .....	133
3.4.2 Ottimizzazione delle performance termiche in funzione della PMT della soluzione con PCM integrato nelle partizioni interne .....	134
3.4.3 PCM integrato in partizioni interne .....	143
3.4.4 Performance annuali del PCM integrato nelle partizioni interne e attenuazione-sfasamento dei carichi.....	144
3.4.5 Ottimizzazione delle performance termiche in funzione della PMT della soluzione con PCM integrato nelle pareti esterne .....	148
3.4.6 PCM integrato nelle pareti esterne .....	160
3.4.7 Performance annuali del PCM integrato nelle pareti esterne e attenuazione-sfasamento dei carichi.....	164

3.4.8 Confronto delle diverse soluzioni .....	173
CONCLUSIONI.....	180
<b><u>CAPITOLO 4      ELEMENTO IMPIANTISTICO: FOTOVOLTAICO INNOVATIVO</u></b>	
4.1 Introduzione.....	181
4.1.1 Efficienza.....	183
4.1.2 Bilancio energetico di un pannello fotovoltaico .....	184
4.2 Sistema di raffreddamento e soluzioni proposte .....	187
4.2.1 Il fenomeno della Convezione .....	188
4.2.2 Pannello Fotovoltaico analizzato .....	195
4.2.3 Soluzioni proposte .....	199
4.2.4 Taratura del modello.....	203
4.2.5 TRNSYS: Type 180, array fotovoltaico .....	205
4.3 Risultati .....	207
4.3.1 Sistema ad acqua.....	207
4.3.2 Confronto delle soluzioni ad acqua .....	216
4.3.3 Ottimizzazione della soluzione ad acqua.....	219
4.3.4 Sistema ad aria.....	221
4.3.5 Confronto delle soluzioni ad aria.....	224
4.4 Rilievo sperimentale del campo di velocità.....	226
4.4.1 Introduzione .....	226
4.4.2 Creazione del Modello.....	227
4.4.3 Misure acquisite.....	230
4.5 Analisi Energetica .....	232
4.5.1 Risultati.....	233
CONCLUSIONI.....	237
<b><u>BIBLIOGRAFIA.....</u></b>	<b><u>239</u></b>

## **INTRODUZIONE**

Il comparto edilizio degli ultimi decenni è stato protagonista di una rapida successione di tendenze, quali: decostruttivismo, minimalismo, architettura leggera, uso di fonti rinnovabili ecc., determinate da svariati fattori come il contesto , socio-politico, demografico e la sua distribuzione urbana, la globalizzazione e lo sviluppo economico, l'internazionalizzazione culturale. Inoltre, è spesso al centro dei dibattiti politici, economici e di sviluppo internazionale per via della sua predominante posizione tra le settrici macro economiche nella torta dei consumi energetici. In virtù del proprio contesto energetico sono state sviluppate una moltitudine di soluzioni che mirano al risparmio energetico dell'edificio da parte degli organismi di ricerca internazionale. Fondamentalmente si tratta di soluzioni impiantistiche e d'involucro edilizio. Gli attori di mercato e l'ente legislatore hanno recepito le tecnologie più mature immettendole nel mercato. Le più comuni prevedono l'utilizzo di fonti rinnovabili, soluzioni impiantistiche, e materiali, soluzioni d'involucro. Il lavoro di tesi affronta tre soluzioni innovative, due d'involucro e una di sistema, puntando al contenimento dei consumi energetici e al miglioramento dell'efficienza del sistema. Il lavoro è diviso per capitoli. Ogni capitolo riguarda un argomento trattato. In particolari il primo capitolo tratta il contesto energetico mondiale e nazionale in termini di consumi energetici e di norme vigenti. Doveroso affrontare questo aspetto al fine di collocare in un ambito di più ampio respiro la ricerca svolta sui particolari impiantistici e di involucro edilizio. Gli altri capitoli, invece trattano i tre argomenti di ricerca. Questi sono stati organizzati con una comune ossatura: una introduzione che contestualizza il preciso argomento di ricerca, una descrizione dei fenomeni termofisici caratterizzanti, che aggredisce gli aspetti salienti del funzionamento, soluzioni proposte, strumenti di analisi, risultati e conclusione.

## CAPITOLO 1 CONTESTO ENERGETICO

### 1.1. Evoluzione temporale del consumo energetico mondiale

I metodi di produzione di energia si sono evoluti nei secoli grazie al progresso tecnologico - scientifico giungendo all'impiego del carbon fossile e del petrolio in seguito alla rivoluzione industriale, ancora oggi principali fonti di energia.

Nel corso dell'ultimo secolo, i processi di produzione e consumo di energia hanno subito un notevole incremento, con un conseguenziale depauperamento delle risorse del pianeta e implicazioni ambientali non indifferenti.

L'IEA, International Energy Agency, che offre informazioni statistiche sul mercato internazionale dei vari settori energetici, ha evidenziato (Figura 1.1) nella sua recente pubblicazione "Key world Energy Statistics 2012" che dal 1973 al 2010 la produzione mondiale di energia primaria è raddoppiata, passando da 6107 Mtoe (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio) a 12717 Mtoe, di cui mediamente il 80% si fonda sui combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturale), mentre le energie rinnovabili continuano a rivestire un ruolo marginale [1].

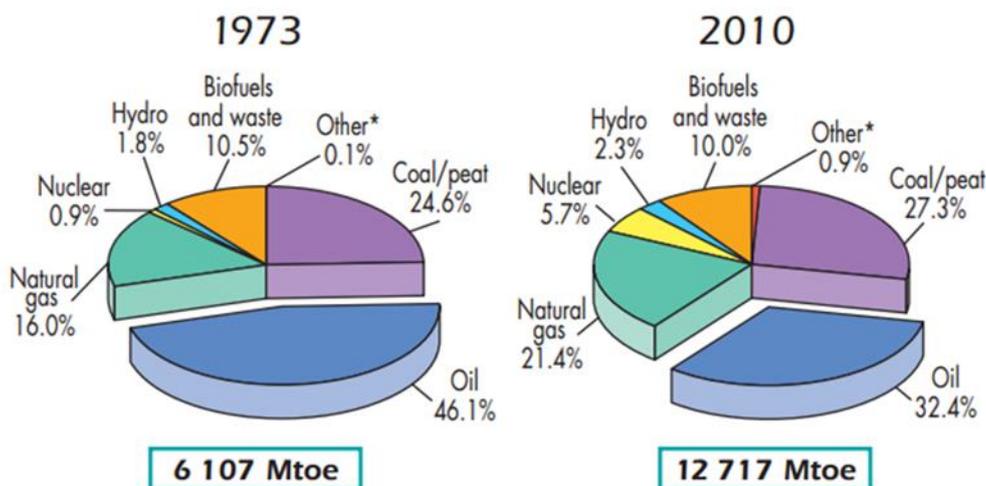


Figura 1.1 - Produzione mondiale di energia primaria in percentuale del 1973 e del 2010, Mtoe (Other include geothermal, solar, wind, heat, etc.)[1]

Nella Figura 1. 2 ed Figura 1. 3a, invece, si riporta, l'evoluzione della produzione primaria e del consumo finale di energia durante dell'arco temporale 1971-2010.

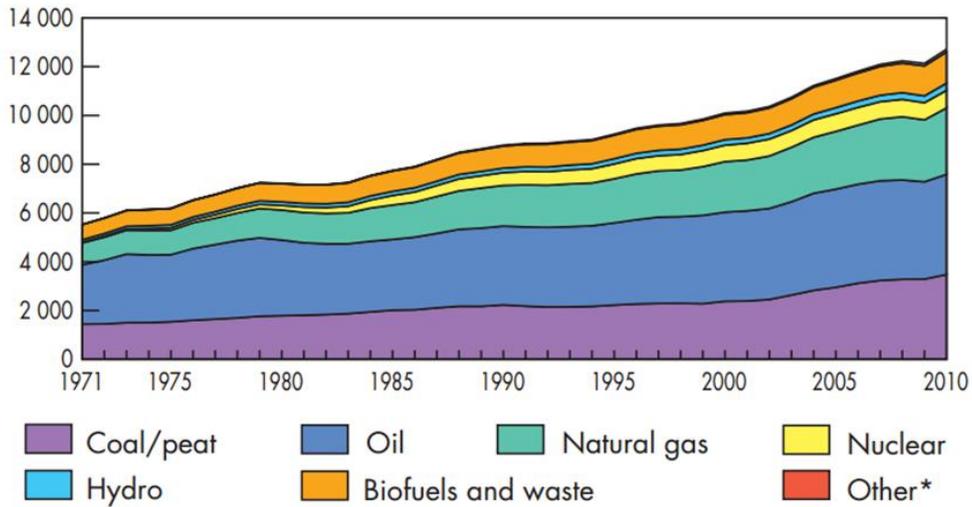


Figura 1. 2 - Evoluzione della produzione di energia primaria dal 1971 al 2010, Mtoe (Other include geothermal, solar, wind, heat, etc.)[1]

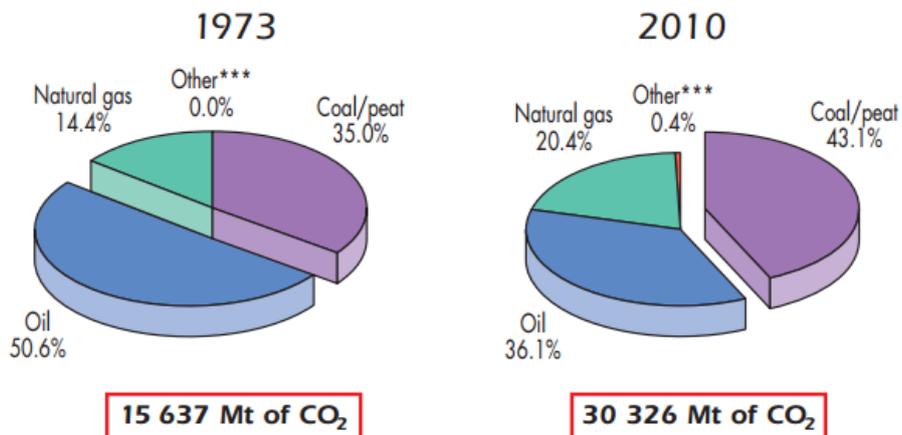
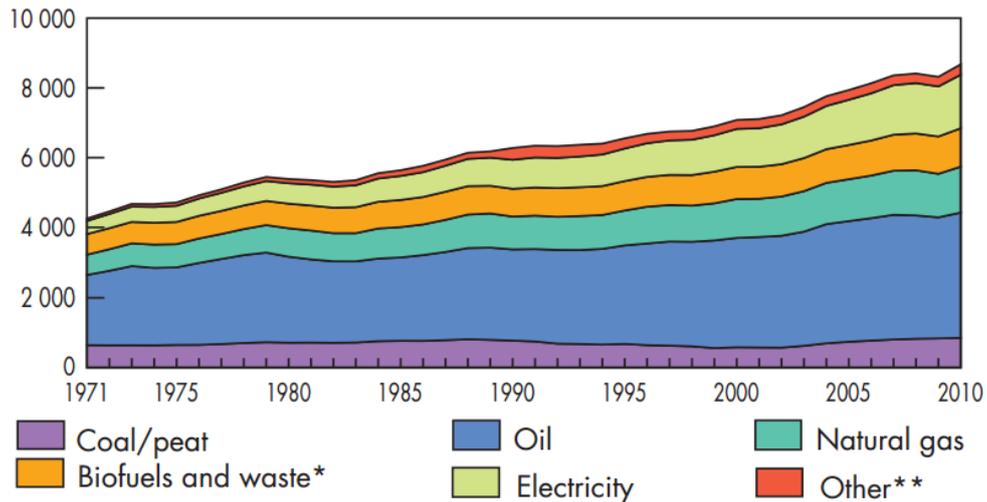


Figura 1. 3 - a) Evoluzione del consumo finale di energia dal 1971 al 2010, Mtoe; b) CO<sub>2</sub> emissions fuel shares [1] (\*\*/\*\*Other include geothermal, solar, wind, heat, etc.)

Dallo scenario energetico sopra illustrato si evince una persistente egemonia dei combustibili fossili e da un'analisi più specifica, risulta che:

- Il petrolio risulta essere la fonte principalmente adoperata, costituendo il 32.4% dell' offerta primaria, nonostante una riduzione di più di 10 punti percentuali dal 1971.
- Il consumo di elettricità ha registrato un incremento notevole e una tendenza alla crescita nel prossimo futuro
- L'offerta primaria di carbone ha nell'ultimo decennio una forbice importante nello scenario mondiale. In quanto risulta essere la fonte primaria di approvvigionamento Cinese con circa il 52% dell'offerta primaria soddisfatta dal carbone [1]. A conferma della riscoperta di questo combustibile, il Rapporto di Energia e Ambiente 2009-2010 ha evidenziato come lo stesso carbone rappresenta quasi il 50% dell'incremento della offerta globale di energia primaria per fonte tra il 2000 e il 2010 [2], nota dolente le emissioni di CO<sub>2</sub>. Infatti, il carbone è la prima causa di emissioni con uno share del 43.1% (Figura 1. 3 b), conseguentemente la Cina, maggior consumatrice, con quasi il 24% predomina lo scenario mondiale, non di meno gli USA con quasi il 18% [1].

Nel dettaglio, come mostrato in Figura 1. 4, si può asserire che oggi la Cina è responsabile di una larga fetta di consumo di energia.

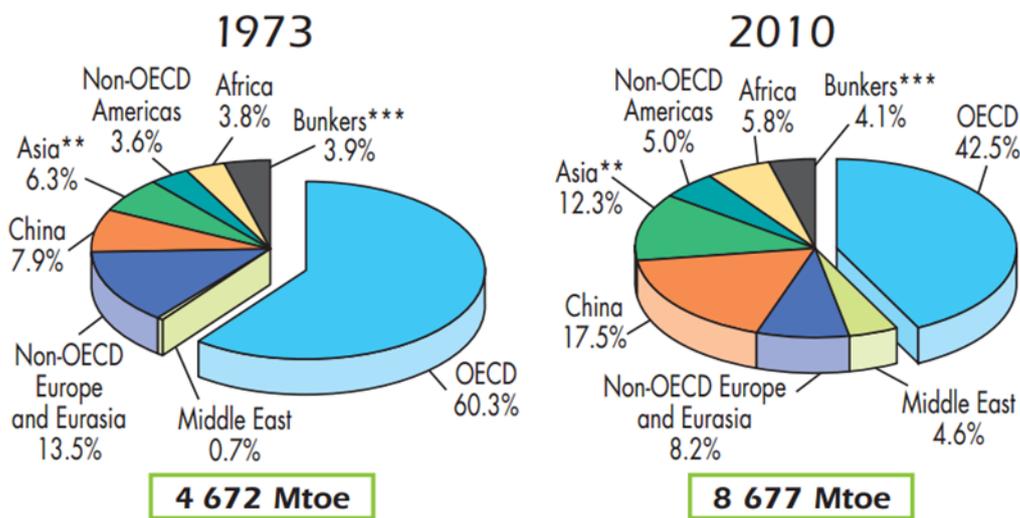


Figura 1. 4 - Consumo energetico totale finale per paese del 1973 e del 2010, Mtoe (\*\*Asia escludendo China; \*\*\* include international aviation and international marine bunkers) [1]

Il consumo di petrolio nel 2010 è stato pari a 87,4 mb/d ed è cresciuto di 2,7 mb/d dal 2009, con un contributo del 31% proveniente dalle regioni dell'Asia e del Pacifico [1].

Il consumo mondiale di carbone nel 2010 è stato pari a 3.556 Mtep, aumentando del 7,6% dal 2009 e rappresentando la crescita più veloce dal 2003. Aumenti sono stati registrati in tutte le regioni; in minima parte in Africa e nel Medio-Oriente circa l'1%. Il maggior consumatore risulta essere la Cina con circa il 48% del consumo globale di carbone (Figura 1. 5) [2].

Il gas naturale è ad oggi il combustibile fossile con la maggiore attrattività, per le sue potenzialità in merito a sicurezza energetica e ridotto impatto ambientale. Negli ultimi anni la richiesta è cresciuta soprattutto a causa dei prezzi più bassi rispetto al petrolio e al carbone, delle politiche di supporto in Cina e dell'allontanamento di alcuni Paesi dai programmi nucleari in seguito all'incidente di Fukushima nel 2011. Il consumo di gas naturale nel 2010 è stato di 2.858 Mtep ed è cresciuto del 7,4% dal 2009. I consumi maggiori sono stati registrati in Europa ed Eurasia (27%) e nel Nord America (36%) [1].

Nella Figura 1. 5 ed Figura 1. 6 è rappresentato un quadro sintetico del consumo energetico primario e finale per paese, sulla base dei dati presentati dall'ENEA.

In sintesi è emerso che i paesi Non OECD<sup>1</sup> hanno subito un calo della domanda, riflesso della debolezza economica; mentre i paesi in via di sviluppo, tra i quali la Cina, sono i fase di espansione risultando i principali responsabili dell'aumento di consumo di energia anche nelle previsioni future.

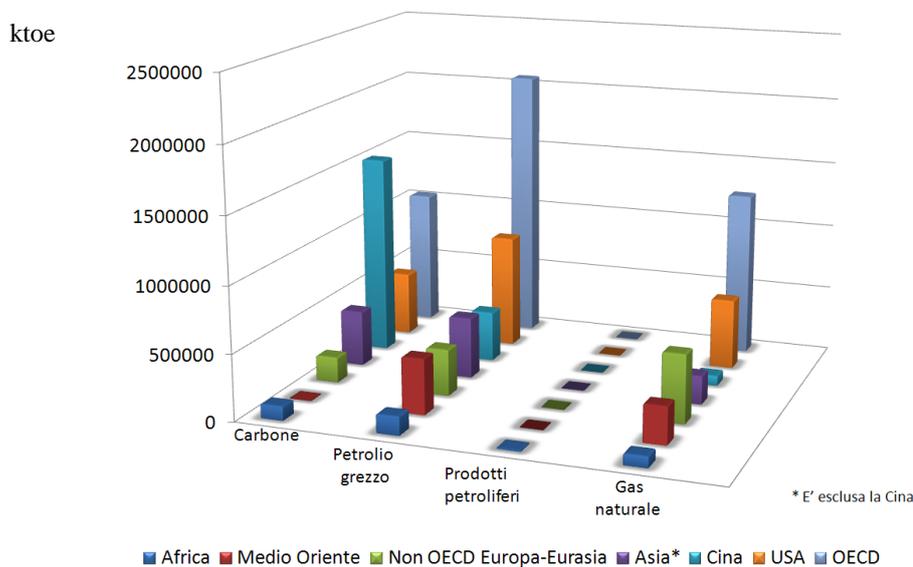


Figura 1. 5 - Energia primaria mondiale , dati ENEA, 2009 [2], valutata in migliaia di tonnellate equivalenti di petrolio (ktOE)

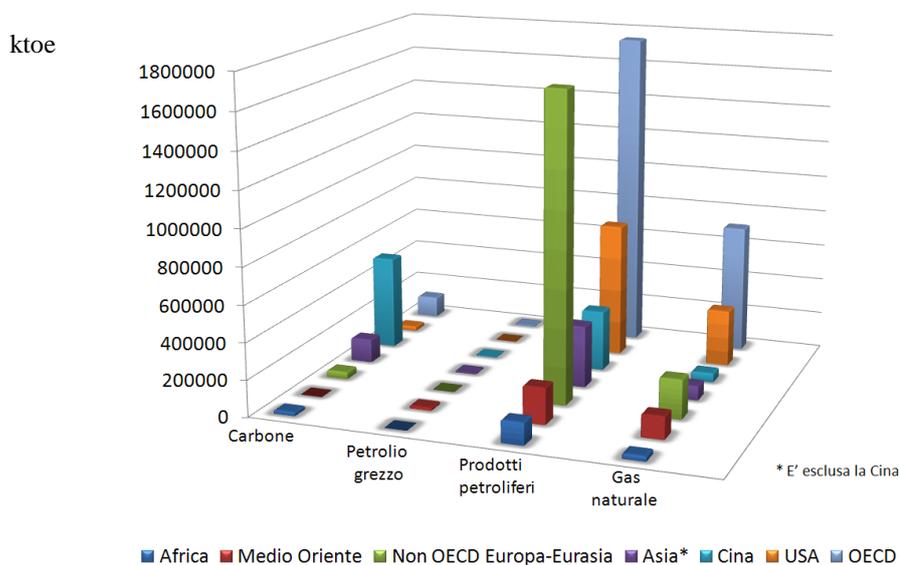


Figura 1. 6 - Consumo finale di energia mondiale, dati ENEA, 2009 [2], valutata in migliaia di tonnellate equivalenti di petrolio (ktOE)

<sup>1</sup> OECD è acronimo di Organization for economic Cooperation and Development

La Figura 1. 5 enfatizza che l'energia primaria, per quanto concerne petrolio e gas naturale, risulta essere concentrata prevalentemente nei paesi OECD, di cui una ingente quota parte corrisponde solo agli Stati Uniti, mentre il carbone rappresenta la risorsa preminente della Cina.

Il consumo di energia finale, il consumo di prodotti petroliferi si concentra maggiormente nei Paesi OECD e Non OECD Europa-Eurasia, nei quali si riespongono gli Stati Uniti con quote rilevanti.

L'entità del consumo energetico risulta quindi influenzato da fattori quali:

- *aspetto demografico mondiale*, il cui incremento comporta una crescita predominante dei consumi energetici globali e rende sempre più complesso ed arduo il problema del reperimento delle risorse energetiche necessarie all'umanità. L'incremento energetico derivante risulta, tuttavia, differenziato da un paese all'altro in funzione del tenore di vita dei singoli contesti. Attualmente gli Stati Uniti, seppur rappresentando solo il 4,6% della popolazione, consumano in un anno il 23% di tutta l'energia consumata dal globo terrestre. Da questo dato ne discende che in futuro, qualora la popolazione della Cina raggiungesse i consumi pro-capite statunitensi, il consumo mondiale di energia raddoppierebbe; tuttavia alcuni studi mostrano una correlazione inversa tra consumo pro-capite di energia e crescita demografica: miglioramenti degli standard di vita, aspettativa di vita più lunga, nuove opportunità di lavoro e benessere, e quindi consumi pro capite di energia, si contrappongono a tassi di crescita bassi o nulli [3].
- *Fattori geopolitici*, predominanti sull'andamento dei consumi energetici mondiali: l'energia rappresenta non solo una importante risorsa per le economie del pianeta, ma anche un elemento di potere e controllo politico di chi gestisce le fonti di approvvigionamento e le vie di transito delle stesse. La concentrazione di risorse fossili nelle mani di pochi determina per tali paesi la possibilità di esercitare forti pressioni dirette e indirette sulla grande maggioranza delle economie avanzate che, ad eccezione di alcuni clamorosi esempi come gli Stati Uniti, sono caratterizzate da una quasi totale assenza di risorse fossili e quindi dipendenza dagli approvvigionamenti esteri [3].
- *relazione tra Prodotto interno Lordo (PIL), consumo di energia e crescita demografica*: il consumo energetico, in generale, si considera crescente con il PIL, poiché un aumento del prodotto interno lordo risulta essere emblema di un aumento di produzione e consumo energetico; tuttavia non esiste tra i due fattori un legame di proporzionalità, così come non si può asserire con chiarezza il rapporto tra PIL e demografia, in quanto occorre considerare l'influenza di fattori aggiuntivi quali il grado di efficienza energetica, il livello di industrializzazione e sviluppo, consumo procapite, diversificati da paese a paese [3].
- *Fattori ambientali*: cambiamenti climatici comportano una variazione della domanda di energia.
- *Fattori Tecnologici*: la ricerca tecnico-scientifica ha determinato un progressivo miglioramento in termini di efficienza; gli investimenti in questo settore apportano vantaggi sul lungo termine; tuttavia dipende dai governi sostenere politiche sostenenti tali innovazioni.

## **1.2 Consumo energetico in Europa e Italia**

Nel contesto mondiale appena delineato, la posizione dell'Europa merita una riflessione, in quanto rappresenta un importante attore del mercato mondiale dell'energia, sia in virtù dei suoi elevati consumi, sia delle punte di eccellenza raggiunte in vari ambiti della produzione, da alcune rinnovabili al nucleare. In Europa, infatti, a fronte di una popolazione pari al 7% di quella mondiale, si registra il 15% dei consumi finali totali di energia.

Attualmente in Europa l'80% delle fonti prevalenti sono rappresentate dai combustibili fossili, mentre il 95% in Italia.

- L'unione Europea dipende dall'estero per importazione di energia primaria per circa il 50% del suo fabbisogno e tale dipendenza aumenterà del 30% al 2030; questa dipendenza tuttavia è meno problematica per la generazione elettrica dato il largo ricorso all'energia nucleare di molti paesi; in Francia l'80% di elettricità è di produzione nucleare.
- All'interno dell'Unione Europea i singoli stati si muovono ancora secondo logiche proprie di mercato, sub-ottimali rispetto al risultato finale di efficienza e competitività.

Tuttavia, tali criticità non devono impedire il raggiungimento di alcuni obiettivi di politica energetica, stabiliti dal Consiglio Europeo del 2007[4]:

- Riduzione del 20% delle emissioni di gas-serra;
- Aumento del 20% dell'efficienza energetica;
- Aumento di 20% di fonti rinnovabili per la generazione elettrica.

L'Italia è responsabile del 12% dell'energia consumata in Europa, con una popolazione pari al 13% di quella europea. La situazione energetica italiana nel corso del 2010, secondo i dati del Ministero dello Sviluppo Economico [5], esprime una domanda di energia primaria che si attesta sui 187,8 Mtoe, aumentando del 4,1% rispetto al 2009. In particolare, si è registrato un incremento significativo per quanto riguarda i combustibili solidi (+14,2%), le rinnovabili (+13,3%) e il gas (+6,5%); si è registrata, invece, una contrazione del petrolio (-1,5%) e delle importazioni nette di energia elettrica (-1,8%). L'aumento della domanda di energia primaria evidenzia un'inversione del trend di riduzione dei consumi primari registratosi nei precedenti quattro anni, anche se il valore del 2010 è ben lontano dal massimo di 197,8 Mtoe raggiunto nel 2005. Le criticità italiane consistono nell'elevato ricorso a petrolio e gas (oltre l'83%), all'import strutturale di elettricità (intorno al 5% negli ultimi anni), al ridotto contributo dei combustibili solidi e al mancato ricorso al nucleare. Rispetto al 2009 si conferma la tendenza di riduzione del ricorso al petrolio (-1,9%), che pure rimane la fonte più utilizzata, a favore del gas (+0,8%) e l'aumento del peso delle rinnovabili (+1%). Queste hanno conseguito, soprattutto negli ultimi tre anni, un'accelerazione notevole. A seguito di recenti scoperte e rivalutazioni della consistenza dei giacimenti di idrocarburi in Italia, l'offerta interna di petrolio e gas dovrebbe aumentare nei prossimi anni con un aumento di produzione di quasi il 50%, contrastando il declino rilevato nell'ultimo decennio. Tali prospettive sembrano in parte legate al mutamento di atteggiamenti a livello locale sullo sfruttamento di queste risorse.

### 1.2.1 Consumi energetici in Italia

In un'attività finalizzata al risparmio energetico è fondamentale individuare i principali consumi per i diversi settori.

Dall'analisi dei dati statistici riportati dall'IEA [1], emerge palesemente che i prodotti petroliferi rappresentano la risorsa energetica più utilizzata al mondo, come in Italia, specialmente nel settore dei trasporti, seguita dal gas naturale, il cui maggior consumatore è il l'ambito residenziale. I dati rilasciati dall'ENEA sul consumo energetico italiano sono stati elaborati e schematizzati nell'istogramma della Figura 1. 7

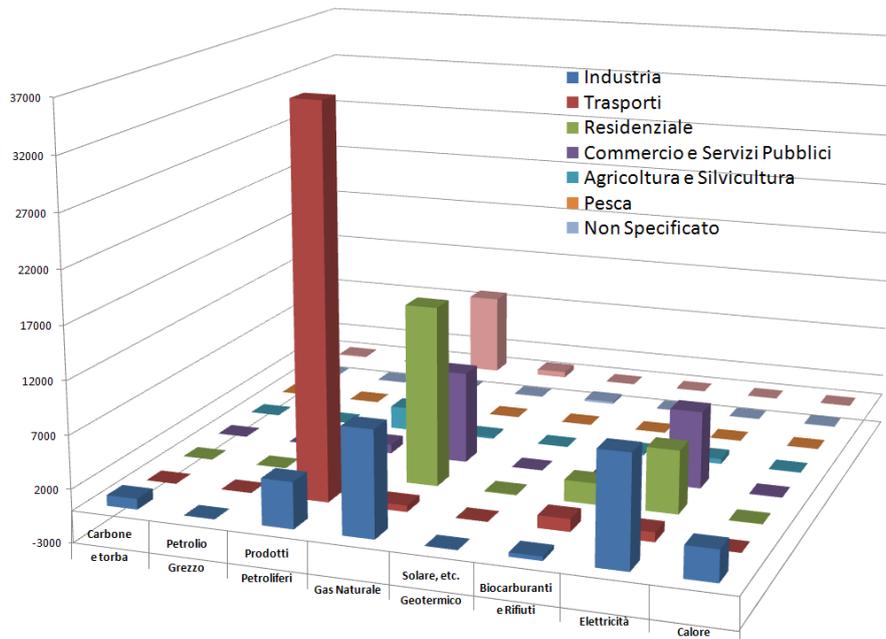


Figura 1. 7- Consumo energetico italiano nei differenti settori, 2009 [2], valutata in migliaia di tonnellate equivalenti di petrolio (ktoe)

Anche il Ministero dello Sviluppo Economico descrive annualmente lo scenario energetico del nostro paese attraverso il Bilancio Energetico Nazionale. Da tali studi è possibile analizzare l'andamento nell'ultimo decennio dei principali settori incidenti sul consumo finale di energia, ossia industria, trasporti, civile.

Il settore industriale, ha subito dal 2004 una sensibile riduzione di consumi; tale flessione risulta significativa nel 2009 con un calo del 20% rispetto all'anno precedente. In Italia, infatti, a causa della crisi finanziaria mondiale, si è verificata una netta caduta della domanda energetica a seguito della sospensione della produzione in molti impianti, specialmente nei settori ad alta intensità energetica. Tutti i sotto settori industriali hanno registrato, rispetto al 2008, riduzioni superiori al 10%. Quelli che hanno risentito maggiormente della crisi sono stati il metallurgico (-28,7%), la meccanica (-19,7%), il tessile (-19,6%) e il settore minerario non metallifero (-17,7%). Una piccola ripresa si è registrata nel 2010 con +5,5% [5].

Una simile decrescita è stata percepita anche dal settore dei trasporti, in particolar modo tra il biennio 2008-2009, imputabile all'aumento del prezzo del petrolio. In particolare si è registrata una riduzione del 4,7% dovuta al calo di consumi di benzina e gasolio, a fronte di una crescita del GPL e del gas naturale. Nonostante l'Italia presenti un elevato numero di vetture pro-capite, il consumo energetico unitario, nel 2007, è risultato inferiore del 17,5% rispetto alla media europea [5].

Un andamento differente caratterizza, invece, il settore civile che ha registrato negli ultimi dieci anni un incremento di consumi del 21,5%; La principale fonte energetica utilizzata, il gas naturale, ha registrato un aumento del 5,0%; la legna +8% e l'energia elettrica +0,8%, mentre le altre fonti energetiche hanno subito una riduzione. I consumi, dopo la contrazione verificatasi nel periodo 2005-2007, sono tornati a salire negli ultimi due anni, favoriti anche dal maggior utilizzo di gas naturale, che nel 2009 risulta costituire quasi il 55% del consumo totale di energia primaria. Il grafico successivo mostra la ripartizione percentuale del consumo di energia in funzione dei principali settori di consumo. Oggi il settore civile si maggior produttore consumatore finale di energia 36% [5].

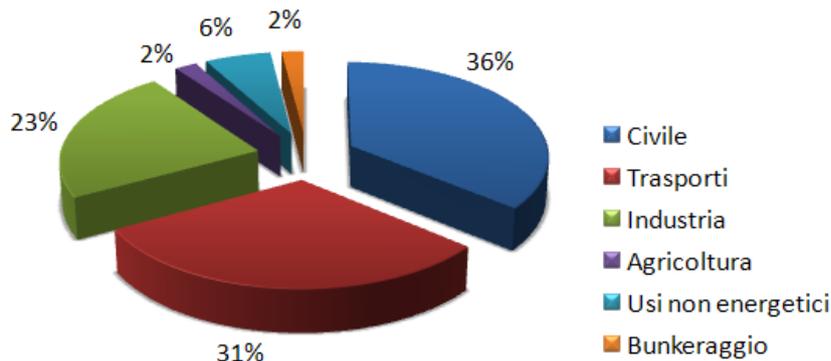


Figura 1. 8 - Impieghi finali di energia per settore, 2010, ENEA [2]

### 1.2.2 Il consumo energetico nel settore edilizio

Alla luce di tale analisi, considerando il notevole impatto ambientale che il settore civile provoca, sia in termini di inquinamento che di sfruttamento di risorse, risulta necessario riorganizzare le strategie di sviluppo per una migliore qualità ambientale e maggior risparmio energetico. In particolare è al settore residenziale che va ascritta la principale responsabilità di consumo energetico. Secondo le più recenti statistiche, infatti, il settore abitativo assorbe oltre il 30% dei consumi energetici nazionali, percentuale costante in Italia come in Europa e nel resto del mondo, contribuendo per il 25% alle emissioni nazionali di anidride carbonica e favorendo, di conseguenza, il fenomeno effetto-serra [2]. Al fine di contenere tali consumi è necessario identificare, innanzitutto, le cause principali, legate alla necessità imprescindibile di garantire il corretto funzionamento del sistema edificio-impianto garantendo una condizione di comfort agli utenti. Nella fattispecie si definiscono due tipologie di fabbisogni:

1. fabbisogno termico, dettato dalla necessità di condizionare gli ambienti abitativi e produrre acqua calda sanitaria;
2. fabbisogno elettrico, legato principalmente agli usi forzati e all'alimentazione di utenze di condizionamento.

Di seguito sono riportate le percentuali di consumo energetico nel settore edilizio italiano, attraverso le quali si individua nel riscaldamento la causa preminente di consumo; come rileva l'ENEA, nel quadro descritto nel 2005, circa 18,6 Mtoe, su 27,5 Mtoe di consumo complessivo, sono stati utilizzati dalle famiglie italiane per riscaldare l'abitazione.

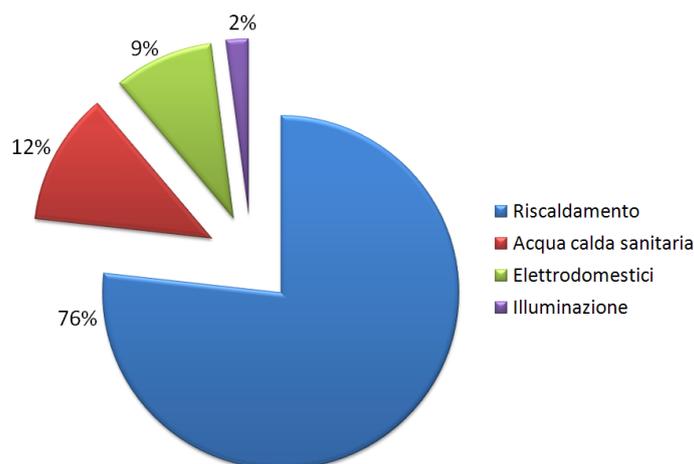


Figura 1. 9 - Consumo energetico nel settore edilizio italiano, 2010, ENEA [2]

Il combustibile più utilizzato, in tale ambito, è senza dubbio il gas, seguito dal gasolio (Figura 1. 10). Il peso del riscaldamento sulla bolletta energetica delle famiglie aumenta se si considera anche il riscaldamento dell'acqua sanitaria, il quale pesa per ulteriori 3,4 Mtoe sulla spesa. Anche in questo caso il combustibile più utilizzato è il gas. Complessivamente, il riscaldamento della casa e dell'acqua calda delle famiglie italiane equivalgono ad un consumo annuale di 22 Mtoe su 27,5 Mtoe, di cui 14,4 Mtoe derivanti dall'utilizzo del gas metano e 1,0 Mtoe dal GPL (Gas Petroleum Liquido). La seconda voce di spesa delle famiglie è associata all'utilizzo dell'energia elettrica per l'illuminazione e il funzionamento degli apparecchi elettrici di casa. Ogni anno gli italiani consumano circa 3,8 Mtoe (al 100% sotto forma di elettricità) su un totale di 27,5 Mtoe. La terza ed ultima spesa in energia riguarda, infine, la cucina. Circa 1,7 Mtoe annuali sono consumati per cucinare. Il combustibile più utilizzato è ancora una volta il gas con 1,5 su 1,7 Mtoe (di cui 1,1 Mtoe in gas metano e 0,4 Mtoe in gas Gpl). Come si può facilmente capire osservando la tabella seguente e il grafico sopra mostrato, oltre l'80% del consumo annuale di energia delle abitazioni italiane verte sul riscaldamento domestico e sul riscaldamento dell'acqua calda. Il 72% del consumo totale deriva dall'utilizzo di gas metano o Gpl. Il consumo di elettricità è invece limitato al 18%. Da questo si comprende l'importanza dell'efficienza del riscaldamento di casa nell'economia domestica.

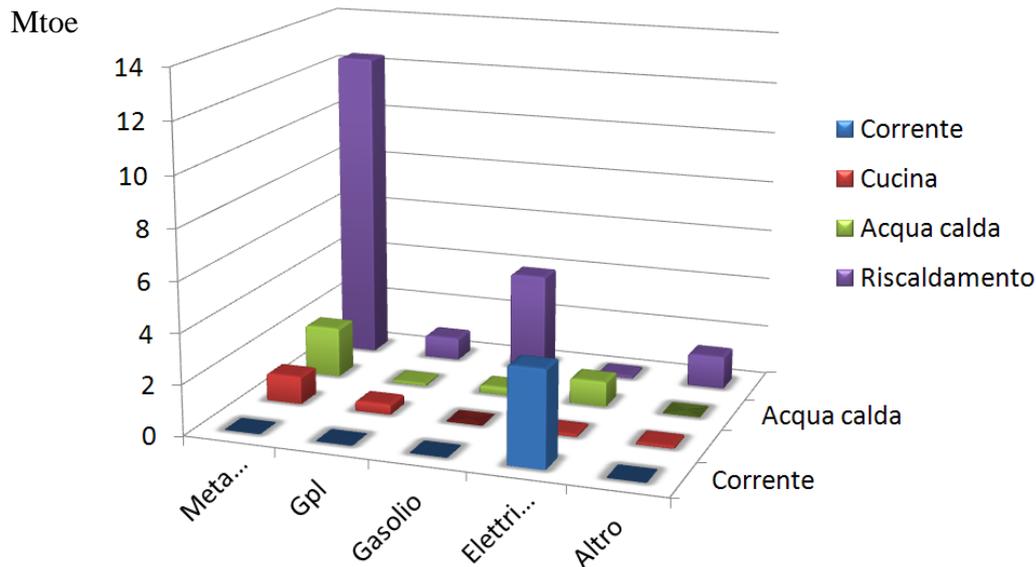


Figura 1. 10 - Consumi di energia nelle abitazioni in Italia, ENEA, 2005 [2], valutata in un milione di tonnellate equivalenti di petrolio (Mtoe)

Per tali motivazioni gli obiettivi prefissati in ambito italiano ed europeo prevedono:

- Realizzare edifici energeticamente sostenibili rendendo riconoscibile la qualità ed il comfort dell'ambiente costruito;
- Adottare parametri energetici nelle costruzioni civili ed industriali;
- Sostenere l'innovazione tecnologica nei materiali per l'edilizia, verso soluzioni ad elevata prestazione energetica, che consentano una riduzione delle spese di riscaldamento e condizionamento;
- Realizzare nel settore residenziale un mix energetico compatibile con la salvaguardia ambientale (limitazione dell'impiego delle fonti fossili ed incremento dell'impiego di fonti rinnovabili). La cospicua domanda energetica residenziale, per quanto concerne il riscaldamento, è frutto dell'alto grado di dispersione termica invernale ed estiva di tutto l'involucro edilizio, derivante da vari fattori quali: forma dell'edificio, localizzazione geografica ed esposizione dei venti, tecniche di manutenzione, uso degli spazi, prestazioni dei materiali adoperati e tipi di rivestimento. Il calore, infatti, migra in modo spontaneo dall'elemento a temperatura superiore verso quello a temperatura inferiore. In inverno il calore fornito negli ambienti si disperde verso l'esterno; in estate invece il calore dall'esterno entra nell'interno degli edifici. Traducendo i consumi in emissioni di anidride carbonica, la Figura 1. 11 mostra la collocazione del settore civile all'interno dei cinque macro settori di consumo di risorse primarie.

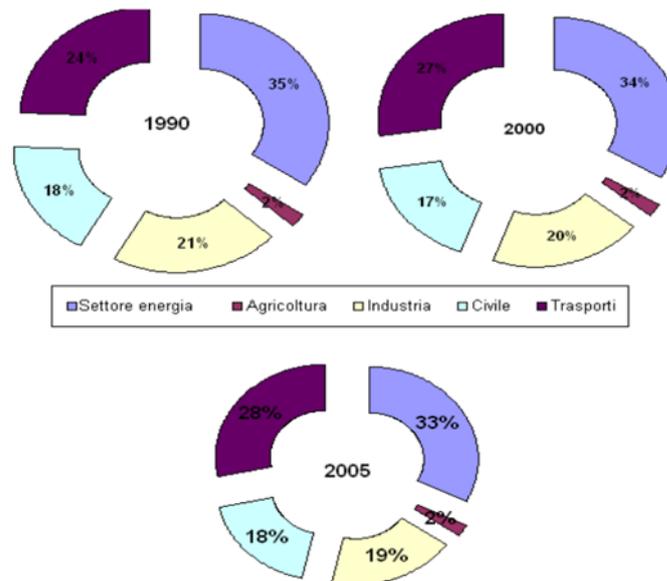


Figura 1. 11 – Distribuzione percentuale delle emissioni di CO<sub>2</sub> dei settori, civile, industriale, settore energia, trasporti, agricoltura in Italia, [10]

Il settore civile partecipa allo scenario nazionale delle emissioni dirette di CO<sub>2</sub> con il 18%, del quale il 74% proviene dal settore residenziale (Figura 1. 12).

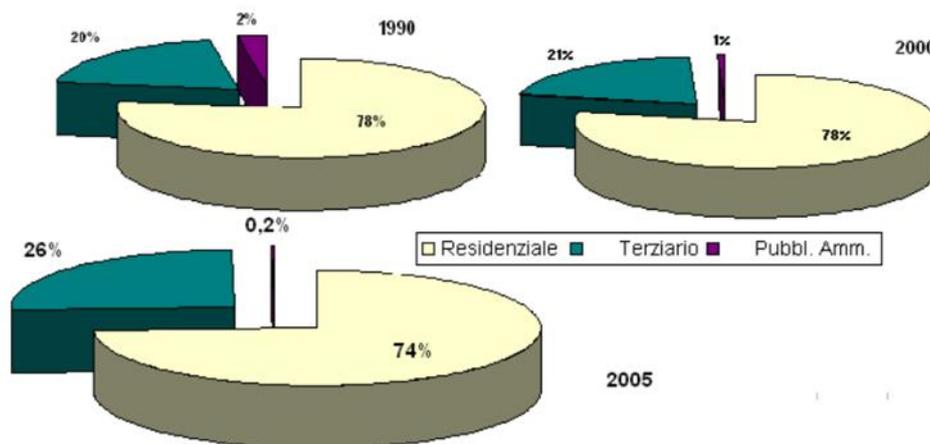


Figura 1. 12 – Distribuzione percentuale delle emissioni di CO<sub>2</sub> nel settore civile in Italia, [10]

Considerando le emissioni legate al settore residenziale, a differenza delle emissioni dirette questo punto di vista ingloba anche le emissioni legate al consumo di energia elettrica, si nota come (Figura 1. 13) sia il riscaldamento, quota metano, che il consumo di energia elettrica sono i maggior responsabili delle emissioni in questo settore, pertanto quelli da aggredire con misure volte al risparmio energetico e all’abbattimento delle emissioni.

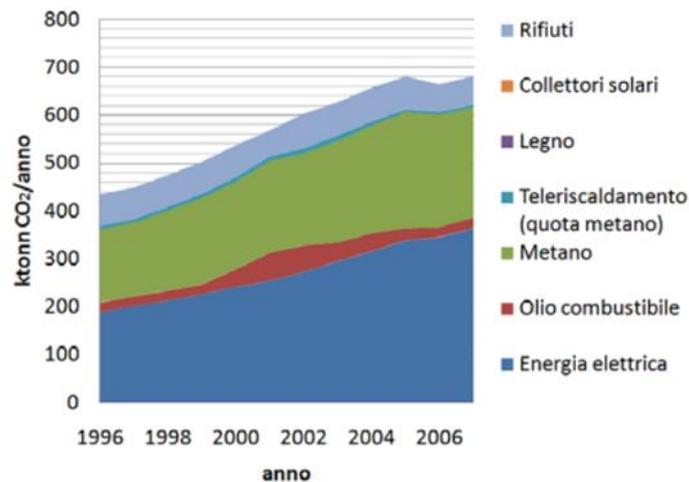


Figura 1. 13– Distribuzione percentuale delle emissioni di CO<sub>2</sub> nel settore civile in Italia, [11]

Concludendo la funzione dell'involucro edilizio è proprio quella di contrastare il flusso di calore uscente dall'edificio, mentre, dall'altro lato, l'impianto deve garantire l'energia necessaria consumando lo stretto necessario in termini di carburante.

Dall'analisi svolta si può asserire che al fine di ottenere un consistente risparmio energetico è necessario intervenire sia sull'involucro edilizio che sull'impianto termico di generazione favorendo l'utilizzo delle risorse rinnovabili. 1.3 Quadro normativo generale

### **1.3. Conferenze internazionali**

Essendo chiaro il coinvolgimento planetario nella compromissione del rapporto uomo-natura, è stato necessario affrontare il problema attraverso conferenze internazionali. Lo scopo di questi incontri non è risolvere il problema nell'immediato, bensì sensibilizzare le nazioni e con esse tutta la popolazione mondiale, sulle conseguenze di politiche irrazionali e poco lungimiranti, promuovendo iniziative concrete e innovative che favoriscano un risparmio sulle risorse disponibili. Il problema fu trattato per la prima volta nel 1987 con il rapporto di Brundtland in cui emerge il concetto di "sviluppo sostenibile" basato sull'idea che bisogna dar vita ad una forma di sviluppo che non comprometta la possibilità delle generazioni future di soddisfare le proprie esigenze di godimento delle risorse naturali. In tale definizione, come è possibile notare, non sono ancora presenti interventi diretti e iniziative, ma ci si riferisce al benessere delle persone, e quindi anche alla qualità ambientale da un punto di vista etico [7].

I primi obiettivi concreti e le strategie di sviluppo per la società del XXI secolo, specificatamente in campo edilizio, furono presentate nella Conferenza "Ambiente e Sviluppo" di Rio de Janeiro nel 1992. In tale Summit internazionale si specificava la necessità di perseguire uno "sviluppo ecologicamente sostenibile e socialmente equilibrato", introducendo per la prima volta una sfumatura di tipo sociale che mirava ad un uso razionale delle risorse non solo per la sopravvivenza delle generazioni future, come si dichiarava in Brundtland, ma per attenuare gli squilibri dell'ecosistema derivanti. Dalla conferenza di Rio nacquero diversi documenti ufficiali:

- *Agenda 21*: un programma avviato dall'Onu, dedicato allo sviluppo sostenibile, consistente nella pianificazione completa delle azioni da intraprendere, a tutti i livelli di governo e di

amministrazione del territorio, da quello mondiale a quello comunale in ogni area e in ogni attività in cui la presenza umana costituisce impatti sull'ambiente, da attuarsi nel corso del XXI secolo, allora appena iniziato.

- *Carta di Aalborg*: approvata dai partecipanti alla conferenza europea sulle città sostenibili, e stipulata ad Aalborg, in Danimarca, nel Maggio 1994, si poneva come atto rappresentativo dell'impegno delle amministrazioni locali europee ad attuare l'Agenda21 a livello locale e a elaborare piani d'azione a lungo termine per uno sviluppo durevole e sostenibile, nonché ad avviare la campagna per uno sviluppo durevole e sostenibile delle città europee.
- *Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UN-FCCC)*: elaborata nel Maggio del 1992 a New York, presentata e approvata nel corso dell' Earth Summit di Rio de Janeiro, firmata da 154 Nazioni, operativa dal 1994 e ratificata dall'Italia con la Legge del 15 gennaio 1994, n.65; essa sanciva una serie di obblighi, differenziati a seconda del grado di industrializzazione dei Paesi contraenti, al fine di contenere le emissioni di gas serra entro un certo limite per non sconvolgere definitivamente e irreparabilmente il già delicato equilibrio climatico del pianeta. Si fondava su due principi fondamentali: il principio di equità e il principio di precauzione. Il principio di equità consisteva nel prevedere, per i vari paesi, responsabilità comuni, ma differenziate a seconda delle condizioni di sviluppo, di intervento e di capacità di perturbazione del clima. Il principio di precauzione affermava che l'incertezza delle conoscenze scientifiche non poteva rappresentare una giustificazione per i mancati necessari ad evitare la possibilità di danni seri ed irreversibili [7]. Al fine di monitorare i progressi raggiunti, venne altresì istituita la Conferenza delle Parti, organo supremo decisionale con il compito di controllare l'effettivo svolgimento delle azioni per il raggiungimento degli obiettivi posti dall'UNFCCC, da convocare con cadenza annuale. Già dalla prima Cop (1995) si evidenziò la necessità di stabilire precisi limiti temporali al raggiungimento dei risultati prefissati dalla Convenzione e a tal fine veniva predisposto un protocollo da firmare entro il 1997: il Protocollo di Kyoto.

*Il Protocollo di Kyoto* fu sottoscritto nella città giapponese, nel Dicembre del 1997, da più di 160 paesi ed entrò in vigore nel Febbraio del 2005 dopo la ratifica della Russia. Primo documento concreto ed esecutivo di realizzazione internazionale delle politiche energetiche e dei modelli sociali e politici degli anni futuri, tale protocollo imponeva ai paesi sviluppati OCSE ed Est europei di operare una riduzione media annua delle emissioni antropogeniche di gas capaci di alterare l'effetto serra naturale del nostro pianeta, rispetto al 1990, del 5,2% entro il 2008-2012. La riduzione complessiva risultava differenziata per paese, secondo il principio di equità: USA -7%, Unione Europea -8% di cui Italia -6,5%, Giappone e Canada -6%; ai paesi in via di sviluppo, quali Cina, India, Messico, Brasile, Corea del Sud, invece, non era assegnato alcun obbligo di riduzione [7]. Affinché il protocollo potesse entrare in vigore e divenire vincolante, l'art. 25 del protocollo stesso richiedeva che venisse ratificato da almeno 55 Paesi firmatari della Convenzione quadro sui cambiamenti climatici responsabili di almeno il 55% delle emissioni di CO<sub>2</sub> nel 1990. Alla fine di ottobre del 2008 il Protocollo di Kyoto è stato ratificato da 183 Paesi responsabili del 63,7% delle emissioni globali di CO<sub>2</sub>. L'Italia, responsabile del 3,1% delle emissioni, ha ratificato il protocollo in data 31 maggio 2002. Gli Stati Uniti responsabili del 36% delle emissioni, pur avendo sottoscritto e ratificato la Convenzione sui cambiamenti Climatici nel 1992 e sottoscritto il Protocollo in data 12 novembre 1998, è l'unico Paese a non averlo ancora ratificato. I motivi della mancata ratifica derivano dal fatto che il Protocollo non prevede alcun limite di emissione per Paesi

in via di sviluppo quali l'India e la Cina che, ad oggi, sono tra i principali responsabili delle emissioni globali di gas-serra, pur registrando bassi valori di emissione pro-capite.

### 1.3.1 Normative comunitarie [8]

La risposta europea alle conferenze sopra descritte, è costituita dalla promulgazione di risoluzioni, direttive e decisioni che gli Stati membri devono recepire, dando vita ad una politica energetica comune a tutti gli Stati del vecchio continente, finalizzata al risparmio energetico e allo sviluppo del mercato delle energie rinnovabili. Tuttavia, il recepimento delle direttive comunitarie può risultare differente da Stato in Stato in funzione delle proprie normative ed esigenze.

I principali provvedimenti che documentano l'impegno europeo in materia di risparmio energetico sono di seguito riportati:

- *Risoluzione del 15 Gennaio 1985;*
- *Risoluzione del Consiglio del 15 Marzo 1985;*
- *Direttiva del Consiglio del 21 Dicembre 1988;*
- *Decisione del Consiglio del 29 Ottobre 1991;*
- *Decisione del Consiglio del 21 Maggio 1992;*
- *Direttiva 93/76/CEE del Consiglio del 13 Settembre 1993;*
- *Programma europeo per il cambiamento climatico (ECCP), Marzo 2000;*
- *Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 Dicembre 2002;*
- *Direttiva 2005/32/CE ;*
- *Direttiva 2006/32 CE;*
- *Libro verde sull'energia, 8 Marzo 2006;*
- *Pacchetto Energia', 10 Gennaio 2007;*
- *Direttiva del 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio, 19 Maggio 2010;*
- *Regolamento delegato (UE) n. 244/2012 della Commissione, del 16 gennaio 2012.*

*Risoluzione del 15 Gennaio 1985:* la risoluzione è relativa al miglioramento dei programmi di risparmio energetico degli Stati membri, a cui viene consigliato di proseguire e potenziare le azioni volte a promuovere un uso più razionale dell'energia mediante l'elaborazione di politiche integrate di risparmio.

*Risoluzione del Consiglio del 15 Marzo 1985:* risoluzione per l'uso razionale dell'energia nel settore delle costruzioni (85/C78/01).

*Direttiva del Consiglio del 21 Dicembre 1988:* individua sei requisiti essenziali a cui devono essere conformi le opere di costruzione:

1. Resistenza meccanica e stabilità;
2. Sicurezza in caso di incendio;
3. Igiene, salute e ambiente;
4. Sicurezza nell'impiego;
5. Protezione contro il rumore;
6. Risparmio energetico e ritenzione del calore. Una serie di documenti illustrano i requisiti che i materiali, impianti e loro componenti devono possedere per assicurare alla costruzione tale requisito.

Decisione del Consiglio del 29 Ottobre 1991: la decisione riguarda la promozione dell'efficienza energetica nella Comunità (Programma SAVE 91/565/CEE). Gli interventi finanziati in tutto o in parte dalla Comunità sono:

- a) Valutazioni per stimare i dati necessari alla definizione di norme e specifiche tecniche.
- b) Provvedimenti di sostegno alle iniziative degli Stati membri intese ad ampliare o creare infrastrutture in materia di efficienza energetica, tra cui:
  - attività di formazione e informazione in materia di efficienza energetica che raggiungano i consumatori finali di energia;
  - azioni settoriali (studi pilota nel settore della pianificazione per minimi costi, gestione della domanda, studi di fattibilità di progetti di cogenerazione, definizione di obiettivi settoriali di efficienza energetica, elaborazioni di diagnosi, ecc.);
- c) Misure atte alla creazione di una rete di informazioni al fine di favorire un migliore coordinamento fra le attività nazionali, comunitarie e internazionali, e consentire la valutazione dell'impatto delle varie azioni previste in questi punti;

Decisione del Consiglio del 21 Maggio 1992: concerne i requisiti di rendimento per le nuove caldaie ad acqua calda alimentate con combustibili liquidi e gassosi. La direttiva fissa i requisiti di rendimento ed individua le modalità per l'apposizione del marchio di conformità CE e delle marchiature supplementari di rendimento energetico.

Direttiva 93/76/CEE del Consiglio del 13 settembre 1993: la direttiva, emanata nell'ambito del programma SAVE, individua gli obiettivi più concreti destinati al risparmio di energia e mira alla riduzione delle emissioni di biossido di carbonio da parte degli Stati membri grazie ad un miglioramento dell'efficienza energetica, in particolare con l'elaborazione e l'attuazione di programmi nei seguenti settori:

- *certificazione energetica degli edifici:* promuove un'informazione obiettiva sui parametri energetici degli edifici e contribuisce a favorire una migliore trasparenza del mercato immobiliare, incoraggiando gli investimenti di risparmio energetico;
- *fatturazione delle spese di riscaldamento, climatizzazione ed acqua calda per usi igienici sulla base del consumo effettivo:* la fatturazione all'utente di tali spese contribuisce al risparmio energetico nel settore residenziale; l'impianto dovrà consentire all'utente di regolare il consumo per riscaldamento ed acqua calda a seconda delle proprie necessità;
- *isolamento termico dei nuovi edifici:* i nuovi edifici vanno dotati di un isolamento termico efficace, in considerazione delle condizioni climatiche locali e tenendo presente che gli edifici avranno un'incidenza sul consumo di energia a lungo termine;
- *controllo periodico delle caldaie:* assicurare le migliori prestazioni con una particolare attenzione all'ambiente;
- *diagnosi energetiche, in particolare presso imprese ad elevato consumo di energia:* la diagnosi energetica è in grado di portare a conoscenza dell'utente i difetti energetici di un edificio, di un impianto o di un processo e di mostrare i vantaggi di possibili soluzioni in termini economici; si tratta spesso di investimenti ad alto reddito, ai quali il proprietario non è insensibile. La direttiva invitava gli Stati membri a conformarsi nel più breve tempo possibile e comunque non oltre il 31.12.1994.

Al fine di raggiungere gli obiettivi di riduzione fissati dal Protocollo di Kyoto, l'Unione europea ha lanciato nel 2000 un apposito "Programma europeo per il cambiamento climatico" (ECCP), successivamente aggiornato nel 2005 (ECCP II).

Gestito dalla Commissione Europea, il programma ha finora consentito l'attuazione di circa 40 strategie e misure a livello europeo. Le misure, che completano le azioni intraprese da ciascun Stato membro a livello nazionale, comprendono norme energetiche sugli edifici, nonché regolamenti volti a limitare l'uso di alcuni gas industriali che contribuiscono particolarmente al riscaldamento climatico.

Per contenere il surriscaldamento del pianeta a 2°C, l'Unione europea ritiene necessario fermare l'aumento delle emissioni mondiali di gas responsabili dell'effetto serra entro 10-15 anni, e ridurle a metà dei livelli del 1990 entro il 2050.

L'obiettivo è passare ad una "economia compatibile con il clima", basata su una combinazione di tecnologie e di risorse energetiche a bassa emissione di anidride carbonica. Per sottolineare la propria determinazione e per dare un buon esempio ai propri partner, l'UE ha accettato di ridurre le proprie emissioni di gas del 20% entro il 2020, a prescindere da quel che faranno gli altri paesi. L'UE pensa di raggiungere tale riduzione attraverso le azioni programmate nel quadro della nuova politica integrata in materia di energia e di cambiamento climatico, che si aggiungeranno alle misure già in vigore. Tra le misure più importanti promosse dal programma ECCP rientra il "sistema comunitario di scambio di quote di emissione di gas responsabile dell'effetto serra". Il sistema prevede che le autorità nazionali di ciascun paese dell'UE assegnino un determinato numero di diritti di emissione a ciascun impianto. L'imposizione di un "tetto", o massimale, del numero totale di diritti, dà origine alla penuria di diritti necessaria perché il mercato funzioni. Le imprese che mantengono le loro emissioni al di sotto del livello dei loro diritti possono vendere i diritti di cui non hanno bisogno. Quelle che fanno fatica a conservare i propri diritti devono invece adottare misure per ridurre le emissioni, o rivolgersi al mercato per acquistare i diritti supplementari di cui necessitano, pagando altre imprese perché riducano le emissioni a loro nome. Le imprese partecipanti al sistema UE ETS possono utilizzare crediti di emissione generati da progetti di riduzione delle emissioni in paesi terzi.

Attualmente, il sistema è applicabile a circa 11.600 impianti del settore energetico ed industriale collettivamente responsabili di circa la metà delle emissioni di CO<sub>2</sub> nell'UE. Applicando un costo alle emissioni di carbonio di tali impianti, il sistema crea per le imprese partecipanti un incentivo permanente a ridurre le proprie emissioni nella misura del possibile [18]. In considerazione del fatto che le emissioni di gas provengono in gran parte dall'utilizzo e dalla produzione di energia derivante dai combustibili fossili (carbone, petrolio e gas naturale) e che tali fonti costituiscono l'80% dei consumi energetici comunitari, l'Unione Europea ha riconosciuto la necessità di raccogliere una serie di temi in un'unica politica integrata in materia di clima e di energia per l'Europa. Nell'ambito di tale politica integrata energia-cambiamenti climatici, sono state emanate alcune importanti direttive in materia di efficienza energetica quali:

Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 Dicembre 2002: l'obiettivo di tale direttiva, rivolta a tutti i paesi membri, è promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici nella Comunità tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni riguardo il clima interno degli ambienti e l'efficacia sotto il profilo dei costi, attraverso specifiche disposizioni [19]:

- L'adozione di un quadro generale e di una metodologia per il calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici (art.3);
- Applicazione dei requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici (art.4), di nuova costruzione (art.5), ed esistenti e oggetto di ristrutturazione (art.6);

- La certificazione energetica degli edifici (art.7);
- L'ispezione periodica di caldaie ed impianti di condizionamento d'aria negli edifici, nonché una perizia degli impianti termici (art. 8 e 9)

Ogni stato europeo deve recepire la direttiva mediante normativa nazionale, in modo da poter garantire una maggiore sensibilità alla specificità del clima di ciascun paese e rendere così operativa la direttiva.

Direttiva 2005/32/Ce: entrata in vigore nell'Agosto 2007, prevede l'emanazione di Direttive di Implementazione che impongono ai produttori di adottare accorgimenti progettuali al fine di migliorare il "profilo ecologico" del prodotto in questione. Tale profilo viene determinato attraverso una metodologia che consideri tutto il ciclo di vita del prodotto. I prodotti in esame sono[20]:

- Apparecchiature per il riscaldamento e per produrre acqua calda sanitaria;
- Motori elettrici;
- Illuminazione nel settore domestico e terziario;
- Apparecchi domestici;
- Apparecchiature d'ufficio nel settore domestico e terziario;
- Elettronica di consumo;
- Apparecchiature per la ventilazione e il condizionamento.

Direttiva 2006/32 CE: si inserisce nel quadro delle politiche e delle misure concrete da applicare per la realizzazione degli obiettivi degli accordi internazionali e del Protocollo di Kyoto in materia di lotta al cambiamento climatico e di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e gas a effetto serra. In particolare, essendo difficile agire sulle condizioni di approvvigionamento e di distribuzione dell'energia, l'intento della direttiva consiste piuttosto nel controllarne la domanda orientando possibilmente il mercato verso l'impiego di energie rinnovabili nel tentativo di ridurre la dipendenza dell'Italia dalle importazioni energetiche. In particolare, gli stati membri devono[21]:

- Istituire appropriati sistemi di qualificazione, accreditamento e certificazione per i fornitori di servizi energetici (Art.8).
- Assicurare l'abrogazione di disposizioni di legge e regolamenti che impediscano o limitino l'uso di strumenti finanziari (Art.9: fondi, sovvenzioni, riduzioni fiscali, prestiti, finanziamenti tramite terzi) ai fini di risparmio energetico o miglioramento dell'efficienza energetica.

Le priorità della politica energetica dell'Unione Europea sono indicate anche nel Libro verde sull'energia pubblicato dalla Commissione europea l'8 Marzo del 2006. Gli obiettivi primari sono:

- a) Sicurezza degli approvvigionamenti energetici, per coordinare meglio l'offerta e la domanda interne di energia dell'UE nel contesto internazionale (security of supply);
- b) la competitività, per migliorare l'efficacia della rete europea tramite la realizzazione del mercato interno dell'energia che limiti la dipendenza dalle importazioni di idrocarburi (competitiveness);
- c) la sostenibilità, per lottare attivamente contro il cambiamento climatico, promuovendo le fonti di energia rinnovabili e l'efficienza energetica (sustainability).

Alla luce di queste priorità, il 10 gennaio 2007 la Commissione ha definito un pacchetto integrato di misure: il cosiddetto 'Pacchetto Energia', che istituisce la politica energetica europea. Le proposte della Commissione sono state appoggiate dai capi di stato e di governo dell'Unione i quali, in occasione del Consiglio Europeo del marzo 2007, hanno ufficialmente lanciato la cosiddetta "Strategia del '20-20-20 entro il 2020". Più esattamente, si vogliono raggiungere, entro il 2020, i seguenti risultati:

- Ridurre le emissioni di gas serra del 20% rispetto al valore del 1990;
- Ridurre del 20% il consumo di energia rispetto alle previsioni per il 2020 migliorando l'efficienza energetica;
- Aumentare la quota di energie rinnovabili sul consumo energetico totale del 20% entro il 2020, triplicando la quota attuale;
- Decuplicare entro il 2010 la quota di carburanti rinnovabili, compresi i biocarburanti, sul consumo totale di benzina e gasolio, raggiungendo almeno una quota del 10%. Tutti i biocarburanti sia quelli prodotti nell'UE che quelli importati prodotti in maniera sostenibile. Verranno forniti incentivi allo sviluppo di biocarburanti ricavati dai rifiuti, dai residui e da altri fonti non alimentari;
- Sviluppare e promuovere tecnologie a bassa emissione o a emissione zero, fra cui la cattura e lo stoccaggio del carbonio, per impedire che la CO<sub>2</sub> penetri nell'atmosfera, catturandolo e conservandolo nel sottosuolo presso giacimenti di gas o miniere di sale in disuso;
- Integrare meglio i mercati energetici dell'UE, creando ad esempio un mercato europeo del gas e dell'elettricità improntato alla concorrenza;
- Integrare meglio la politica energetica dell'UE con altre azioni, non solo nel quadro della politica ambientale, ma anche in materia di ricerca, agricoltura e commercio;
- Rafforzare la cooperazione internazionale: se l'UE riuscirà ad adottare un approccio comune nel settore dell'energia e ad articolarlo in maniera univoca, essa potrà assumere un ruolo leader nel dibattito a livello mondiale.

Direttiva del 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 Maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia: con la direttiva si introduce la definizione di "edificio a energia quasi zero", intendendo con ciò edifici ad altissimo rendimento energetico e che il "*il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze*". Questa prescrizione prevede anche l'obbligo di elaborare piani nazionali destinati ad aumentare questa tipologia di edifici ed in particolare fissa i seguenti tempi:

- Articolo 9 comma 1 lettera a): "Entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero";
- Articolo 9 comma 1 lettera b): "A partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi siano edifici a energia quasi zero";

Gli Stati membri, sulla scorta dell'esempio del settore pubblico, dovranno elaborare piani nazionali destinati ad aumentare il numero di edifici a energia quasi zero. Tali piani possono includere obiettivi differenziati per tipologia edilizia. Gli Stati membri possono decidere di non applicare alcune disposizioni qualora l'analisi costi-benefici calcolata sul ciclo di vita economico dell'edificio interessato risulti negativa.

- Articolo 10 comma 2: "Entro il 30 giugno 2011 gli Stati membri redigono un elenco delle misure e degli strumenti esistenti ed eventualmente proposti, compresi quelli di carattere finanziario, diversi da quelli richiesti dalla presente direttiva ma che promuovono gli obiettivi della stessa. Entro il 2011 la commissione dovrà presentare un'analisi dell'efficacia dei fondi strutturali utilizzati per incrementare l'efficienza energetica degli edifici abitativi".

Nel caso di immobili esistenti dovranno essere apportate delle soluzioni, durante lavori di ristrutturazione, che favoriscano la realizzazione di un edificio a energia quasi zero, con allegato la certificazione contenente i valori minimi rispettati ed eventualmente raccomandazioni e suggerimenti per migliorare l'efficienza energetica. La Direttiva, quindi, prevede la costruzione di soli edifici in grado di produrre da fonti rinnovabili, tutta o in massima parte, l'energia di cui necessitano. Sole, vento ed acqua diventano definitivamente degli elementi progettuali.

Regolamento delegato (UE) N. 244/2012 della Commissione, del 16 gennaio 2012 : integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia istituendo un quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali, in funzione dei costi, per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi. Fissare requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi è di competenza degli Stati membri. La metodologia comparativa è finalizzata a garantire che i limiti imposti dai diversi Paesi siano effettivamente volti al raggiungimento degli obiettivi di risparmio auspicati dall'UE. Pertanto, ogni Stato Membro è chiamato a confrontare i valori limite di prestazione energetica che intende adottare sul proprio territorio con quelli determinati attraverso la metodologia comparativa, giustificando eventuali scostamenti. Alla Commissione, gli Stati membri sono tenuti a trasmettere una relazione dettagliata (con tutti i dati e le ipotesi utilizzati per il calcolo, con i relativi risultati) secondo il modello indicato nell'allegato III. Tale relazione comprende i fattori di conversione dell'energia primaria applicati, i risultati dei calcoli ai livelli macroeconomico e finanziario, l'analisi di sensibilità dei risultati del calcolo a cambiamenti dei parametri applicati, l'evoluzione prevista dei prezzi dell'energia e del carbonio.

## **CAPITOLO 2 ELEMENTO DI INVOLUCRO DI COPERTURA: TETTO VERDE**

### **2.1 Introduzione**

In un contesto energetico così complesso, definito dettagliatamente nel capitolo precedente, è necessario individuare metodi e soluzioni applicative che consentano di contenere i consumi e il miglioramento delle condizioni ambientali. Con riguardo al settore edilizio, una soluzione efficace è rappresentata dal tetto verde, essendo la copertura, come le pareti esterne, caratterizzata da ingenti dispersioni termiche che provocano elevati fabbisogni energetici per la climatizzazione. In estate, per effetto della radiazione solare, la temperatura superficiale del manto di copertura può risultare superiore alla temperatura dell'aria esterna anche di oltre 30°C; di conseguenza il salto termico effettivo tra l'interno e l'esterno della copertura è così elevato da far ulteriormente aumentare la temperatura interna dell'edificio per trasmissione di calore [12]. È pertanto necessario individuare metodi e soluzioni applicative che consentano di contenere i consumi e favorire il miglioramento delle condizioni ambientali; a tal fine il tetto verde rappresenta una soluzione efficace. L'impiego di tale tecnologia garantisce non solo maggior comfort termico e risparmio economico per l'edificio che lo accoglie, ma contribuisce anche alla riduzione dell'inquinamento atmosferico, alla mitigazione del microclima e ad una più piacevole fruibilità visiva. Dal punto di vista urbano, infatti, tale soluzione consente di creare nuovi spazi naturali ove non sarebbero più realizzabili a causa dell'elevata densità edilizia. Il presente studio sui tetti verdi, è strutturato in tre fasi principali di studio: una fase di inquadramento e definizione dello stato dell'arte; un'analisi teorica e di modellazione; una fase applicativa di simulazione termica dinamica. Tale studio non potrà sicuramente prescindere dalla conoscenza delle precise prescrizioni tecniche, come quelle dettate dalla norma UNI 11235, finalizzate a garantire una corretta funzionalità e una adeguata valenza ambientale. Tale prima fase di analisi si conclude con lo studio sull'aspetto costruttivo, materiali, spessori, dettagli esecutivi, campi di applicazione e alternative tecniche da impiegare nella realizzazione della copertura a verde. La seconda fase di studio concentra l'attenzione sull'aspetto termofisico del tetto verde, ossia sull'analisi e sul confronto dei modelli matematici elaborati nel corso degli anni e descrittivi le modalità di trasporto di energia termica tra gli strati componenti la copertura a verde e l'ambiente esterno. Si individueranno a tal fine le modalità di trasmissione di calore e quindi le equazioni di bilancio energetico. Si procede con lo studio degli articoli scientifici inerenti a tale tema e alla loro classificazione in funzione dell'approccio metodologico da loro impiegato, individuandone i caratteri principali e facendo emergere le problematiche del tema in questione. La fase finale del lavoro, concentra l'attenzione sulla valutazione dei benefici termici che può apportare il "green roof" attraverso l'ausilio del codice di simulazione dinamica Energy Plus e l'impiego dell'interfaccia grafica Design Builder. In particolare verranno analizzate le prestazioni energetiche di un tetto verde sperimentale realizzato sulla copertura del cubo 46 C del Dipartimento di Meccanica, Energetica e Gestionale dell'Università della Calabria. Saranno, a tal fine, studiati i materiali costituenti l'edificio e le sue stratigrafie; si realizzerà un modello del corpo edilizio e saranno valutati i fabbisogni termici di riscaldamento e raffrescamento.

L'obiettivo di tale analisi è quello di analizzare i benefici energetici conseguibili mediante la realizzazione del green roof e dare delle indicazioni sulla tipologia stratigrafica più conveniente da adottare. Pertanto, per ridurre il riscaldamento estivo dell'edificio è necessario che la sua superficie esterna possieda un'elevata capacità sia di riflettere l'irraggiamento solare, sia di cedere energia all'atmosfera esterna per irraggiamento termico nell'infrarosso; proprietà che assumono notevole

influenza sia in termini di bilancio energetico, sia di temperature di comfort, soprattutto nel caso di edifici con un numero limitato di piani o nel caso dell'analisi degli alloggi immediatamente sottostanti la copertura.

Riassumendo, le proprietà della superficie su cui intervenire sono:

- *Riflettanza solare (Albedo)*, cioè la frazione riflessa della radiazione solare incidente ( $\lambda < 2.5\mu\text{m}$ );
- *Emissività termica*, ovvero il rapporto tra l'emissione di calore della superficie per irraggiamento termico nell'infrarosso ( $\lambda > 2.5\mu\text{m}$ ) e la massima emissione teorica (da corpo nero).

Le prestazioni migliori si ottengono con alti valori di riflettanza solare (R) uniti ad alti valori di remissività termica (E). Per tali motivazioni, alle coperture tradizionali, mediante i quali si possono ottenere comunque ottimi risultati in termini di coibentazione e traspirabilità degli ambienti interni, si preferiscono metodi di costruzione alternativi che, mantenendo il comfort abitativo e l'isolamento delle migliori coperture tradizionali, permettono soluzioni tecnicamente e dal punto di vista ambientale nettamente superiori, come i tetti verdi.

### 2.1.1 Aspetti energetici

Il tetto verde può essere considerato, dal punto di vista energetico, un sistema capace di ridurre i flussi termici tra gli ambienti interni e l'esterno consentendo un miglior comfort termico e soprattutto un risparmio economico nell'utilizzo degli impianti di riscaldamento e raffreddamento; tale risparmio esercita un benefico influsso anche sull'inquinamento indiretto generato dalla produzione di energia. Il mix tra terra e vegetazione applicato sui tetti permette di realizzare delle coperture ben isolate, protette dall'acqua e dell'aria, resistenti al vento ed al fuoco, tramite materiali facilmente reperibili. Tuttavia, l'eterogeneità di tale copertura, rende impossibile la determinazione in valore assoluto della sua capacità termoisolante, in quanto numerose sono le variabili da dover considerare; pertanto è necessario fare riferimento sempre a risultati legati alla verifica di dati oggettivi sperimentali, ma vincolati a singole situazioni, non sempre generalizzabili. Occorre tenere in considerazione innanzitutto le caratteristiche geometriche dell'edificio su cui il tetto verde verrà installato, in quanto il risparmio energetico risulterà sicuramente più evidente in un fabbricato con un elevato rapporto Area/ Volume: il maggior beneficio, energetico ed economico, coinvolge l'ambiente più vicino al tetto, e si riduce progressivamente nei piani inferiori. È necessario anche tenere in considerazione la tipologia di isolamento già presente sull'edificio su cui intervenire. È stato infatti dimostrato che il tetto verde incrementa la sua efficacia soprattutto sugli edifici sprovvisti di isolamento o debolmente isolati. Se si pongono a confronto i livelli di temperatura superficiali tra una copertura tradizionale bene isolata, e la stessa con l'aggiunta di una copertura verde, risulteranno quasi trascurabili le differenze (Figura 2. 1). Diversamente, invece, accade nel confronto tra una copertura tradizionale non isolata e la stessa con l'impiego aggiuntivo del tetto verde: le differenze di temperatura superficiale possono superare anche i 10 °C (Figura 2. 2) [15]. Pertanto il contributo di una copertura verde risulta maggiormente prestazionale quando la copertura è poco isolata.

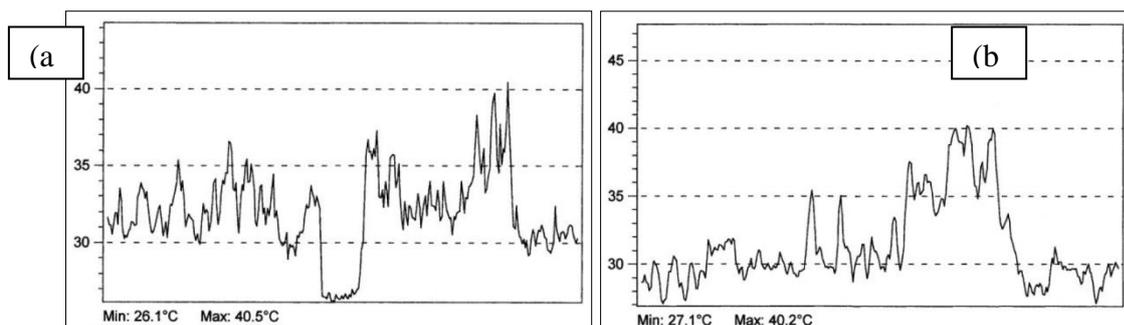


Figura 2. 1 – Confronto delle temperature superficiali tra una copertura tradizionale isolata (a) e una copertura a verde con isolante (b) [15].

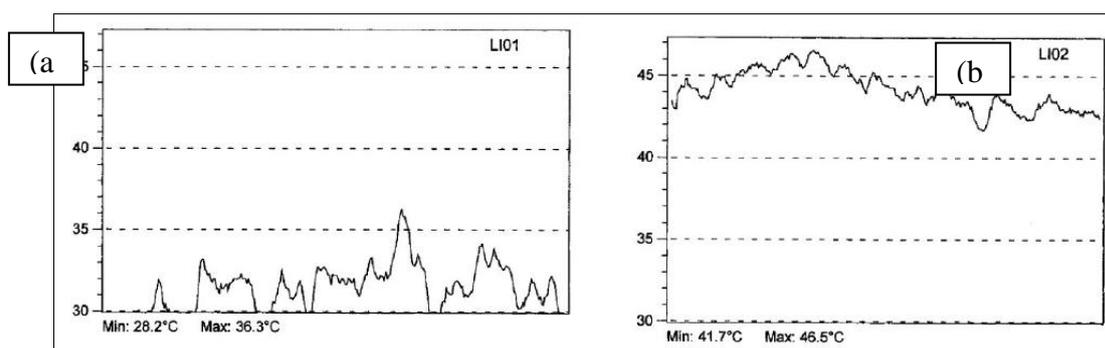


Figura 2. 2 – Confronto delle temperature superficiali tra una copertura tradizionale non isolata (a) e una copertura verde senza strato isolante (b) [15].

I fattori principali, determinanti le prestazioni di un tetto verde sono di seguito riportati:

- *Evapotraspirazione.*
- *Vegetazione e ombreggiamento.*
- *Spessore dei substrati.*
- *Fattori climatici.*

### *Evapotraspirazione*

L'evapotraspirazione è una grandezza fisica misurante la quantità d'acqua, riferita all'unità di tempo, che passa all'atmosfera grazie all'attività congiunta della traspirazione vegetale e dell'evaporazione dal suolo. La sua entità è determinata dall'interazione di vari fattori, quali la natura del terreno, il clima, la specie vegetale e la tecnica colturale. Essa rappresenta il processo termico principale caratterizzante l'elemento tecnologico oggetto di studio, in quanto responsabile della variazione del valore della trasmittanza del substrato e della diminuzione del calore latente; pertanto tale fenomeno si pone come fattore positivo nella determinazione delle prestazioni energetiche del tetto verde [16]. Da una analisi specifica e separata dei due eventi si può definire l'evaporazione come quel fenomeno caratterizzato dal passaggio dell'acqua dallo stato liquido a quello di vapore, dovuto a cause fisiche che interessano la sola superficie a contatto con l'aria. L'energia necessaria per cambiare lo stato delle molecole di acqua da liquido a gassoso è fornita dall'irraggiamento solare e dalla temperatura dell'ambiente. Al procedere del fenomeno di evaporazione, l'aria si satura ed il processo tende a rallentare finché l'aria umida non viene rimossa. La sostituzione dell'aria satura di umidità con aria secca avviene rapidamente ed efficacemente ad opera del vento; si verifica, invece, più lentamente ed in maniera meno efficace quando la rimozione avviene per fenomeni di equilibrio termofisico. Il fenomeno può essere quindi

rappresentato dalla cosiddetta “altezza di evaporazione”, ovvero il rapporto tra volume di acqua evaporato  $V_e$  e l’area della superficie evaporante  $S$ . L’evaporazione è di considerevole importanza in quanto riduce il carico termico entrante ed è capace di attivare un flusso di energia che porta verso l’esterno il calore eccedente nel locale sottostante: in questo senso, il tetto verde raffresca “attivamente” l’edificio [16]. La traspirazione è quel fenomeno biologico mediante il quale le piante restituiscono acqua all’atmosfera sotto forma di vapore ed è influenzato dall’evaporazione. Essa è strettamente legata all’energia solare radiante poiché è mediante i processi di fotosintesi, per i quali risulta indispensabile la radiazione solare, che le piante sintetizzano materia organica: parte rilevante dell’acqua viene restituita all’atmosfera con la traspirazione e solo in minima parte viene trattenuta per sintetizzare di nuovo. La traspirazione dipende innanzitutto dallo stadio di sviluppo della pianta, e avviene solo nelle ore diurne e nell’area vegetativa. I fattori che la determinano sono gli stessi dell’evaporazione, tuttavia incide sostanzialmente il contenuto idrico del terreno; le piante, infatti, estraggono l’acqua dal terreno tanto più facilmente quanto più essa è abbondante. Quando l’acqua è disponibile senza limitazioni i due eventi dipendono esclusivamente dalle condizioni ambientali, mentre quando la disponibilità idrica si riduce, si innescano meccanismi di controllo del flusso di vapore differenti tra i due fenomeni [16]. La presenza contemporanea di evaporazione e traspirazione genera l’evapotraspirazione (Figura 2. 3).



Figura 2. 3 - Schema dell’evapotraspirazione [16].

Il vento favorisce l’evapotraspirazione, tuttavia l’efficacia del movimento dell’aria dipende dallo sviluppo dell’intensità della vegetazione presente, e risulta ottimale nelle zone di transizione colturale, nei climi aridi o quasi aridi. Il trasferimento di aria calda, infatti, proveniente dai terreni più secchi, verso arie umide con presenza di vegetazione, determina l’aumento dell’evapotraspirazione, ET, nella zona di delimitazione tra le due: è il comportamento denominato “effetto oasi”, descritto nella figura successiva [16].

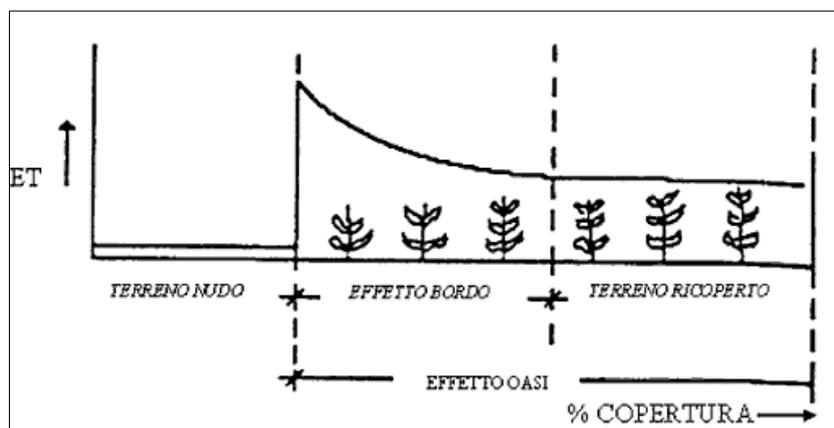


Figura 2. 4 - Rappresentazione dell'effetto oasi [16].

Il valore dell'evapotraspirazione (ET) risulta minimo sul terreno nudo, assume istantaneamente il suo valore massimo nella zona di passaggio tra terreno nudo e vegetazione, decresce fino all'area coperta da vegetazione. Ove il fenomeno raggiunge l'apice, le piante risultano meno rigogliose. Si riportano di seguito, nella Tabella 2. 1 i valori medi dell'evapotraspirazione in funzione delle condizioni atmosferiche  $ET_0$ , misurato in mm/d (millimetri al giorno) di un ipotetica superficie vegetata di erba per differenti aree climatiche, in condizioni ambientali standard, intendendo con ciò condizioni di abbondante presenza di acqua nel terreno, ottime condizioni ambientali e buone condizioni per la crescita [16].

VALORI MEDI DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE $ET_0$ [mm/d]				
REGIONI TEMPERATE		10°C	20°C	30°C
- umide e subumide		1-2	2-4	4-7
- aride e semiaride		1-3	4-7	6-9
REGIONI TROPICALI E SUBTROPICALI		10°C	20°C	30°C
- umide e subumide		2-3	3-5	5-7
- aride e semiaride		2-4	4-6	6-8

Tabella 2. 1 - Valori medi dell'evapotraspirazione in differenti aree climatiche [16].

### Vegetazione e ombreggiamento

Tra i vari contributi offerti dalla vegetazione è fondamentale non trascurare l'ombreggiamento che partecipa alla riduzione del carico termico entrante negli edifici fino al 50%. Tale condizione viene resa particolarmente efficace da un comportamento caratteristico delle piante, detto "fototropismo", secondo cui le foglie tendono a disporsi in modo quanto più favorevole alla intercettazione diretta dei raggi luminosi, al fine di garantire i processi della fotosintesi clorofilliana; pertanto, orientandosi perpendicolarmente allo stimolo luminoso, le foglie impediscono ai raggi solari di raggiungere le superfici a esse sottostanti, diventando uno strato di schermatura mobile che si autoregola in funzione della posizione del sole. Il beneficio conseguente alla riduzione dell'assorbimento della radiazione solare è il contenimento delle temperature superficiali e la riduzione delle emissioni a elevata lunghezza d'onda [17]. Numerosi studi si sono susseguiti negli anni, a convalida di quanto detto. In particolare, dall'esame e dalle simulazioni effettuate sui tetti verdi, recentemente, è emerso che la temperatura del solaio si modifica significativamente con la presenza di terra e vegetazione: in inverno la temperatura del suolo è inferiore a quella esterna di circa 5,6 °C per la presenza del fogliame che funge da isolamento e limita il trasferimento di calore

tra il tetto e l'esterno; in estate, invece, il suolo è più freddo di quasi 12,8°C, grazie all'ombreggiamento che offre protezione solare, oltre al fenomeno dell'evapotraspirazione già ampiamente discusso. Nelle immagini che seguono (Figura 2. 5 a, b, c) è riportato il confronto dell'andamento delle temperature di suolo, fogliame e ambiente esterno in tre giorni tipici, ossia il giorno invernale più freddo, il giorno invernale soleggiato e il giorno estivo più caldo, con riferimento a un clima temperato oceanico. Dalla loro lettura si evince che la temperatura del fogliame è più bassa di quella del suolo di quasi 5 °C nel giorno invernale più freddo: ciò accade perché le foglie risultano maggiormente esposte all'aria fredda; nel giorno invernale soleggiato, invece, il fogliame ha una temperatura superiore di 3,8 °C, mentre nella stagione estiva di 13,2 °C, poiché durante il giorno la radiazione solare è ampiamente assorbita dalla vegetazione [17].

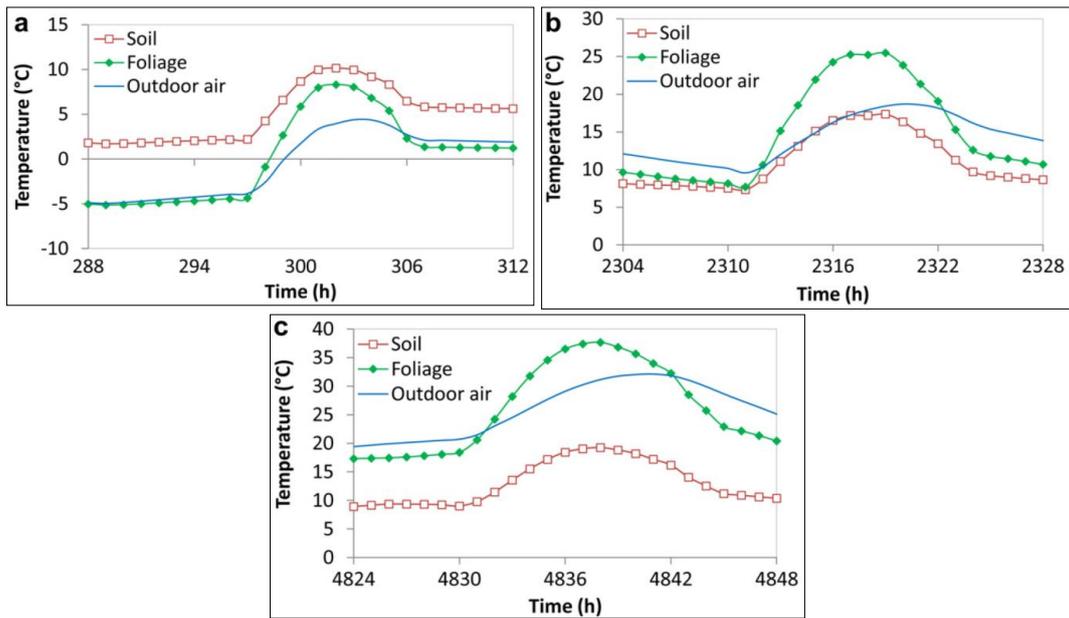


Figura 2. 5 - Analisi delle temperature in tre tipici giorni in La Rochelle: (a)inverno freddo, (b) inverno soleggiato, (c) estate calda [17].

Inoltre, uno studio effettuato dall' Università di Singapore nel 2005, nella stessa città di Singapore, ha messo in evidenza attraverso un gruppo di immagini a infrarossi come la temperatura superficiale sia superiore nel tetto verde con vegetazione più rada rispetto a una copertura a verde con elevata densità di piante.[18].

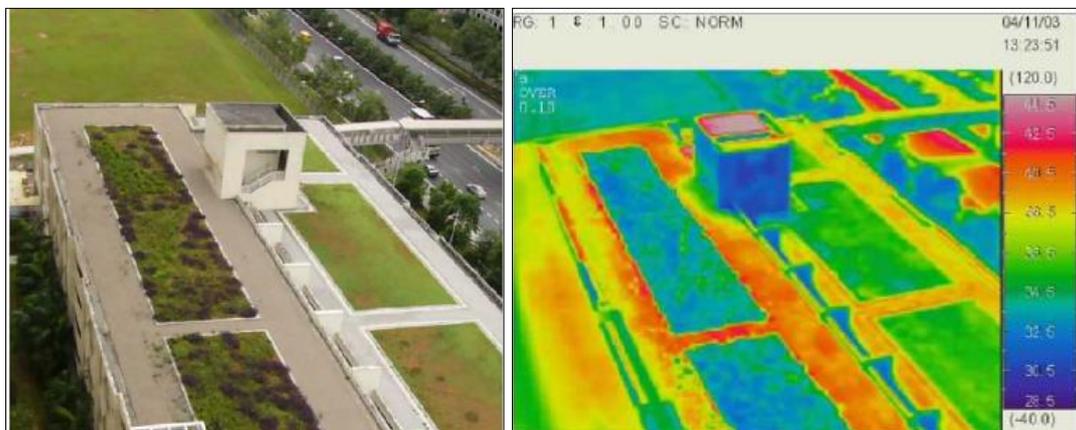


Figura 2. 6 - Analisi termica di un tetto verde con e senza vegetazione, Singapore [18].

Altro parametro significativo associato alla presenza della vegetazione, per l'analisi delle prestazioni della copertura a verde, è l'indice di superficie fogliare (LAI) definito come il rapporto tra l'area della superficie fogliare totale e l'area del suolo. L'aumento di tale indice contribuisce a un maggior ombreggiamento e captazione di radiazione solare e quindi alla riduzione del carico di raffreddamento nella stagione estiva. Nella Figura 2. 7 si riporta la variazione della temperatura in funzione del parametro LAI della vegetazione; si ottiene una riduzione dei picchi di  $9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  in un ciclo di 8 giorni. Al crescere dell'indice, decresce la temperatura.

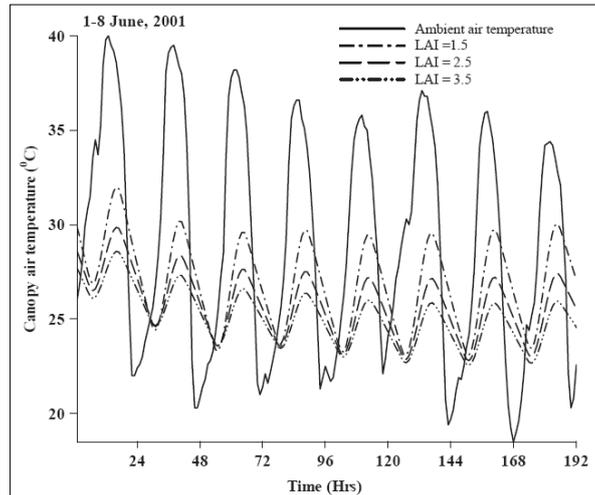


Figura 2. 7 - Relazione tra temperatura e LAI [18].

Nella Figura 2. 8 si riporta, inoltre, l'andamento dei flussi di calore in funzione del valore LAI: il grafico evidenzia una relazione inversa tra i due parametri, poiché riducendo l'indice LAI (di conseguenza l'intensità di vegetazione e quindi anche l'ombreggiamento) aumenta il flusso di calore attraverso il tetto verde [19].

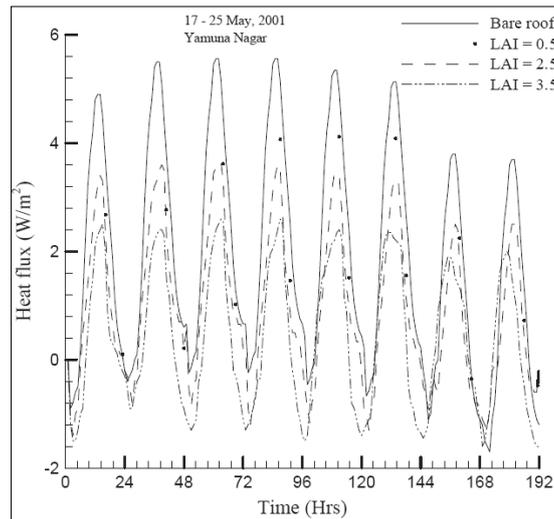


Figura 2. 8 - Relazione tra flussi di calore e LAI [19]

In conclusione, l'intensità di vegetazione è fondamentale per migliorare le prestazioni termiche di una copertura in quanto offre maggiore protezione degli strati sottostanti, tuttavia non bisogna dimenticare che una presenza elevata di piante, e un indice elevato di LAI, determina la formazione di un' area interposta tra lo strato di terreno e l'ambiente esterno che, se da una parte riduce i flussi di calore, dall'altra parte impedisce l'infiltrazione del vento favorevole al fenomeno più

rappresentativo del tetto verde, ossia l'evapotraspirazione. Quest'ultima, infatti, si intensifica quanto maggiore risulta la velocità del vento e, di conseguenza, la turbolenza rimescolante le masse d'aria. La natura del vento non deve essere, però, trascurata: i venti caldi e asciutti intensificano l'evapotraspirazione, mentre quelli freddi e umidi la deprimono. In definitiva l'azione del vento sull'evapotraspirazione è la risultante del concorso di più fattori: la velocità, l'umidità relativa e la temperatura delle masse d'aria apportate e di quelle rimosse.

La copertura verde è caratterizzata da una serie di strati funzionali, ognuno rispondente a specifiche mansioni, che saranno trattate adeguatamente nel capitolo successivo. La stratigrafia può variare rispetto alla scelta dei materiali e agli spessori, in funzione del clima in cui l'opera viene realizzata e della tipologia di copertura impiegata; il tetto intensivo, infatti, ha uno spessore superiore a quello estensivo poiché è destinato ad accogliere specie vegetative di maggiori dimensioni. Per la sua conformazione, quindi, tale tipologia di copertura presenta una massa termica superiore rispetto a quella tradizionalmente impiegata. Ciò significa che l'elemento in esame è in grado di accumulare calore senza cederlo immediatamente, evitando così che bruschi cambiamenti di temperatura esterni si riflettano direttamente all'interno dell'edificio. Il ritardo nella cessione del calore viene detto sfasamento, indicando con esso il tempo necessario in cui il flusso di calore viene assorbito da un lato dell'involucro, viene attraversato e infine ceduto all'ambiente sul lato opposto [18]. Tale peculiarità risulta essere vantaggiosa sia per il riscaldamento invernale che per il raffreddamento estivo. Con particolare riferimento alla stagione estiva, l'acqua presente negli strati di terreno contribuisce a creare una inerzia termica maggiore, in parte dovuta al suo calore specifico e in parte dovuta al calore latente di evaporazione, riducendo ulteriormente e notevolmente le fluttuazioni di temperatura e preservando le differenze con l'interno [20]. Poiché la copertura verde è caratterizzata da una ingente massa termica, e quindi da una elevata inerzia termica, la temperatura dei substrati risulterà superiore alla temperatura superficiale di un tetto tradizionale, arrivando anche a 60 °C, in funzione del clima; l'assorbimento di calore è anche favorito dalla colorazione scura degli strati di terreno. Tale valore, tuttavia, non deve essere confuso con la temperatura dell'intero sistema "tetto verde" che presenta un valore sicuramente inferiore a quello dei tetti tradizionali [18].

L'applicazione di una copertura a verde non può prescindere dal contesto climatico di riferimento: non solo la vegetazione cambia da zona a zona, ma anche il funzionamento complessivo del sistema varia a seconda dei fattori climatici. Le temperature italiane, infatti, risultano sensibilmente differenti dal resto dell'Europa; le Alpi, in particolare, fungono da barriera di separazione tra il clima freddo centro europeo, influenzato dalla ventilazione atlantica e nordica, e il clima a sud, definito Mediterraneo, che risente delle calde correnti africane.

Si riporta nella successiva Figura 2. 9 un estratto di uno studio condotto dall'Università di La Rochelle in Francia, rappresentante il confronto delle temperature tra un solaio tradizionale e un tetto verde, con riferimento sempre alla temperatura ambientale tipica del clima francese. Dalla lettura dei grafici emerge che la variazione di temperatura del solaio di copertura è molto ridotta nelle tetto verde sia in inverno che in estate. In particolare, per la copertura tradizionale i valori oscillano tra -6°C e +58°C, mentre per la copertura verde tra -4°C e 20°C. L'ampiezza delle fluttuazioni risulta ridotta di oltre 30°C in estate [17].

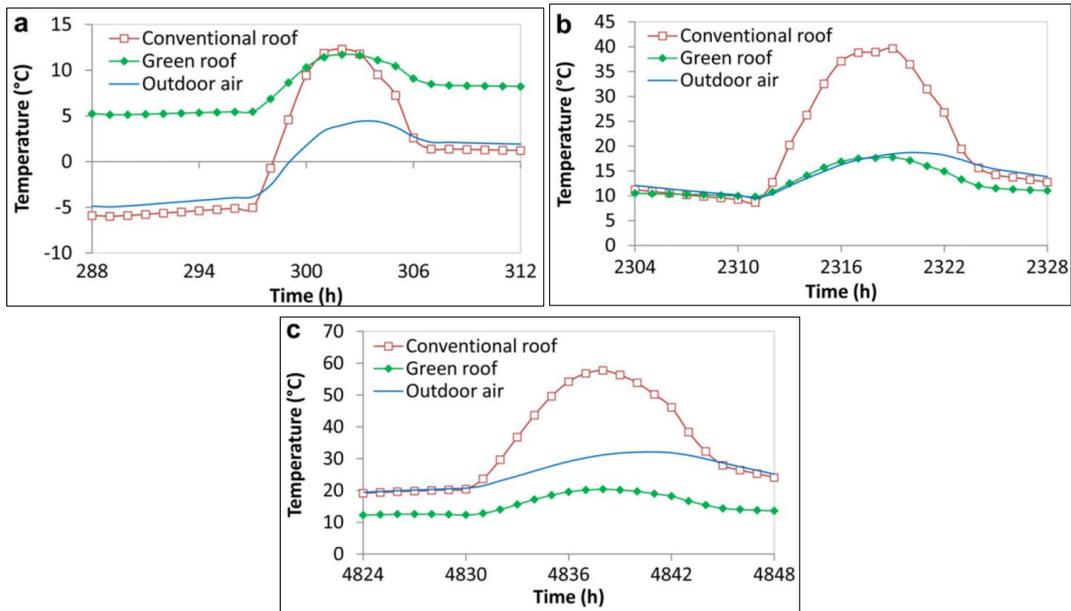


Figura 2. 9 - Temperature superficiali per una copertura tradizionale e un tetto verde in La Rochelle: (a) inverno freddo, (b) inverno soleggiato, (c) estate calda[17].

Uno dei più importanti effetti riportati è la riduzione della temperatura superficiale e l’attenuazione delle fluttuazioni. In un tetto tradizionale, infatti, costituito da materiali altamente assorbenti, la superficie esterna presenta temperature molto elevate per la combinazione dell’alta temperatura dell’aria esterna e dell’assorbimento della radiazione solare, ottenendo così carichi termici consistenti. La presenza di un tetto verde, invece, comporta temperature superficiali inferiori, grazie ai fattori influenzati già ampiamente descritti nel capitolo.

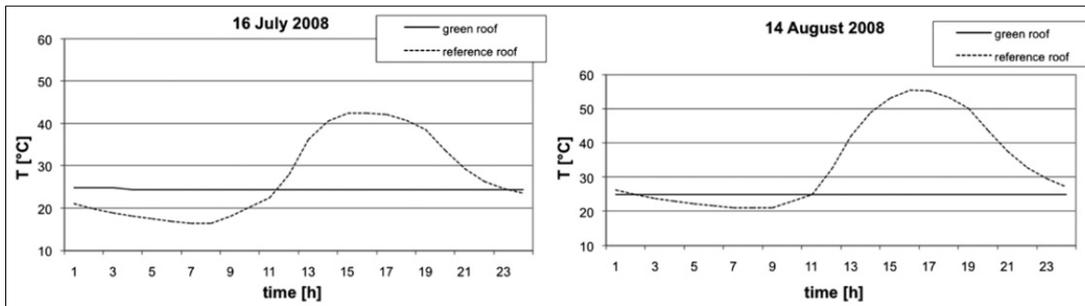


Figura 2. 10 - Confronto tra la temperatura esterna del tetto verde e del tetto tradizionale [18].

Le prestazioni del tetto verde sono valutate nella maggior parte dei casi con riferimento alle stagioni estive, essendo offerto in tale periodo il suo maggior contributo. In verità anche in inverno si verificano dei benefici, seppur più contenuti, con un risparmio energetico di circa il 22% rispetto a una copertura tradizionale. Tale risparmio, però, si riduce al 5,4 % in presenza di neve [20]. Pertanto, in caso di temperature rigide e soprattutto in presenza di neve il tetto verde riduce bruscamente la sua capacità di isolamento e quindi il rendimento termico, assottigliando notevolmente le differenze tra tetto verde e tradizionale [21].

### 2.1.2 Aspetti Economici

Tra i molteplici benefici di cui poter godere con l’installazione di una copertura verde, è necessario trattare anche l’aspetto economico e il rapporto vigente qualità/costo. I costi iniziali, superiori a un

sistema tradizionale, infatti, risultano abbattuti nel tempo, grazie a: durabilità superiore della copertura stessa, in quanto la sua conformazione offre maggiore protezione agli strati costituenti il tetto e in particolare alla impermeabilizzazione; maggior grado di isolamento offerto, che consentirà un risparmio energetico grazie alla conseguente riduzione dell'utilizzo degli impianti di condizionamento in estate ed in inverno. Considerando l'aumento degli attuali prezzi dell'energia, il tetto verde può rivelarsi quindi molto vantaggioso, tuttavia non si può mai prescindere, nell'analisi dei benefici economici, dalla posizione geografica e dal clima in cui lo si colloca, oltre che dalla tipologia di tetto verde adoperata in funzione della quale variano i costi di installazione, manutenzione e tempo di realizzazione. Una recente pubblicazione ad opera del dipartimento dell'Architettura dell'università di Toronto riporta l'analisi costo- benefici ottenibili per un tetto intensivo ed estensivo [22]. Per quanto concerne il costo di costruzione iniziale nell'odierno mercato americano, legittimato su una valutazione di dollaro/mq, risulta una variazione di costo di 130-165 dollari/mq per tetti estensivi, e circa 540dollari/mq per tetti intensivi. È stato inoltre stimato che l'applicazione di tale tetto incrementa il valore della proprietà che ne beneficia di circa 132-174 dollari/mq. A tali costi iniziali, tuttavia, occorre aggiungere eventuali agevolazioni fiscali dipendenti dalle politiche adottate dal paese in cui esso sorge.

Per quanto concerne la durabilità dell'elemento tecnologico, un tetto verde è contraddistinto da una vita media oscillante tra 40- 50 anni, mentre una copertura tradizionale non supera i 20 anni; pertanto occorrerebbe intervenire due volte nell'arco di 40 anni sulla seconda tipologia e, considerando un intervento di ristrutturazione di 160 dollari/mq, si otterrebbe una spesa complessiva di 320 dollari/mq. D'altra parte il tetto verde impiega costi aggiuntivi di manutenzione, necessari per il corretto funzionamento, stimato intorno a 0,7- 13,5 dollari/mq.

In Canada sono stati calcolati risparmi energetici annuali tra 0,18- 0,68 dollari/mq nel mese estivo, e di 0,22 dollari/mq nel periodo invernale.

Tali valutazioni sono riportate come valori medi, estrapolati da oltre 1000 casi di simulazione, in cui sono state considerate tutte le possibili combinazioni costo- beneficio. Il vantaggio economico è dimostrabile tanto sul piano individuale, quanto su quello sociale, poiché trattenendo più acqua si ha meno erosione delle infrastrutture idriche. Complessivamente sono stati determinati, per i tetti intensivi:

- beneficio da 291 – 3606dollari/mq in ambito privato; vi è solo l'1% delle possibilità che tale tipologie non apportino alcun risparmio e, in particolare, lo 0,82% che possa comportare delle perdite fino a 25dollari/mq
- beneficio sociale di 21 - 184 dollari/mq [22].

Tali vantaggi, sono stati evidenziati anche da ricerche, effettuate nella città di Toronto, sull'uso di tetti verdi su vasta scala, come alternativa sostenibile per soddisfare molte sfide dell'ambiente urbano, quali riduzione del flusso delle acque piovane, miglioramento della qualità dell'aria, riduzione del consumo di energia diretta, e la riduzione nelle aree urbane dell'effetto dell'isola di calore. Sotto il profilo economico, supponendo almeno il 75 % della superficie coperta di verde, i risultati sono riportati nella figura successiva [23].

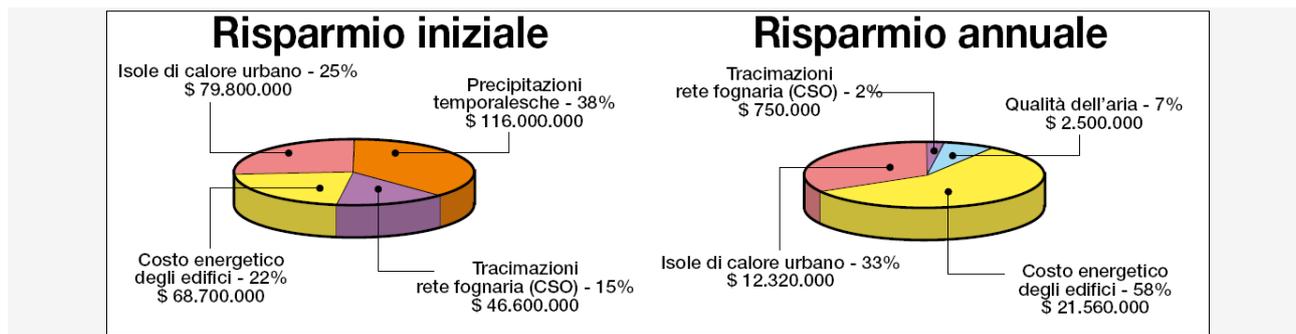


Figura 2.11 - Risparmio economico annuale per l'impiego di un tetto verde, Toronto.

### 2.1.3 Caratteristiche tecniche ed analisi critica

*Normativa di riferimento per il verde pensile: UNI 11235*

Fino a pochi anni fa le coperture a verde sono state progettate senza una precisa normativa tecnica di riferimento; le regole, stabilite dalle singole aziende produttrici sulla base di modelli europei, si configuravano non totalmente applicabili in Italia per differenti situazioni culturali, di contesto climatico e di tecnologie costruttive. L'assenza di tali criteri ha purtroppo causato la realizzazione di numerosi tetti verdi con prestazioni insoddisfacenti, senza vantaggio alcuno nell'analisi costo/benefici e addirittura in controtendenza alle aspettative del committente. Vista la crescita rapida del mercato e considerata l'importanza della copertura verde quale elemento contribuente al risparmio energetico e al comfort igrotermico, l'Ente Italiano di Unificazione (UNI) ha deciso di redigere nel 2007 una norma che si prefigurasse come guida fondamentale per la realizzazione di coperture verde a "regola d'arte". Tale normativa, coerentemente a quanto definito dalle direttive europee vigenti, intende mettere a disposizione, a tutti gli operatori del settore, informazioni oggettive e chiaramente strutturate, un "codice di pratica" che guidi ogni fase del processo edilizio della copertura a verde in funzione delle particolari situazioni e destinazioni d'uso, contesto climatico e contesto edilizio [24]. La norma ha un approccio di tipo prestazionale in quanto non si limita alla definizione delle caratteristiche dei materiali, ma tiene conto delle interazioni tra i singoli elementi e strati della copertura arrivando, così, a definire caratteristiche e prestazioni dell'intero sistema complesso. Nella prima parte, in cui sono riportate alcune definizioni correntemente ripetute nella trattazione, si definisce tetto verde di tipo estensivo come quel sistema che adopera specie vegetali in grado di adattarsi e svilupparsi nelle condizioni ambientali in cui sono poste, con spessori di substrati di coltivazione limitati e minimi interventi di manutenzione [24]. Essa, poi, si sviluppa in 10 punti fondamentali:

1. Individuazione degli agenti interferenti sul sistema di copertura a verde di cui il progettista deve tener maggiormente conto: Idrici, Biologici, Chimici, Carichi permanenti e sovraccarichi variabili, Termici, Radiativi.
2. Definizione dei requisiti richiesti agli elementi o strati delle coperture a verde: Capacità agronomica, drenante, di aerazione dello strato drenante, di aerazione dello strato culturale, di accumulo idrico, Resistenza agli attacchi biologici.
3. Analisi delle prestazioni, ottenibili attraverso i requisiti individuati: Fruibilità fisica della copertura: realizzazione di uno spazio per lo svolgimento delle attività, visiva: realizzazione di un elemento avente valenza puramente architettonica e paesaggistica; Compensazione ambientale: capacità della copertura a verde e del sistema architettonico di restituire le valenze

che il sistema ambientale originario conferiva al sistema ;Capacità di variazione delle condizioni del contesto ambientale esterno all'edificio: assorbimento acustico, regimazione idrica, mitigazione microclima.

4. Valutazione del contesto da un punto di vista climatico e territoriale per la crescita della vegetazione: Esposizione solare delle specie vegetale e presenza di superfici riflettenti, Venti prevalenti, Carichi da neve, Emissioni di aria o fumi da impianti tecnici, Esposizione alla salsedine;Inquinamento da polveri, Analisi delle specie vegetali presenti nel contesto.
5. Classificazione degli strati componenti la copertura a verde e criteri per la progettazione di quelli maggiormente significativi; un sub-componente edilizio, infatti, è composto da elementi sempre presenti, definiti, primari, e da strati secondari introdotti in funzione del contesto d'uso, climatico, merceologico.  
 Gli elementi o strati primari di una copertura a verde sono :Elemento portante, di tenuta, di protezione dall'azione delle radici, di protezione meccanica, drenante, di accumulo idrico e filtrante; Strato colturale e di vegetazione. Gli strati secondari e gli impianti complementari costituenti una copertura a verde sono: Strato di barriera al vapore, di schermo al vapore, termoisolante, di pendenza, di regolarizzazione, di imprimitura, di continuità, di diffusione, di irrigidimento o ripartizione dei carichi, di separazione e/o scorrimento, di protezione, di zavorramento e antierosione, Impianti di irrigazione.
6. Classificazione della copertura a verde in funzione di: Fruibilità, Pendenza superficiale, Manutenzione del sistema.
7. Definizione per ogni singolo elemento o strato, dei materiali prevalentemente impiegati, indicando per ognuno di essi i requisiti ed il relativo metodo di prova nel rispetto delle altre normative vigenti.
8. Istruzioni per l'esecuzione e l'installazione degli elementi componenti il tetto verde al fine di un corretto funzionamento nel tempo della copertura con particolare attenzione all'elemento di tenuta e allo strato colturale.
9. Istruzioni sul collaudo, al fine di assicurare che gli interventi edili e agronomici rispondano alle prescrizioni di progetto.
10. Istruzione sulla manutenzione

### *Analisi stratigrafica*

Il tetto giardino rappresenta una scelta costruttiva complessa e necessita, pertanto, di una scrupolosa pianificazione. Anche se le alternative tecniche sono molteplici, è possibile individuare univocamente quegli elementi funzionali sempre presenti nella sua stratigrafia, come definito in precedenza dalla norma UNI 11235; procedendo dall'interno verso l'esterno, la copertura verde risulta, quindi, costituita da:

Strato portante: è il solaio di copertura supportante il complesso dell'impermeabilizzazione. Il suo dimensionamento deve tenere in considerazione: i carichi permanenti, riferiti non solo al peso proprio strutturale e ai sovraccarichi fissi, ma anche con al peso dello strato colturale e della vegetazione; i carichi accidentali (UNI 10012) e il notevole contenuto d'acqua di cui lo strato di terreno può essere portatore. Deve fornire anche una pendenza minima del 2% per il deflusso dell'acqua. Inoltre la portata sulla soletta deve essere almeno di  $250 \text{ kg/m}^2$  [25].

Strato di tenuta: è fondamentale per impedire la penetrazione delle acque meteoriche negli ambienti interni proteggendo, nel contempo, gli strati della copertura che non devono essere bagnati. Per le

coperture discontinue la tenuta viene garantita dalla pendenza della falda e dalla disposizione geometrica degli elementi di rivestimento; per la copertura continua, la funzione è assolta da un manto impermeabile generalmente di composizione bituminosa, poliolefine o polivinilcloruro [25]. Qualora si intervenga su coperture preesistenti e non risultino articolazioni geometriche che possano servire allo scopo, è possibile adottare due differenti sistemi: posa in totale adesione dell'elemento impermeabilizzante sullo strato resistente in assenza di elemento termoisolante e realizzazione di settori compartimentati in presenza di isolante termico [24].

Strato antiradice: gli organi ipogei possono provocare danni fisici alla impermeabilizzazione sottostante generando infiltrazioni d'acqua che, nel corso degli anni, indeboliscono strutturalmente la soletta. Al fine di impedire l'invasione delle radici, si dispongono speciali guaine che possono essere integrate con l'elemento di tenuta oppure sovrapposte a questa, qualora l'installazione di un verde pensile avvenga su una copertura già esistente e dotata di una comune impermeabilizzazione. In tale seconda condizione, risulta necessario adottare soluzioni differenziate in funzione del tipo di copertura: per tetti a verde estensivo si adottano fogli polietilenici, posati senza saldatura con semplice sovrapposizione di bordi contigui di almeno 1,5–2,0 metri; nel caso di tetto a verde intensivo si impiegano fogli di guaine in PVC, sovrapposti lateralmente di almeno 5 cm e attentamente saldati (a caldo con saldatrici o a freddo con solventi chimici) al fine di assicurare una perfetta tenuta. In entrambe le tipologie di copertura è necessario ricoprire l'elemento antiradice con il feltro di protezione da danni meccanici e da ritenzione idrica. Tali materiali, inoltre, devono essere certificati "antiradice" per aver superato uno dei specifici test antiradice ufficialmente riconosciuti [26].

Strato drenante: il principale requisito richiesto a tale elemento è la capacità drenante rispetto alle acque di origine meteorica o di irrigazione in eccesso, al fine di evitare dannosi ristagni idrici; costituisce, inoltre, una riserva d'acqua per la vegetazione e funge da protezione aggiuntiva degli strati impermeabilizzanti inferiori. La scelta del materiale drenante da adottare è sempre subordinata alla determinazione della capacità drenante sotto carichi in esercizio, secondo UNI EN ISO 12958, e al carico punzonante che si esercita sugli elementi sottostanti. Essi si distinguono in due categorie: materiale sfuso ed elementi preformati in piastre e rotoli. Il primo è un componente molto leggero per la sua proprietà di ritenzione idrica, porta all'accumulo di una falda d'acqua di alcuni centimetri sul fondo del sistema, che risale per capillarità mantenendo umido il substrato e dando nutrimento alla vegetazione; sono di comune impiego l'ardesia espansa, la pomice e la lava. La seconda tipologia comprende materiali sintetici, quali polietilene o polistirolo, più leggeri, facili da posare, con una buona resistenza a compressione e con capacità drenanti superiori a quelli dei materiali sfusi, a parità di spessore; in tali sistemi l'acqua viene immagazzinata in appositi incavi così da poter ottenere accumulo anche nel caso di coperture inclinate. Lo spessore può variare da 2,5 a 12 cm [27]. Gli aggregati comunemente impiegati sono la pietra pomice e lo scisto espanso. In generale, la scelta della tipologia è funzione della reperibilità del luogo in cui si interviene e quindi dal suo valore economico: la pietra pomice, infatti, è largamente diffusa nella parte nord occidentale degli Stati Uniti, in Grecia, in Spagna e in Italia nelle terre sarde, campane, del viterbese, e a Lipari. Lo scisto espanso, è molto diffuso, ad esempio, nella zona orientale degli Stati Uniti. Il Dipartimento di Meccanica dell'Università statunitense di Portland ha condotto uno studio sperimentale al fine di confrontare le proprietà termiche e le differenze prestazionali dei tetti verdi in presenza di uno o dell'altro materiale e per diversi livelli di umidità; sono stati a tal fine adoperati diversi campioni, la metà contenente pietra pomice, l'altra metà contenente scisti, in percentuali

variabili tra il 50-75% [28]. I risultati riportano che, in caso di terreni asciutti, gli scisti determinano un aumento della conducibilità termica dell'intero sistema tetto superiore rispetto a quello ottenibile con l'impiego della pomice, con valori di picco rispettivamente di 0,21 e 0,18 W/mK. Il calore specifico e il valore di albedo, invece, risulta superiore con l'utilizzo della pomice. Pertanto, poiché la capacità di un tetto verde di immagazzinare energia è proporzionale al suo calore specifico, l'impiego di pietra pomice risulta più conveniente. La successiva Tabella 2. 2 riporta la capacità di umidità per otto campioni costituiti da differenti percentuali di pomice e scisto; ne risulta che, per una presenza di aggregato del 75%, la pomice può contenere un quantitativo pari al doppio di quello contenibile dalle scisti [28].

Sample no.	Pumice (%)	Expanded shale (%)	Compost (%)	Sand (%)	Moisture capacity (g/g)
DH01	50	0	10	40	0.32
DH02	50	0	0	50	0.30
DH03	75	0	0	25	0.43
DH04	75	0	10	15	0.44
DH05	0	50	10	40	0.23
DH06	0	50	0	50	0.23
DH07	0	75	0	25	0.22
DH08	0	75	10	15	0.24

**Tabella 2. 2 - Capacità di contenimento di umidità per diversi tipi**

**di strati drenanti[28].**

Attualmente, l'Università spagnola di Lleida ha focalizzato l'attenzione sull'introduzione della gomma riciclata dai pneumatici, in sostituzione di quelli lapidei tradizionalmente impiegati. Tale innovazione consente di ridurre il consumo degli elementi naturali, che richiedono grandi quantitativi di energia nel loro processo di trasformazione, e di fornire una soluzione al problema dei rifiuti di gomma da pneumatico [29]. In particolare è stato effettuato un confronto sperimentale tra la capacità di drenaggio degli elementi in gomma e quella dei materiali lapidei, di cui è stata considerata a campione la pozzolana. Il risultato ottenuto ha dimostrato che tale innovazione è capace di mantenere le medesime proprietà isolanti di un tetto verde caratterizzato da un tradizionale strato di drenaggio in pomice, scisto espanso o pozzolana. Di seguito (Figura 2. 12) si riporta una sintesi dei risultati, conseguiti da tale università e riguardanti la capacità di ritenzione idrica di tetti verdi in presenza di pozzolana(P) di 4-12 mm e gomma(R) in pezzi di grandi (3,5-7 mm), medie (3,5-2 mm) e piccole (2-0,8 mm) dimensioni. In assenza di vegetazione la prestazione dello strato di drenaggio realizzato in gomma è superiore a quello in pozzolana per pezzature piccole e medie. In presenza di vegetazione la gomma da pneumatico risulta possedere un comportamento migliore rispetto ai materiali tradizionali. Se vengono posti a confronto gli strati drenanti realizzati in gomma si può osservare che le prestazioni migliori si ottengono per medie e grandi dimensioni [29].

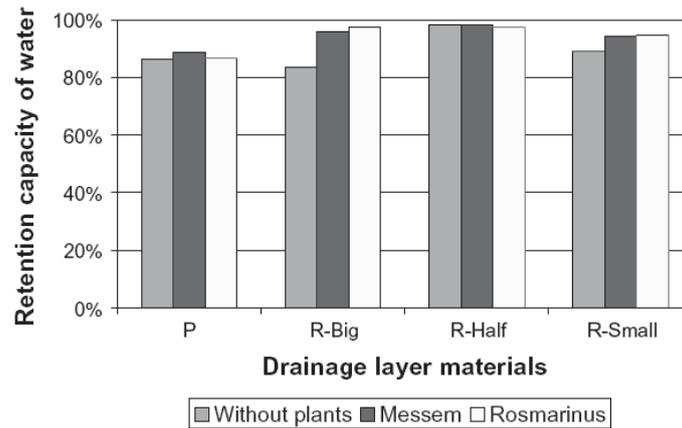


Figura 2. 12 - Confronto tra le capacità di ritenzione idrica di un tetto verde con differenti tipi di strati drenanti [29].

Per convalidare ulteriormente tali risultati, la stessa università ha effettuato una valutazione energetica su alcuni campioni di tetto verde. Sono stati realizzati tre cubi prova di dimensioni 2,4 x 2,4 x 2,4 m su una base di 3 x 3 m di calcestruzzo magro, con pareti perimetrali costituite dalla seguente stratigrafia (procedendo dall'interno verso l'esterno): strato in gesso, mattone forato e rivestimento in malta cementizia. Il primo cubo prova, denominato "di riferimento" ha una copertura convenzionale con sovrapposto uno strato di 10 cm di ghiaia. Il secondo cubo prova è caratterizzato da un tetto verde con strato di drenaggio in pozzolana di 4 cm e superiormente un substrato colturale di 5 cm. Il terzo cubo prova è costituito da una copertura a verde con strato di drenaggio in gomma da pneumatico di 4 cm e substrato colturale di 5 cm. Di seguito si riportano le sezioni costruttive dei cubi sperimentali e alcune immagini rappresentanti alcune fasi costruttive e lo stato di fatto.

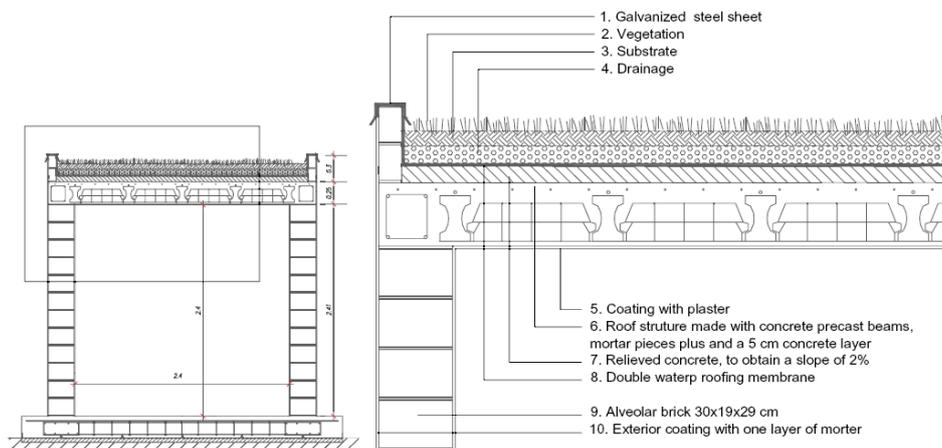




Figura 2. 13 - Sezione costruttiva dei cubi prova (a) e realizzazione (b) [29].

Un primo esperimento, riferito a un periodo di 5 giorni del mese di Luglio e sintetizzato nella Figura 2. 14 (a), è stato condotto attraverso il confronto delle prestazioni energetiche dei tre cubi in presenza di solo strato drenante. Il grafico dimostra che non vi sono rilevanti differenze di consumo tra i tre campioni: la presenza della gomma induce un consumo del circa 5,4% superiore rispetto al cubo di riferimento, mentre la pozzolana un consumo aggiuntivo dell'1% rispetto allo stesso cubo di riferimento. In un secondo esperimento (Figura 2. 14(b)), riferito a un periodo di 4 giorni del mese di Agosto, è stato effettuato un altro confronto del consumo energetico dei medesimi cubi prova, valorizzati dalla presenza del substrato colturale. I risultati, riportati in tabella, rilevano nuovamente differenze trascurabili tra i tre cubi; inoltre, se si effettua una comparazione tra i valori ottenuti dai due esperimenti emerge che l'inserimento del substrato condiziona il valore temperatura interna dell'edificio, che si riduce di circa 3 °C, con una conseguente e incisiva riduzione del consumo energetico [29].

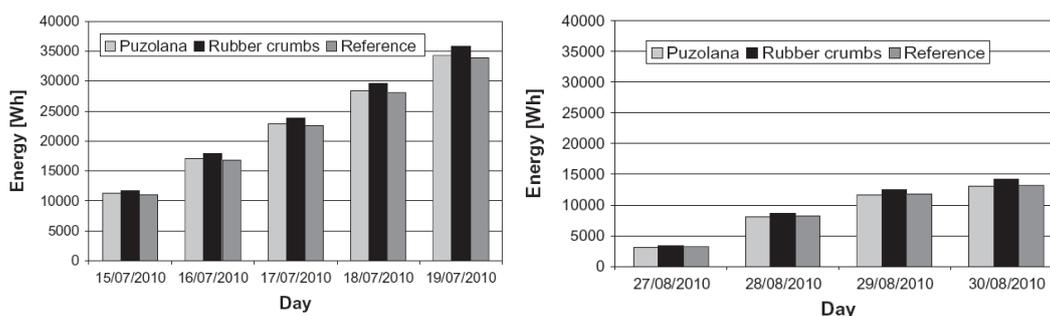


Figura 2. 14 - Consumo energetico di tre campioni di tetto verde in presenza del solo strato drenante (a) e in presenza di strato drenante e sub strato colturale (b) [29].

**Strato filtrante:** la sua funzione è quella di consentire lo scorrimento delle acque meteoriche, evitando, al tempo stesso, il passaggio di materiali fini dallo strato colturale a quello di drenaggio. Per un buon funzionamento lo strato filtrante dovrebbe possedere opportune caratteristiche di resistenza a trazione – taglio - punzonamento e una permeabilità almeno 10 volte maggiore di quello dello strato colturale. Se tali requisiti non risultassero garantiti, si verificherebbe un intasamento dello strato filtrante con conseguenziale interruzione del flusso verticale di acqua di drenaggio, oltre allo scambio gassoso tra substrato e strato drenante; si provocherebbe, inoltre, una condizione di anaerobiosi(1) dello strato drenante che col tempo deteriora gli apparati locali. I

materiali correntemente impiegati per la realizzazione di tale elemento sono : aggregati granulari ed elementi geosintetici (o geotessili) ; i secondi sono quelli maggiormente diffusi [27].

Strato colturale: è lo strato avente la funzione di sostenere lo sviluppo vegetale della copertura a verde; esso deve assicurare l'ancoraggio, l'approvvigionamento idrico – nutritivo, la respirazione dell'apparato radicale e deve consentire uno sviluppo costante nel tempo della vegetazione in condizioni climatiche avverse senza comportare alti costi di manutenzione

È necessario, inoltre, che vengano effettuati controlli su alcune fondamentali proprietà, nel rispetto dei limiti imposti dalle normative [24]:

- Controllo del PH, secondo UNI EN 1307;
- Conducibilità elettrica, secondo UNI EN 13038;
- Controllo della permeabilità, secondo DIN 18035;
- Controllo della capacità di ritenzione idrica, secondo UNI EN 13041;
- Controllo della curva di ritenzione idrica, secondo UNI EN 13041;
- Controllo della fitotossicità, secondo D.P.R. 16/04/2003.

I materiali solitamente impiegati nella miscelazione dei substrati, per formare la parte minerale, sono costituiti da materiali vulcanici quali le lave e la pomice oppure laterizi riciclati provenienti dalla demolizione di fabbricati, opportunamente selezionati, arrotondati e vagliati; questi ultimi, oltre ad avere caratteristiche fisiche e chimiche equivalenti o migliori rispetto ai materiali vulcanici, presentano innegabili vantaggi per la salvaguardia dell'ambiente in quanto evitano l'approvvigionamento di materiale in cave, offrendo, così, interessanti possibilità di riutilizzo[27]. La composizione del substrato colturale di un tetto a verde è sempre differente da quella della normale terra vegetale in quanto l'elevata presenza di frazioni argillose e limose, di cui il normale terreno è composto, provocherebbe l'intasamento dello strato filtrante e il compattamento della stratificazione con conseguente asfissia e condizioni di anaerobiosi per gli apparati radicali. Pertanto, tali strati risultano composti prevalentemente da componenti minerali, con una presenza fino al 95-98%, e solo la rimanente porzione risulta costituita da materiali organici quali torbe, cortecce compostate, residui vegetali compostati, fibra di cocco e altro [27].

Strato di vegetazione: la progettazione di tale strato deve essere strettamente correlata a quella dello strato colturale e delle strategie di irrigazione e la scelta delle specie vegetali è sempre funzione delle contesto climatico e di quello territoriale.

Verde estensivo: è caratterizzato da spessore ridotto e peso contenuto, basso fabbisogno nutritivo ed energetico, costi relativamente bassi per l'installazione e la gestione. Lo spessore del substrato, varia dagli 8 ai 15 cm, il peso è compreso tra 90 kg/m<sup>2</sup> a 220 kg/m<sup>2</sup> a saturazione idrica completa (esclusa la vegetazione) [24].

Verde intensivo: è caratterizzato da spessore e peso importante, alto fabbisogno energetico per la condotta, costi relativamente elevati sia d'installazione sia di gestione. Lo strato colturale può variare tra 15-20 cm se è di tipo leggero oppure tra 20-40cm se di tipo pesante, superando talvolta anche i 50 cm, il peso varia da 220-1200 kg/m<sup>2</sup> [24]. In determinati casi, in cui si ha la necessità di impiegare alberature a sviluppo maggiore, il substrato può raggiungere i 100 cm. I limiti sono costituiti dalla statica dell'elemento portante che deve essere in grado di garantire prestazioni portanti. Le specie vegetali generalmente impiegate sono erbacee prative, perenni, cespugli, e ove possibile anche piccoli alberi. Questa tipologia richiede una manutenzione frequente, regolari apporti nutritivi ed assidua alimentazione idrica; la fruibilità è massima e sono adatte tutte le piante capaci di resistere al vento e al freddo invernale [30]. La vegetazione vive sempre in condizioni ben

differenti da quelle su terra per la mancanza di radici profonde, radicazione limitata, pericolo di ristagno idrico, soprattutto per pendenze ridotte, temperature estreme soggette a forti oscillazioni e maggiore esposizione al vento. Quest'ultimo in particolare influenza l'essiccamento, l'intensità delle sollecitazioni meccaniche, la presenza di umidità dell'aria e formazione di rugiada [24].

## 2.2 Fenomeni termofisici, modelli matematici e software

Diversi modelli matematici elaborati nel corso degli anni descriventi le modalità di trasporto dell'energia termica tra gli strati componenti della copertura a verde e l'ambiente esterno. Risulta impreciso definire un modello più o meno adatto rispetto ad un altro, così come è impossibile definire in assoluto il modello più appropriato da adottare, in quanto, come si vedrà di seguito, ogni modello parte da alcune ipotesi semplificative e considera alcuni fattori in maniera dettagliata trascurandone altri. Tuttavia alcuni modelli recentemente pubblicati in ambito scientifico internazionale sono supportati da un processo di verifica e di validazione che dimostrano la rispondenza tra i risultati del modello matematico teorico e quelli ottenuti da indagine sperimentale e quindi una corretta trattazione dei fenomeni fisici caratterizzanti la copertura verde. Prima di affrontare l'analisi riguardo il modello termofisico, si riporta una immagine riassuntiva delle principali modalità di scambio termico presenti nel sistema in esame; la classificazione è stata effettuata in funzione degli elementi tra i quali si verifica lo scambio, distinguendo così in verde il contributo della vegetazione, in marrone quello del substrato colturale, in azzurro la presenza dell'acqua del terreno in funzione del flusso di precipitazione, in giallo la radiazione solare.

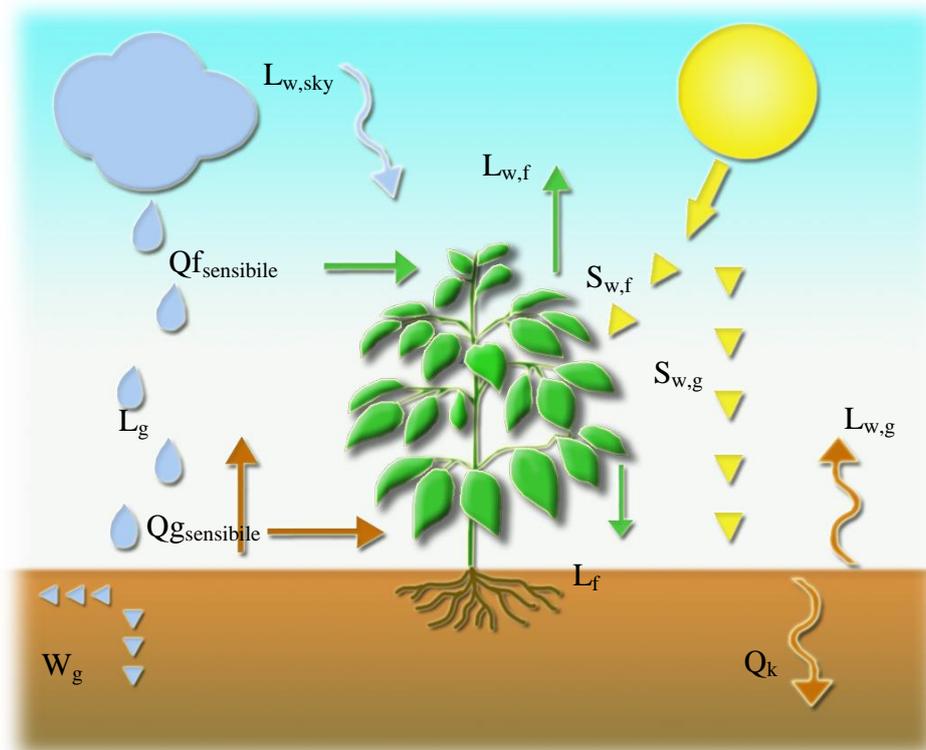


Figura 2. 15 - Principali modalità di scambio termico nel sistema terreno – vegetazione – ambiente esterno.

Dove  $Q_{g,sensibile}$ : flusso di calore sensibile del terreno [ $W/m^2$ ];  $Q_{f,sensibile}$ : flusso di calore sensibile del fogliame [ $W/m^2$ ];  $L_g$ : flusso di calore latente del terreno [ $W/m^2$ ];  $L_f$ : flusso di calore latente del

fogliame [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];  $L_w$  : radiazione onde lunghe [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];  $S_w$  : radiazione onde corte [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];  $Q_k$ : calore conduttivo trasmesso all'interno del terreno [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];  $W_g$ : contenuto d'acqua volumetrico.

Considerando l'intero sistema del tetto verde, la cui stratigrafia è stata adeguatamente descritta nel capitolo precedente, è possibile definire una equazione globale di bilancio energetico che descriva in via del tutto generale i processi esistenti, i quali saranno esplicitati nei modelli di seguito proposti in maniera dettagliata e con differenti livelli di dettaglio :

$$R_n = L + Q_{\text{sensibile}} + Q_{\text{conduttivo}} + B$$

$R_n$ : contributo radiativo che si compone di una aliquota a onde corte proveniente dal sole e una a onde lunghe. La maggior parte dell'energia radiante che raggiunge la superficie terrestre è a onde corte, una parte della quale è riflessa dalle superficie su cui incide. La frazione percentuale di energia riflessa, definita albedo, dipende sia da fattori ambientali variabili nel tempo, come l'altezza del sole sull'orizzonte, sia dalle caratteristiche della superficie raggiunta dai raggi solari. La vegetazione riflette solitamente una frazione di radiazione superiore rispetto a terreno. Parte dell'energia radiativa assorbita dalla terra viene irradiata nuovamente verso l'atmosfera nel campo delle onde lunghe, infrarosso, in maniera proporzionale alla temperatura superficiale. Lo stesso accade per i gas che costituiscono l'atmosfera, che riflettono a loro volta tale energia nello stesso campo di lunghezza. Pertanto la radiazione netta, considerata ai fini del bilancio, risulta essere una combinazione di radiazione a onde lunghe e onde corte. In definitiva, i contributi radiativi individuabili in presenza di tetto verde sono:

- Radiazione a onde corte incidente sul fogliame;
- Radiazione a onde corte incidente sul terreno;
- Radiazione a onde lunghe tra vegetazione e ambiente esterno;
- Radiazione a onde lunghe tra vegetazione e terreno;
- Radiazione a onde lunghe tra terreno e ambiente esterno.

$Q_{\text{sensibile}}$ : flusso di calore sensibile, ovvero il calore scambiato tra il suolo e lo strato di aria a contatto, oppure tra la vegetazione e l'aria circostante, per effetto di un gradiente termico che genera dei moti d'aria e quindi la propagazione del calore nello strato limite per convezione naturale.  $L$ : flusso di calore latente, trasmesso per variazione di stato liquido-vapore; Esso è legato ai fenomeni evapotraspirativi, ossia alla evaporazione del terreno e alla traspirazione delle piante; non è da trascurare, anche se di entità minore rispetto al precedente, il contributo di calore latente che si propaga all'interno del terreno. Nei processi latenti è fondamentale la presenza dell'acqua; la sua assenza tende ad annullare il contributo latente portando alla trasformazione del contributo radiativo incidente in parte in calore di tipo sensibile e in parte in flusso conduttivo all'interno del terreno.

$Q_{\text{conduttivo}}$ : flusso di calore nel suolo, ovvero il calore trasferito dalla superficie verso gli strati sottostanti innescato sempre da un gradiente di temperatura e dipendente dalla conducibilità termica dello strato che si sta analizzando. Tale termine può assumere valori positivi o negativi a seconda che ci sia in corso un riscaldamento o un raffreddamento della superficie. La conducibilità termica è strettamente legata alle condizioni di umidità del suolo, in quanto l'aria, cattivo conduttore di calore, presente nei pori, può essere poi sostituita da acqua, che invece ne costituisce un buon conduttore.

**B:** energia immessa nella biosfera ad opera del processo di fotosintesi delle piante, le quali, utilizzando l'energia derivante dalla luce solare, acqua e anidride carbonica, liberano ossigeno e producono biomassa. Questo contributo viene in genere trascurato.

Al fine di creare e sviluppare un modello matematico che descriva adeguatamente i fenomeni fisici caratterizzanti una copertura verde, si è proceduto inizialmente allo studio degli articoli scientifici inerenti a tale tema e alla loro classificazione in funzione dell'approccio da loro impiegato, individuandone i caratteri principali.

È possibile, infatti, identificare quattro differenti finalità nello studio dei fenomeni caratterizzanti il tetto verde e le sue prestazioni energetiche:

1. Modellazione matematica e/o trattazione fisica del problema;
2. Simulazione delle prestazioni energetiche del tetto verde mediante modelli già esistenti;
3. Sperimentazione su piccola scala (riproduzione in laboratorio) o su grande scala con realizzazione di una copertura verde su un edificio;
4. Processo di validazione attraverso la combinazione della modellazione matematica con la sperimentazione.

È stato dunque possibile raggruppare gli articoli scientifici studiati come segue:

	<i>Modellazione matematica Trattazione fisica</i>	<i>Simulazione</i>	<i>Sperimentazione</i>	<i>Validazione</i>
<i>Palomo Del Barrio 1998</i>	Si	--	--	--
<i>Eumorfopoulou 1998</i>	Si	--	--	--
<i>Nichau 2001</i>	Si	--	--	--
<i>Wong 2003</i>	--	Si	--	--
<i>Takahashi 2004</i>	--	Si	--	--
<i>Lazzarin 2005</i>	Si	Si	Si	Si
<i>Kumar 2005</i>	--	Si	Si	Si
<i>Alexandri 2007</i>	Si	--	Si	Si
<i>Sailor 2008</i>	Si	Si	--	--
<i>Feng, Meng- 2010</i>	Si	--	Si	Si
<i>Jim, He-2010</i>			SI	
<i>Jim, Tsang 2011</i>	Si	--	Si	Si
<i>Tsang, Jim 2011</i>	Si	--	Si	--
<i>Eddine Ouldboukhitine 2011</i>	Si	Si	Si	Si
<i>Tabares 2011</i>	--	--	Si	--
<i>Kokogiannakis 2011</i>	--	Si	--	--
<i>Tabares-Velasco 2012</i>	Si	--	Si	Si
<i>Eddine Ouldboukhitine 2012</i>	Si	Si	Si	Si
<i>Jaffal, Salah- Eddine Ouldboukhitine 2012</i>	Si	Si	--	--

Tabella 2. 3 - Classificazione degli articoli scientifici inerenti a: modellazione matematica, simulazione e sperimentazione.

Dallo studio di tali articoli si evince l'incisiva complessità della trattazione del problema, a causa della moltitudine di parametri che influenzano i processi di scambio termico e della loro interazione. Per tale motivazioni i primi modelli risultano approssimativi e poco rappresentativi del reale comportamento di una copertura verde: Eumorfopoulou [31] investiga sulle caratteristiche principali di tale tecnologie, ma trascurano processi essenziali quali il fenomeno dell'evapotraspirazione e la presenza del contenuto d'acqua come fattore influenzante la conducibilità del terreno. Tali modelli inoltre non definiscono un vero e proprio bilancio energetico quantificando i processi di scambio di calore.

Successivamente sono stati sviluppati modelli più complessi che analizzano i processi termici partendo da alcune assunzioni di base semplificative; quelle comuni a tutti i modelli studiati sono:

- Le piante e il substrato colturale sono omogenei orizzontalmente;
- Il calore e il trasferimento di massa sono analizzati secondo la sola direzione verticale, mentre i flussi orizzontali sono trascurabili; tale assunzione implica la scelta di un modello monodimensionale.
- Il fenomeno biochimico, quale la fotosintesi, è trascurabile nell'equazione di bilancio energetico;
- Il trasferimento di calore per conduzione nelle piante è trascurabile;
- Il substrato colturale è considerato equivalente a un continuo omogeneo e isotropo, pertanto le sue proprietà non dipendono dalla direzione.

Tali modelli, procedendo con differenti discretizzazioni, analizzano nel dettaglio alcuni contributi, ma ne trascurano altri, come per esempio il bilancio di massa, risultando talvolta incompleti. Il modello di Elena Palomo Del Barrio nel 1998 [32], propone per la prima volta una formulazione completa molto accurata della definizione del bilancio energetico globale; si fonda, infatti sul trasferimento di calore e di massa, anche se il contenuto d'acqua è considerato costante e si trascura la resistenza stomatica delle piante. Tale modello è stato poi ripreso da Kumura nel 2005, il quale ha incorporato il modello su un sistema di simulazione basato sulle trasformazioni di Fourier in Matlab e poi è stato testato per mezzo di una sperimentazione su larga scala con un tetto verde realizzato in India. Anche il modello matematico formulato da Lazzarin] tiene in considerazione il contenuto d'acqua presente nel terreno come fattore incidente sul bilancio energetico complessivo; i flussi convettivi e radiativi, tuttavia, risultano analizzati in modo alquanto approssimativa attraverso l'equazione di Penam-Monteith ed il coefficiente di adduzione che trascura la resistenza stomatica delle piante. Pertanto tale modello è stato validato con dati sperimentali solo in condizioni di terreno secco. Alexandri nel 2007 [33] sviluppa un modello matematico fondato sul bilancio di calore e di massa e introduce la resistenza stomatica delle foglie. Effettua una sperimentazione su piccola scala al fine di validare tale modello che, tuttavia, risulta approssimativo in quanto trascura il flusso di precipitazione o l'irrigazione, scostandosi dalla condizione reale caratterizzante una copertura verde. Un modello complesso e dettagliato è stato proposto da Sailor nel 2008 [34], il quale sviluppa un modello fondato sulle equazioni di bilancio energetico e di massa del FASST [35]; analizza nel dettaglio ogni tipologia di scambio termico interessante il sistema terreno - vegetazione - ambiente esterno, anche se si propone una rappresentazione semplificata del bilancio di acqua e una conducibilità termica del terreno costante. Tale modello è stato poi implementato con il programma di simulazione Energy Plus e validato con dati sperimentali. Il modello è stato poi ripreso nel 2012 da Jaffal [36] che ha simulato e ulteriormente convalidato tale modello soffermandosi sull'impatto della copertura verde sul risparmio energetico, e da Eddine

Ouldboukhitine [37] nello stesso anno; egli ha modificato il modello di Sailor con l'introduzione della variabilità della conducibilità termica del terreno attraverso una funzione lineare dipendente dal contenuto d'acqua. Tale modello, quindi, più complesso e dettagliato è stato poi simulato in Energy Plus V2 e validato con dati sperimentali. Lo stesso autore, poi, nel 2012 ha ripreso il modello precedente arricchito della resistenza stomatica delle piante e della presenza del vento. Nel 2010 Feng e Meng [38] hanno proposto un modello matematico, fondato sempre sul bilancio di calore e di massa, visto la notevole ingerenza del contenuto di acqua sul bilancio energetico globale; si tratta di un approccio pratico e semplificato, fondato per la maggior parte su formulazioni di natura empirica che considera un contributo nuovo rispetto agli studi precedenti, quale il processo di fotosintesi delle piante, ma trascura fenomeni fondamentali come il flusso di precipitazione e la presenza di acqua nel terreno.

Jim e Tsang [39], invece, propongono nel 2011 un modello matematico teorico al fine di individuare la capacità isolante degli strati abiotici, quali drenaggio e impermeabilizzazione, oltre al terreno, costituenti il tetto verde e la loro influenza sulla riduzione del trasferimento di calore tra esterno-interno. Il modello, le cui formulazioni sono prevalentemente di natura empirica, è stato inoltre validato con tre differenti procedure sperimentali. Tale modello rappresenta un'analisi innovativa in relazione alla trattazione degli scambi di calore e di massa riguardanti il terreno in quanto viene proposta la dipendenza della conducibilità termica in funzione del contenuto d'acqua presente nel strato. Uno studio simile è stato condotto sempre dagli stessi autori, nel 2011 per una copertura verde tropicale anche se l'aspetto conduttivo non viene trattato con analogo interesse e approfondimento. Per ultimo, ma di notevole importanza, è il modello sviluppato da Tabares-Velasco [40], il quale si fonda su un bilancio di massa e di calore per tre differenti condizioni: copertura parziale, totale o assenza di vegetazione. Richiama alcune formulazioni fisiche già adottate nei precedenti studi ed effettua per alcune di esse delle modifiche, in particolar modo relativamente alla trattazione della evapotraspirazione; introduce inoltre una nuova equazione lineare della conducibilità termica del terreno in funzione del contenuto di acqua. È stato inoltre creato un nuovo apparato sperimentale denominato Cold Plate. I dati sperimentali risultanti hanno validato il modello proposto. Per quanto concerne le simulazioni energetiche e l'apparato sperimentale, è possibile affermare che la maggior parte degli studi hanno concentrato la ricerca su tre fattori principali: evapotraspirazione, resistenza delle piante, flussi di calore. Le simulazioni sono state condotte per definire una analisi di sensibilità dei modelli matematici, rilevando il grado di influenza di uno specifico parametro sul bilancio energetico globale, mantenendo costanti gli altri. La motivazione principale per cui si ricorre all'utilizzo di un apparato sperimentale è la determinazione dell'affidabilità del modello matematico in esame. Le prime procedure sperimentali sono state condotte in Germania nel 1970. Molti studi sono stati condotti nel corso degli anni anche nell'America settentrionale per quantificare il possibile risparmio energetico conseguibile con una copertura a verde. Wong [41], in particolare ha confrontato il consumo energetico tra una copertura verde e un tetto tradizionale e ha effettuato sperimentazione sulla resistenza del tetto verde. Lazzarin **Error! Reference source not found.** ha focalizzato l'attenzione sul contributo dell'evapotraspirazione; Takahashi, nel 2004 [41], sviluppa invece un nuovo codice di simulazione al fine di quantificare i flussi di calore caratterizzante l'isola di calore dell'area urbana della città di Kyoto; Kokogiannakis [42] fonda il suo studio su una serie di simulazioni attraverso il software EnergyPlus al fine di definire le capacità di risparmio energetico delle coperture verdi nelle principali zone climatiche cinesi. Lo studio condotto recentemente da Tabares-Velasco [40] si pone

come unico esempio scientifico completo definente un proprio modello matematico, rappresentante tutti i processi di trasferimento di calore e di massa costituenti un tetto verde, un nuovo apparato sperimentale denominato Cold Plate e un processo di validazione dei risultati teorici con quelli sperimentali. Una raccolta schematica e sintetica degli articoli presenti in letteratura relativamente alla modellazione matematica dei tetti verdi è stata elaborata da Rabah Djedjig, Salah-Eddine Ouldboukhitine, Rafik Belarbi, Emmanuel Bozonnet nel 2012 [43] ed è di seguito riportata:

<i>Modello</i>	<i>Assunzioni</i>	<i>Descrizione</i>
<i>P.C. Tabares Velasco, 2011</i>	- regime stazionario - inerzia termica del substrato trascurata	Modello basato su osservazioni sperimentali in laboratorio
<i>S.E. Ouldboukhitine, 2011</i>	- inerzia termica del substrato trascurata - Proporzioni costanti della miscela di aria nel fogliame	Basato sulla modifica del modello di Sailor relativamente all'influenza del contenuto d'acqua sulle proprietà del substrato utilizzando l'equazione di Penman-Monteith
<i>H.He, C.Y.Jim 2010</i>	- Vegetazione considerata multistrato con proprietà radiative della vegetazione semitrasparente	Sviluppo di un modello sull'efficienza dell'ombreggiamento (SEM) fondato sulla teoria della propagazione delle onde elettromagnetiche
<i>C.Feng, 2010</i>	- Fotosintesi come fenomeno rilevante - Temperatura del fogliame nota	Bilancio termico globale della copertura verde estensiva
<i>E.Alexandri, P.Jones, 2007</i>	Non uniformità della temperatura e dell'umidità del fogliame	Risoluzione in forma ridotta delle equazioni differenziali di trasferimento
<i>D.J.Sailor, Frankenstein and G. Koenig, 2004</i>	- Inerzia termica trascurata - Proporzioni costante della miscela di aria nella vegetazione	Basato su due equazioni di bilancio in corrispondenza del fogliame e della superficie del terreno
<i>E. Barrio, 1998</i>	Presenza del flusso di calore convettivo tra le foglie e l'aria presente tra queste	Modello risolto per valore costante di temperatura e di contenuto d'acqua nel terreno

Tabella 2. 4 - Raccolta sintetica degli articoli presenti in letteratura relativamente alla modellazione matematica dei tetti verdi

### 2.2.1 Modello termofisico utilizzato

Dall'analisi effettuata si evincono le performance e la grande affidabilità del modello di D.J.Sailor [34], pertanto è trattata una descrizione dettagliata del suo funzionamento in quanto utilizzato nel presente lavoro.

Titolo: A green roof model for building energy simulation programs. - Autori: D.J.Sailor [34] - Anno: 2008- Istituto: Department of Mechanical and Materials Engineering, Portland State University, Portland, OR, USA. - Obiettivi: Lo studio mira alla definizione di un modello fisico, rappresentante il bilancio energetico di una copertura a verde, da poter implementare nei programmi di simulazione energetica dinamica. Il modello in esame è stato, infatti, incorporato nel software Energy Plus, sviluppato dall' US Department of Energy. La formulazione del modello in esame si fonda su quello dell'Army Corps of Engineers' FASST [35], con l'apporto di alcune modifiche.

#### Assunzioni:

- Le piante e il substrato colturale sono omogenei orizzontalmente;

- Il calore e il trasferimento di massa sono analizzati secondo la sola direzione verticale, mentre i flussi orizzontali sono trascurabili; tale assunzione implica la scelta di un modello monodimensionale.
- I fenomeno di fotosintesi delle piante è trascurabile nell'equazione di bilancio energetico;
- Il trasferimento di calore per conduzione nelle piante è trascurabile;
- Il substrato colturale è considerato equivalente a un continuo omogeneo e isotropo, pertanto le sue proprietà non dipendono dalla direzione.
- Inerzia termica del substrato trascurata;
- Conducibilità termica del terreno costante;
- Equazione di massa semplificata, con flusso di calore dovuto al trasporto verticale di acqua nel terreno trascurata;
- Substrato colturale parzialmente coperto da vegetazione;
- Flusso di precipitazione trascurato.

Descrizione del modello

Analogamente a un tetto tradizionale, l'equazione di bilancio energetico di una copertura a verde è dominato dai contributi radiativi provenienti dal sole, bilanciati dai flussi sensibili (convettivi), latenti (evaporativi) derivanti dal terreno e dalla superficie delle piante, dal flusso conduttivo presente all'interno del substrato colturale e dal contributo termico radiativo nell'infrarosso entrante ed uscente sia dal terreno che dalla superficie delle foglie. Il modello in esame, di seguito rappresentato, definisce due equazioni di bilancio all'interfaccia vegetazione – ambiente esterno e all'interfaccia vegetazione – terreno. Tali equazioni vengono poi linearizzate secondo Deardorff [44] e risolte simultaneamente, ottenendo così i valori di temperatura del terreno e del fogliame.

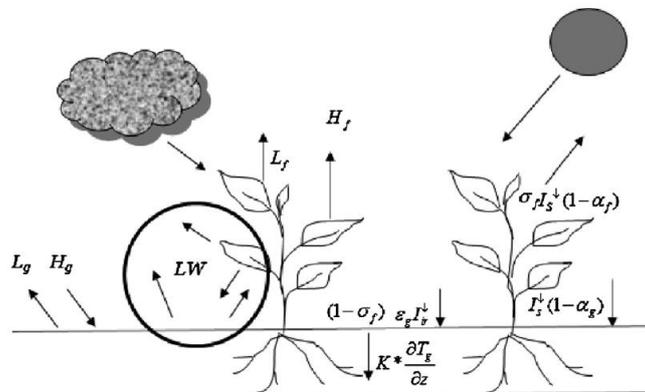


Figura 2. 16 - Rappresentazione degli scambi termici tra vegetazione – terreno - ambiente esterno.

- $H_g$  :flusso di calore sensibile del terreno [ $W/m^2$ ];
- $H_f$  :flusso di calore sensibile del fogliame [ $W/m^2$ ];
- $L_g$  : flusso di calore latente del terreno [ $W/m^2$ ];
- $L_f$  : flusso di calore latente del fogliame [ $W/m^2$ ];
- $LW$  : radiazione a onde lunghe [ $W/m^2$ ];
- $I_s$  : radiazione solare [ $W/m^2$ ];

Equazione di bilancio energetico sul fogliame.

$$F_f = \sigma_f [I_s (1 - \alpha_f) + \epsilon_f I_{ir} - \epsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \epsilon_g \epsilon_f \sigma}{\epsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f$$

Dove  $F_f$ : flusso di calore netto del fogliame [ $W/m^2$ ],  $I_s$ : flusso radiativo totale entrante a onde corte [ $W/m^2$ ],  $I_{ir}$ : flusso radiativo totale entrante a onde lunghe [ $W/m^2$ ],  $T_f$ : temperatura del fogliame[K],  $T_g$ : temperatura superficiale del terreno [K],  $\alpha_f$ : albedo a onde corte della vegetazione, funzione del tipo di vegetazione e della stagione. Tale parametro rappresenta la riflessività della superficie alla incidenza della radiazione solare,  $\varepsilon_f = 0.90 + F(T_g)[0.96 - 0.90]$  è l'emissività della vegetazione considerata di valore equivalente al coefficiente di assorbimento del fogliame nell'infrarosso  $a^{air}$ ,  $F(T_g) = 1.0 - 0.0016[298.0 - T_g]^2$ ,  $\varepsilon_g = 0.92 \div 0.97$  indica l'emissività della superficie del terreno,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g$ ,  $\sigma$ : costante di Stefan-Boltzmann [ $5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$ ],  $\sigma_f$ : frazione di copertura vegetativa. Se tale valore non è noto, può essere calcolato usando il metodo sviluppato da Ramirez e Senarath [46]:

$$\sigma_f = \begin{cases} \sigma_f = 1 - \exp(-0.75LAI) & \text{per piante grasse} \\ \sigma_{f,max} & T_g > 298.0 & \text{per altri tipi di piante} \\ \sigma_{f,min} & T_g < 273.15 \\ \sigma_{f,max} - [1 - F(T_g)][\sigma_{f,max} - \sigma_{f,min}] & 273.15 \leq T_g \leq 298.0 \end{cases}$$

Dove

$$LAI = LAI_{min} + F(T_g)[LAI_{max} - LAI_{min}]$$

$$F(T_g) = 1.0 - 0.0016[298.0 - T_g]^2$$

I valori di  $LAI_{max}$ ,  $LAI_{min}$ ,  $\sigma_{f,min}$ ,  $\sigma_{f,max}$  sono definiti in Tabella 2. 5:

Biome	high/ medium/ low	$\sigma_{f,max}^*$ (%)	$\sigma_{f,min}^*$ (%)	$LAI_{max}^*$ ( $m^2/m^2$ )	$LAI_{min}^*$ ( $m^2/m^2$ )	$S/A^*$ ( $m^2/m^2$ )
crop	m	85	25	6.0	0.5	0.5
short grass	l	80	70	2.0	0.5	4.0
tall grass	m	80	50	6.0	0.5	2.0
desert	l	5	0	2.0	0	0.5
tundra	m	60	40	6.0	0.5	0.5
irrigated crops	m	80	20	6.0	0.5	0.5
semidesert	m	10	0	6.0	0.5	2.0
bog/marsh	l	80	40	6.0	0.5	2.0
evergreen shrub	h	80	60	6.0	5.0	2.0
deciduous shrub	h	80	50	6.0	1.0	2.0

Tabella 2. 5 - Proprietà della vegetazione di bassa altezza[35]

Il termine  $LAI [m^2/m^2]$  è definito come l'area totale occupata dalla proiezione orizzontale delle foglie.

$\sigma_f I_s (1 - \alpha_f)$ : flusso solare a onde corte assorbito dalla vegetazione al netto del contributo riflesso dalla stessa.

$\sigma_f \varepsilon_f I_{ir}$ : aliquota di radiazione entrante nell'infrarosso assorbita dalla vegetazione, in funzione della emissività del fogliame.

$\sigma_f \varepsilon_f \sigma T_f^4$ : flusso radiativo nell'infrarosso uscente dalla vegetazione e dipendente dalla costante di Boltzmann, dalla temperatura del fogliame e dalla sua emissività. La somma di tali tre contributi rappresenta lo scambio radiativo, a onde lunghe e corte, vigente tra vegetazione e ambiente esterno.

$\frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4)$ : scambio radiativo tra vegetazione e terreno, includente la aliquota emessa e assorbita dalla vegetazione; essa è ottenuta attraverso il metodo additivo del trasferimento radiativo di due strati caratterizzati da riflessioni multiple.

$H_f = (1.1LAI\rho_{af}C_{p,a}C_fW_{af})(T_{af} - T_f)$  è il trasferimento di calore sensibile tra il fogliame e l'aria esistente tra le foglie [ $W/m^2$ ];

$LAI$ : indice di area fogliame [ $m^2/m^2$ ];

$(T_{af} - T_f)$ : differenza di temperatura tra l'aria presente tra le foglie e la vegetazione, con  $T_{af} = (1 - \sigma_f)(T_a) + \sigma_f(0.3T_a + 0.6T_f + 0.1T_g)$  formulato secondo Deardorff in funzione della temperatura del terreno  $T_g$ , della temperatura del fogliame  $T_f$  e della temperatura dell'aria all'altezza dello strumento di misurazione  $T_a$  [44];

$\rho_{af} = 0.5(\rho_a + \rho_f)$  rappresenta la densità dell'aria nel fogliame [ $kg/m^3$ ] ottenuta come media aritmetica tra la densità dell'aria  $\rho_a$  e della vegetazione  $\rho_f$ , entrambe calcolate secondo la legge dei gas ideali;

$C_{p,a} = 1005.6$  [ $J/kgK$ ] è il calore specifico dell'aria a pressione costante;

$C_f = 0.01 \left(1 + \frac{0.3}{W_{af}}\right)$  è il coefficiente di bulk, definito da Deardorff [44] in funzione della velocità

del vento tra le foglie  $W_{af} = 0.83\sigma_f W' \sqrt{C_{hn}^f + (1 - \sigma_f)W'}$ ;

$W'$ : velocità del vento corretto [ $m/s$ ] corrispondente a

$$W' = \begin{cases} 2 \text{ m/s} & \text{se la velocità del vento è } W < 2 \text{ m/s} \\ W & \text{se la velocità del vento è } W > 2 \text{ m/s} \end{cases}$$

Nel caso in esame è risultato  $W' = W$  essendo  $W > 2$  m/s.

$C_{hn}^f = \left[ k / \ln \left( \frac{z_a - z_d}{z_0^f} \right) \right]^2$  rappresenta il coefficiente di bulk in corrispondenza della sommità del fogliame indicativo del trasferimento di impulso tra atmosfera e fogliame.

$k = 0.4$  è la costante di Von Karman,  $z_0^f$  è indice della scabrezza [ $m$ ] e si definisce come l'altezza in corrispondenza della quale la velocità del vento tende a zero;  $z_a$  e  $z_d$  rappresentano rispettivamente la distanza verticale in cui è posta lo strumento di misurazione e l'altezza in cui la velocità del vento è effettivamente nulla. Noto il valore di  $Z_f$  corrispondente all'altezza della vegetazione, si avrà secondo le formulazioni di Balik [44]:

$$z_a = 0.701 Z_f^{0.979} \text{ [m]}$$

$$z_d = 0.131 Z_f^{0.997} \text{ [m]}$$

$L_f = l_f LAI \rho_{af} C_f W_{af} r'' (q_{af} - q_{f,sat})$  è il flusso di calore latente scambiato tra il fogliame e l'atmosfera circostante, definita dalle formulazioni di Deardorff [ $W/m^2$ ] [44].

$LAI$ : indice di area fogliame [ $m^2/m^2$ ];

$l_f = 1.91846 \cdot 10^6 \cdot \left[ \frac{T_f}{T_f - 33.91} \right]^2$  calore latente di vaporizzazione [ $J/kg$ ] definito secondo Henderson-Sellers in funzione della temperatura del fogliame  $T_f$  [47];

$(q_{af} - q_{f,sat})$ : descrive la differenza tra il titolo della miscela di aria in corrispondenza della superficie della vegetazione e titolo della miscela di aria satura del fogliame; in particolare si avrà secondo Balik e Deardorff:

$$q_{af} = \frac{[(1-\sigma_f)q_a + \sigma_f(0.3q_a + 0.6q_{f,sat} \cdot r'' + 0.1q_{g,sat}M_g)]}{[1-\sigma_f[0.6(1-r'') + 0.1(1-M_g)]}$$

Con  $q_a$  la porzione di aria mista ed  $M_g=0\div 1$  è il fattore rappresentante la porzione di contenuto d'acqua volumetrico nel terreno in relazione alla sua porosità.

$\rho_{af} = 0.5(\rho_a + \rho_f)$  rappresenta la densità dell'aria nel fogliame [ $\text{kg/m}^3$ ] ottenuta come media aritmetica tra la densità dell'aria  $\rho_a$  e della vegetazione  $\rho_f$ , entrambe calcolate secondo la legge dei gas ideali;

$C_f = 0.01 \left(1 + \frac{0.3}{W_{af}}\right)$  è il coefficiente di bulk per flusso di calore turbolento nel fogliame, definito da

Deardorff [44] in funzione della velocità del vento tra le foglie  $W_{af} = 0.83\sigma_f W' \sqrt{C_{hn}^f + (1-\sigma_f)W'}$ ;

$W'$ : velocità del vento corretto [m/s] corrispondente a

$$W' = \begin{cases} 2 \text{ m/s} & \text{se la velocità del vento è } W < 2 \text{ m/s} \\ W & \text{se la velocità del vento è } W > 2 \text{ m/s} \end{cases}$$

Nel caso in esame è risultato  $W' = W$  essendo  $W > 2$  m/s.

$C_{hn}^f = \left[ \frac{k}{\ln\left(\frac{z_a - z_d}{z_0^f}\right)} \right]^2$  rappresenta il coefficiente di bulk in corrispondenza della sommità del fogliame per condizioni atmosferiche neutrali;

$k=0.4$  è la costante di Von Karman,  $z_0^f$  è indice della scabrezza del fogliame [m] e si definisce come l'altezza in corrispondenza della quale la velocità del vento tende a zero;  $z_a$  e  $z_d$  rappresentano rispettivamente la distanza verticale in cui è posta lo strumento di misurazione e l'altezza in cui la velocità del vento è effettivamente nulla. Noto il valore di  $Z_f$  corrispondente all'altezza della vegetazione, si avrà secondo le formulazioni di Balik [45]:

$$z_a = 0.701 Z_f^{0.979} \text{ [m]}$$

$$z_d = 0.131 Z_f^{0.997} \text{ [m]}$$

$r'' = \frac{r_a}{r_a + r_s}$  rappresenta il fattore di umidità della superficie del fogliame, dato dalla combinazione della resistenza aerodinamica e di quella stomatica alla diffusione del vapore;

$r_a = \frac{1}{C_f W_{af}}$  è la resistenza aerodinamica funzione del coefficiente di bulk per trasmissione di calore turbolento nel fogliame  $C_f$  e della velocità del vento all'interfaccia fogliame-aria  $W_{af}$  [m/s];

$r_s = \frac{r_{s,min}}{LAI} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$  rappresenta la resistenza stomatica della vegetazione alla diffusione del vapore [s/m]. Il fenomeno traspirativo delle piante, infatti, viene controllato dal movimento di apertura e chiusura degli stomi che varia a seconda dell'intensità di illuminazione, del contenuto d'acqua del terreno e della differenza di pressione tra l'interno della foglia e l'aria limitrofa.

$r_{s,min}$ : resistenza stomatica minima;

L'inverso dei fattori  $f_1, f_2, f_3$  è determinato attraverso la formulazione di Koenig [48] come segue:

$$\frac{1}{f_1} = \min \left[ 1, \frac{0.04I_s + 0.005}{0.81 \cdot (0.004I_s + 1)} \right]$$

$$\frac{1}{f_2} = \begin{cases} 0 & \text{quando } \theta_r > \theta' \\ \frac{\theta' - \theta_r}{\theta_{max} - \theta_r} & \text{quando } \theta_r \leq \theta \leq \theta' \end{cases}$$

$$\frac{1}{f_3} = \exp[-g_d(e_{f,sat}-e_a)]$$

Con:  $I_s$ : flusso radiativo totale entrante a onde corte [ $W/m^2$ ],  $g_d$ : caratteristica specifica delle piante diversa da zero solo per gli alberi,  $e_{f,sat}$ : pressione di vapore saturo alla temperatura del fogliame [Pa],  $e_a$ : pressione di vapore dell'aria [Pa],  $\theta_r$ : valore del contenuto di acqua residuo, in corrispondenza del quale le piante iniziano ad appassire [ $m^3/m^3$ ]; generalmente esso corrisponde a  $\theta_r=0.01 m^3/m^3$ ,  $\theta'$ : contenuto di acqua nella zona delle radici [ $m^3/m^3$ ],  $\theta_{max}$ : massimo contenuto di acqua che un particolare tipo di terreno può trattenere e oltre il quale l'acqua non può essere più assorbita [ $m^3/m^3$ ]; esso generalmente varia tra  $0.3 \div 0.6 m^3/m^3$ ;

*Equazione di bilancio energetico sul terreno.*

$$F_g = (1 - \sigma_f)[I_s(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir} - \varepsilon_g \sigma T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + k \frac{\partial T_g}{\partial z}$$

Dove  $\alpha_g = 0.23 \div 0.40$  è l'albedo a onde corte della superficie del terreno, funzione del tipo di terreno,  $\varepsilon_f = 0.90 + F(T_g)[0.96 - 0.90]$  è l'emissività della vegetazione considerata di valore equivalente al coefficiente di assorbimento del fogliame nell'infrarosso  $a^{air}$ ,  $F(T_g) = 1.0 - 0.0016[298.0 - T_g]^2$ ,  $\varepsilon_g: 0.92 \div 0.96$  rappresenta l'emissività della superficie del terreno, funzione del tipo di terreno ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g$ ),  $\sigma$ : costante di Stefan-Boltzmann [ $5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$ ],  $\sigma_f$ : frazione di copertura vegetativa precedentemente definito.

$$LAI = LAI_{min} + F(T_g)[LAI_{max} - LAI_{min}]$$

$$F(T_g) = 1.0 - 0.0016[298.0 - T_g]^2$$

I valori di  $LAI_{max}$ ,  $LAI_{min}$ ,  $\sigma_{f,min}$ ,  $\sigma_{f,max}$  sono definiti in Tabella 2. 5

Dove:  $F_g$ : flusso di calore netto alla superficie del terreno [ $W/m^2$ ],  $I_s$ : flusso radiativo totale entrante a onde corte [ $W/m^2$ ],  $I_{ir}$ : flusso radiativo totale entrante a onde lunghe [ $W/m^2$ ],  $T_f$ : temperatura del fogliame [K],  $T_g$ : temperatura superficiale del terreno [K].

$(1 - \sigma_f)I_s(1 - \alpha_g)$ : flusso solare a onde corte, non intercettata dalla vegetazione, assorbito dal substrato vegetativo al netto del contributo riflesso dallo stesso.

$(1 - \sigma_f)\varepsilon_g I_{ir}$ : aliquota di radiazione nell'infrarosso, non intercettata dal fogliame, incidente sul terreno, funzione della emissività dello stesso.

$(1 - \sigma_f)\varepsilon_g \sigma T_g^4$ : flusso radiativo nell'infrarosso uscente dal terreno e dipendente dalla costante di Boltzmann, dalla temperatura del terreno e dalla sua emissività. La somma di tali tre contributi rappresenta lo scambio radiativo, a onde lunghe e corte, vigente tra il substrato colturale e l'ambiente esterno.

$\frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4)$  descrive lo scambio radiativo tra vegetazione e terreno; essa è ottenuta attraverso il metodo additivo del trasferimento radiativo di due strati caratterizzati da riflessioni multiple.

$k \frac{\partial T_g}{\partial z}$  rappresenta il trasferimento di massa per conduzione all'interno del substrato, con  $k$  la conduttività termica del terreno in corrispondenza della superficie [ $W/mK$ ] ipotizzata con valore costante e  $T_g$  la temperatura del terreno [K];

$H_g = \rho_{ag} C_{p,a} C_{h,g} W_{af} (T_{af} - T_g)$  è il trasferimento di calore sensibile tra la superficie del terreno e l'aria [ $W/m^2$ ];

$(T_{af} - T_g)$ : differenza di temperatura tra l'aria presente tra le foglie e la superficie del terreno, con  $T_{af} = (1 - \sigma_f)(T_a) + \sigma_f(0.3T_a + 0.6T_f + 0.1T_g)$  formulato secondo Deardorff in funzione della temperatura del terreno  $T_g$ , della temperatura del fogliame  $T_f$  e della temperatura dell'aria all'altezza dello strumento di misurazione  $T_a$  [44];

$\rho_{ag} = 0.5(\rho_a + \rho_g)$  rappresenta la densità dell'aria in corrispondenza della temperatura della superficie del terreno  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ , ottenuta come media aritmetica tra la densità dell'aria  $\rho_a$  e del terreno stesso  $\rho_g$ , entrambe calcolate secondo la legge dei gas ideali;

$C_{p,a} = 1005.6$   $[\text{J}/\text{kgK}]$  è il calore specifico dell'aria a pressione costante;

$C_{hg} = \Gamma_h(1 + \sigma_f)C_{hng} + \sigma_f C_{hnf}$  è il coefficiente di bulk per flusso di calore sensibile in corrispondenza del terreno, definito in funzione dei coefficienti di bulk in condizioni atmosferiche neutrali  $C_{hng}$ ,  $C_{hnf}$  e di un fattore correttivo  $\Gamma_h$  definito per condizioni atmosferiche neutrali.

$C_{hnf} = \left[ k / \ln \left( \frac{z_a - z_d}{z_0^f} \right) \right]^2$  rappresenta il coefficiente di bulk in corrispondenza della sommità del fogliame per condizioni atmosferiche neutrali;

$k=0.4$  è la costante di Von Karman,  $z_0^f$  è indice della scabrezza del fogliame  $[\text{m}]$  e si definisce come l'altezza in corrispondenza della quale la velocità del vento tende a zero;  $z_a$  e  $z_d$  rappresentano rispettivamente la distanza verticale in cui è posta lo strumento di misurazione e l'altezza in cui la velocità del vento è effettivamente nulla. Noto il valore di  $Z_f$  corrispondente all'altezza della vegetazione, si avrà secondo le formulazioni di Balik [45]:

$$z_a = 0.701 Z_f^{0.979} \text{ [m]}$$

$$z_d = 0.131 Z_f^{0.997} \text{ [m]}$$

$C_{hng} = r_{ch}^{-1} \cdot \left[ \frac{k}{\ln \left( \frac{z_a}{z_{o,g}} \right)} \right]^2$  rappresenta il coefficiente di bulk vicino al terreno in condizioni

atmosferiche neutrali, funzione della costante di Von Karman  $k=0.4$ , della distanza verticale in cui è posta lo strumento di misurazione  $z_a$ , della scabrezza del terreno  $z_{o,g} = 0.001$  m per tutti i tipi di terreno, del numero di Schmidt  $r_{ch} = 0.63$  per tutti i tipi di terreno.

$$\Gamma_h = \begin{cases} \frac{1.0}{(1.0 - 16.0 R_{ib})^{0.5}} & R_{ib} < 0.0 \\ \frac{1.0}{(1.0 - 5.0 R_{ib})^{0.5}} & R_{ib} = 0.0 \\ R_{ib} = \frac{2gZ_a(T_{af} - T_g)}{(T_{af} - T_g)W_{af}^2} \end{cases}$$

Con:

$R_{ib}$ : numero di bulk Richardson, dipendente dalla temperatura del terreno  $T_g$   $[\text{K}]$ , temperatura dell'aria presente tra le foglie  $T_{af}$   $[\text{K}]$ , ;

$g = 9.81$   $\text{m}/\text{s}^2$  costante gravitazionale;

$W_{af} = 0.83\sigma_f W' \sqrt{C_{hnf}} + (1 - \sigma_f)W'$  è la velocità del vento tra le foglie, ove:

$W'$ : velocità del vento corretta  $[\text{m}/\text{s}]$  corrispondente a

$$W' = \begin{cases} 2 \text{ m/s} & \text{se la velocità del vento è } W < 2 \text{ m/s} \\ W & \text{se la velocità del vento è } W > 2 \text{ m/s} \end{cases}$$

Nel caso in esame è risultato  $W' = W$  essendo  $W > 2$   $\text{m}/\text{s}$ .

$L_g = \rho_{a,g} C_{e,g} l_g W_{af} (q_{af} - q_g)$  è il flusso di calore latente scambiato tra la superficie del terreno e l'atmosfera circostante, definita dalle formulazioni di Deardorff [ $\text{W/m}^2$ ] [44].

$l_g = 1.91846 \cdot 10^6 \cdot \left[ \frac{T_f}{T_f - 33.91} \right]^2$  rappresenta il calore latente di vaporizzazione [ $\text{J/kg}$ ] definito secondo

Henderson-Sellers in funzione della temperatura del fogliame  $T_f$ ;

$\rho_{a,g} = 0.5(\rho_a + \rho_g)$  rappresenta la densità dell'aria in corrispondenza della superficie del terreno [ $\text{kg/m}^3$ ] ottenuta come media aritmetica tra la densità dell'aria  $\rho_a$  e della terreno stesso  $\rho_g$ , entrambe calcolate secondo la legge dei gas ideali;

$(q_{af} - q_g)$ : descrive la differenza tra il titolo della miscela di aria in corrispondenza della superficie della vegetazione e il titolo della miscela di aria all'interfaccia del terreno; in particolare si avrà secondo Balik e Deardorff:

$$q_{af} = \frac{[(1 - \sigma_f)q_a + \sigma_f(0.3q_a + 0.6q_{f,sat} \cdot r'' + 0.1q_{g,sat}M_g)]}{[1 - \sigma_f[0.6(1 - r'') + 0.1(1 - M_g)]}$$

Con  $q_a$  la porzione di aria mista;

$$q_g = M_g q_{g,sat} + (1 - M_g) q_{af}$$

$M_g = 0 \div 1$  è il fattore rappresentante la porzione di contenuto d'acqua volumetrico nel terreno in relazione alla sua porosità;

$q_{g,sat}$ : porzione di miscela satura in corrispondenza del terreno;

$C_{e,g} = \Gamma_e (1 + \sigma_f) C_{eng} + \sigma_f C_{hnf}$  è il coefficiente di bulk per flusso di calore latente in corrispondenza del terreno, definito in funzione dei coefficienti di bulk in condizioni atmosferiche neutrali  $C_{eng}$ ,  $C_{hnf}$  e di un fattore correttivo di stabilità per il calore latente  $\Gamma_e$  definito per condizioni atmosferiche neutrali.

$C_{eng} = r_{ce}^{-1} \cdot \left[ \frac{k}{\ln\left(\frac{z_{rh}}{z_{o,g}}\right)} \right]^2$  rappresenta il coefficiente di bulk vicino al terreno in condizioni

atmosferiche neutrali, funzione della costante di Von Karman  $k=0.4$ , della distanza verticale sopra il terreno in cui è posto lo strumento di misurazione dell'umidità relativa  $z_{rh}$ , della scabrezza del terreno  $z_{o,g} = 0.001$  m per tutti i tipi di terreno, del numero turbolento di Prandtl  $r_{ce} = 0.71$  per tutti i tipi di terreno.

$C_{hnf} = \left[ k / \ln\left(\frac{z_a - z_d}{z_0^f}\right) \right]^2$  rappresenta il coefficiente di bulk in corrispondenza della sommità del fogliame per condizioni atmosferiche neutrali;

$k=0.4$  è la costante di Von Karman,  $z_0^f$  è indice di scabrezza del fogliame [m] e si definisce come l'altezza in corrispondenza della quale la velocità del vento tende a zero;  $z_a$  e  $z_d$  rappresentano rispettivamente la distanza verticale in cui è posta lo strumento di misurazione e l'altezza in cui la velocità del vento è effettivamente nulla. Noto il valore di  $Z_f$  corrispondente all'altezza della vegetazione, si avrà secondo le formulazioni di Balik [45]:

$$z_a = 0.701 Z_f^{0.979} \text{ [m]}$$

$$z_d = 0.131 Z_f^{0.997} \text{ [m]}$$

$$\Gamma_e = \begin{cases} \frac{1.0}{(1.0 - 16.0 R_{ib})^{0.5}} & R_{ib} < 0.0 \\ \frac{1.0}{(1.0 - 5.0 R_{ib})^{0.5}} & R_{ib} = 0.0 \\ R_{ib} = \frac{2gZ_a(T_{af} - T_g)}{(T_{af} - T_g)W_{af}^2} \end{cases}$$

Con:

$R_{ib}$ : numero di bulk Richardson, dipendente dalla temperatura del terreno  $T_g$  [K], temperatura dell'aria presente tra le foglie  $T_{af}$  [K];

$g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$  costante gravitazionale;

$W_{af} = 0.83\sigma_f W' \sqrt{C_{hn}^f} + (1 - \sigma_f)W'$  è la velocità del vento tra le foglie, ove:

$W'$ : velocità del vento corretta [m/s] corrispondente a

$$W' = \begin{cases} 2 \text{ m/s} & \text{se la velocità del vento è } W < 2 \text{ m/s} \\ W & \text{se la velocità del vento è } W > 2 \text{ m/s} \end{cases}$$

Nel caso in esame è risultato  $W' = W$  essendo  $W > 2 \text{ m/s}$ .

Per effettuare la risoluzione numerica del problema, si effettua la linearizzazione di Deardorff dei termini del quarto ordine  $T_f^4$  e  $T_g^4$  e dei termini di miscela satura  $q_{g,sat}$  e  $q_{f,sat}$ :

$$\begin{aligned} [T_f^{(n+1)}]^4 &= [T_f^n]^4 + 4[T_f^n]^3 [T_f^{n+1} - T_f^n] \\ [T_g^{(n+1)}]^4 &= [T_g^n]^4 + 4[T_g^n]^3 [T_g^{n+1} - T_g^n] \end{aligned}$$

Ove  $T_f^{(n+1)}$  e  $T_g^{(n+1)}$  sono le temperature in Kelvin rispettivamente del fogliame del terreno al corrente istante di tempo.

Il titolo della miscela di aria satura in corrispondenza della temperatura del terreno e del fogliame è:

$$q_{g,sat}(T_g^{(n+1)}) = q_{sat}(T_g^n) + \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial T}\right)_{T_g^n} (T_g^{(n+1)} - T_g^n)$$

$$q_{f,sat}(T_f^{(n+1)}) = q_{sat}(T_f^n) + \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial T}\right)_{T_f^n} (T_f^{(n+1)} - T_f^n)$$

Ove  $q_{sat}(T_g^n) = \frac{0.622e^*(T_g^n)}{P - e^*(T_g^n)}$  rappresenta il titolo della miscela di aria satura al precedente istante, formulata da Balik [44];

$e^* = 611.2 \exp\left[17.67 \left(\frac{T_g^n - 273.15}{T_g^n - 29.65}\right)\right]$  è la pressione di vapore saturo [Pa] valutata alla temperatura del terreno al precedente istante di tempo  $T_g^n$ ,  $P$  è invece la pressione atmosferica [Pa].

Derivando il contributo di miscela satura si avrà:

$$\frac{dq^*}{dT_g^n} = \left[ \frac{0.622P}{(P - 0.378e^*)^2} \right] \left( \frac{de^*}{dT_g^n} \right)$$

Dalla legge di Clausius-Clapeyron è possibile calcolare il contributo della pressione di vapore saturo:

$\frac{de^*}{dT_g^n} = \frac{l_g e^*(T_g^n)}{(R_v (T_g^n)^2)}$  con  $R_v$  la costante dei gas riferito al vapore acqueo ed  $l_g$  il calore latente di vaporizzazione [J/kg] riferito alla temperatura della superficie del terreno.

Con procedimento analogo si avrà:

$$q_{sat}(T_f^n) = \frac{0.622 e^*(T_f^n)}{P - e^*(T_f^n)}$$

Le equazioni finali, per la risoluzione numerica del problema saranno:

$$\begin{aligned} C_{1,f} + C_{2,f} T_g + C_{3,f} T_f &= 0 \\ C_{1,g} + C_{2,g} T_g + C_{3,g} T_f &= 0 \end{aligned}$$

I coefficienti presenti in tale sistema di equazioni derivano dalla combinazione diretta delle equazioni precedentemente riportate.

Risolvendo il sistema è possibile ottenere simultaneamente le incognite  $T_g$  e  $T_f$ .

La differenza di implementazione rispetto al FASST è che il termine conduttivo presente nell'espressione di  $C_{1,g}$  e  $C_{2,g}$  sono risolti in Energy Plus con il metodo CTF (Conduction Transfer Function).

#### *Analisi di sensibilità*

È stata condotta una analisi di sensibilità al fine di esplorare come si modifica il bilancio energetico della copertura verde alla variazione di alcuni parametri fondamentali, quali lo spessore medio del terreno, l'indice di area fogliame, l'irrigazione. L'analisi è stata condotta considerando un edificio di riferimento situato a Chicago e un altro locato a Houston, entrambi definiti da per mezzo del programma di simulazione EnergyPlus. Tali località sono state scelte arbitrariamente, ma appositamente con differenti condizioni climatiche; Chicago, infatti, è caratterizzata da stagioni estive temperate e alquanto umide con inverni freddi. Houston, invece, presenta estati calde e umide e inverni miti. Dalle simulazioni effettuate si evince che la copertura verde presa in esame a Chicago risponde in modo sensibile alla variazione dei parametri nella stagione invernale, mentre il tetto verde di Houston risponde sensibilmente nel periodo estivo.

Le simulazioni esplorano come variano le prestazioni energetiche della copertura verde in funzione di :

- Indice di area fogliame: ponendo LAI=5 si ottiene un incremento dei consumi dei gas in inverno e una riduzione del consumo di energia elettrica in estate. In generale aumentando l'indice LAI si registra un risparmio di consumo energetico in entrambe le città, specialmente in Houston.
- Irrigazione del terreno: la valutazione avviene esclusivamente nella stagione estiva, rilevando che un maggiore risparmio di energia elettrica avviene in Chicago.

Osservazioni conclusive:

- 1- Uno strato di terreno più spesso comporta un aumento dell'isolamento, riducendo di conseguenza la domanda di raffreddamento e riscaldamento durante l'anno, specialmente nelle città climaticamente più fredde;
- 2- L'aumento della densità di vegetazione riduce il consumo di energia elettrica in estate, ma aumenta l'utilizzo degli impianti di riscaldamento in inverno, a causa del fenomeno di ombreggiamento della vegetazione benefico solo in estate;
- 3- L'incremento dell'irrigazione estiva risulta più benefica nella città meno umida.

### 2.2.2 Software

Nel presente lavoro è stata utilizzata l'interfaccia grafica disponibile nel software Design Builder [49] che, nato da un progetto europeo, si propone come uno strumento di grande qualità e attendibilità per lo studio di edifici semplici e complessi. La precisione dei calcoli viene garantita attraverso l'implementazione dell' Energy Plus, sviluppato dal ministero dell'energia degli Stati Uniti (DOE) a seguito della prima crisi energetica del 1974, privo però di interfaccia grafica.

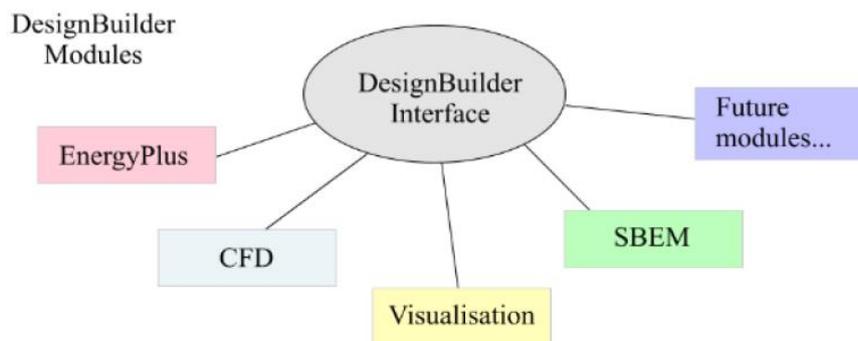


Figura 2. 17 - Moduli del Design Builder.

La particolarità di tale sistema consiste nel principio di funzionamento fondato su un metodo dinamico che porta risultati molto accurati.

I principali utilizzi del software Design Builder sono: Analizzare tipologie di facciate per quantificare gli effetti di surriscaldamento, utilizzo dell'energia e impatto visivo dell'edificio; Calcolare il consumo energetico dell'edificio; Valutare l'uso ottimale della luce naturale. Modellare sistemi di controllo di illuminazione e calcolare i risparmi in illuminazione elettrica. Visualizzare le ombre solari in qualsiasi periodo dell'anno. Simulare il comportamento termico di edifici ventilati naturalmente. Calcolare le potenze di impianti di riscaldamento e condizionamento. In particolare l'Energy Plus offre informazioni relativamente ai seguenti parametri: consumo di energia; emissioni di CO<sub>2</sub>; condizioni di comfort; temperature all'interno dell'edificio; consumi dei componenti HVAC; modelli per il controllo dell'illuminazione; ventilazione naturale; trasmissione del calore attraverso i vari componenti edilizi.

#### Processo di Modellazione

L'interfaccia di Design Builder offre la possibilità di creare il modello geometrico e termofisico dell'edificio.

La costruzione dell'edificio, la definizione degli elementi strutturali che lo compongono e le proprietà di ogni elemento vengono definite secondo una logica cosiddetta gerarchica o "a cascata" in cui si procede dal generale al particolare attribuendo in generale i parametri di input secondo la categoria predominante e particolarizzandoli secondo le necessità per i singoli elementi di dettaglio. L'ereditarietà dei dati si sviluppa, quindi, secondo tale gerarchia: Terreno; Edificio; Blocchi; Zone; Superfici; Finestre.

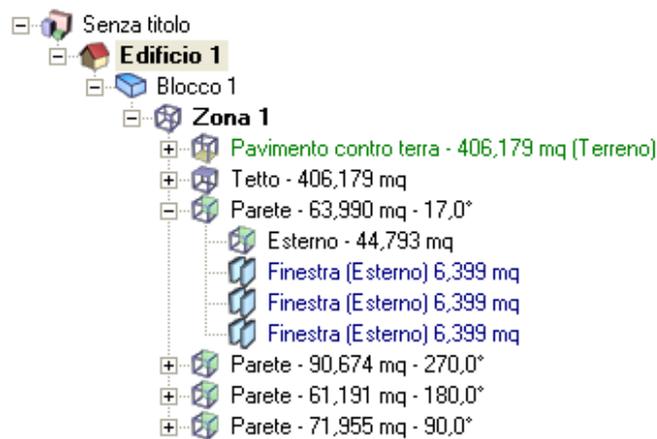


Figura 2. 18 - Esempio di costruzione “a cascata” nel Design Builder.

Le caratteristiche che vengono attribuite al livello superiore vengono sempre ereditate dai livelli sottostanti, pertanto le impostazioni validate a livello dell’edificio divengono attive in tutti gli elementi che lo compongono.

È possibile, inoltre, modificare le impostazioni ereditate solo per un singolo livello, lasciando inalterati gli altri. Tali proprietà vengono definite attraverso la categoria dei “Template” e dei “Componenti”; i primi sono dei database generici, i secondi rappresentano dei database di singoli elementi; l’insieme dei componenti definisce il Template.

### Creazione del Modello

Il primo passo è quello di definire i dettagli geomorfologici del luogo, quali l’orientamento in funzione dell’angolo orario rispetto al nord, tipo di terreno, temperature mensili, file climatico per la simulazione presente per molte località nella libreria del software; in assenza della città in esame è necessario crearlo e importarlo.

Al fine della realizzazione 3D dell’edificio, il programma propone una barra di comandi con la quale disegnare la planimetria, ma non esclude la possibilità di importare dall’esterno i disegni CAD; in tal caso è necessario importare una rappresentazione grafica estremamente semplificata (solo muri esterni e tramezzi) con linee che passano per l’interasse dei tramezzi e sul filo esterno dell’involucro edilizio.

Realizzato il disegno 2D si procede alla definizione del Blocco; esso rappresenta la geometria base attraverso la quale generare un modello complesso; è un elemento versatile, facile da modificare. Il Design Builder definisce ogni piano dell’edificio, comprendente l’altezza di interpiano e lo spessore del solaio inferiore; all’ultimo blocco viene poi aggiunto automaticamente un solaio di copertura. Talvolta può risultare necessario creare diversi blocchi nello stesso piano, come per i piani caratterizzati da diverse quote di imposta.

Sono disponibili tre tipologie di blocco:

- Blocco costruzione, con il quale creare l’edificio stesso;
- Blocco Profilo, utilizzato come supporto per la creazione di elementi inclinati, cupole, ecc;
- Blocco componente, necessario per creare oggetti e strutture visive non contenenti le zone; questi si suddividono a loro volta in altre tipologie:
  - Tipologia standard impiegata per l’ombreggiatura, la riflessione e la visualizzazione;
  - Tipologia terreno impiegata per impostare l’adiacenza con il terreno;

- Tipologia adiabatica impiegata per l'impostazione di superfici ad adiacenza adiabatica.

Inoltre, ogni blocco componente è definito dal suo materiale, dal valore di trasmittanza ed eventuali informazioni relative all'ombreggiamento. Il passo successivo consiste nell'inserimento dei tramezzi ed, eventualmente, di corti interne; la presenza dei divisori interni comporta di conseguenza la suddivisione degli ambienti in differenti "zone termiche". Si procede poi con la realizzazione delle finestre, con la possibilità di facilitare i loro posizionamento attraverso le linee di costruzione. Definite le geometrie del progetto, si procede con il settaggio delle cinque opzioni che il menu a tendina propone: attività, costruzione, aperture, illuminazione, HVAC.

**Attività:** ogni zona viene individuata da una specifica attività, pertanto risponderà a precisi requisiti di normativa in funzione della destinazione d'uso; ogni attività è costituita da componenti come per esempio il tasso di occupazione (che calcola il grado di affollamento della zona) e il controllo dell'ambiente, come mostrato in Figura 2. 19; in particolare quest'ultimo parametro richiede la definizione della temperatura di set-point e di set-back. La prima indica la temperatura di riferimento a cui deve essere mantenuta la zona in presenza di persone, in genere 20 °C nel periodo di riscaldamento e 26 °C nel periodo di raffrescamento. La seconda indica quella temperatura di riferimento a cui l'ambiente interno deve essere mantenuto in assenza di persone, regolando di conseguenza l'accensione dell'impianto di riscaldamento/raffrescamento. È inoltre possibile stabilire se l'ambiente sia caratterizzato da una ventilazione di tipo naturale, garantita per deficit di pressione con l'apertura delle finestre, o da ventilazione di tipo meccanico che garantisce ricambi orari dell'aria, come previsto dalle attuali norme, al fine di migliorare la qualità dell'aria interna; la voce "aria minima di rinnovo" assicura condizioni ambientali, igieniche e di benessere, riferendosi all'immissione di aria esterna da parte dell'impianto in funzione della destinazione d'uso come stabilito dalla norma UNI 10339.

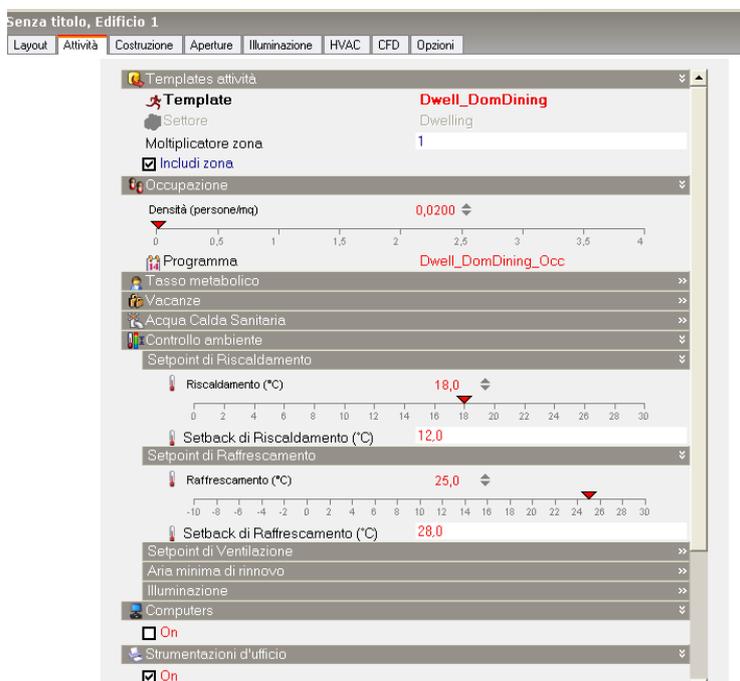


Figura 2. 19 - Template delle attività.

**Costruzione:** definisce in maniera dettagliata ogni elemento costituente il blocco attraverso l'esplicitazione della stratigrafia; il software propone un ampio archivio di materiali a cui attingere, ma spesso si procede alla creazione ex novo di template agendo sulle proprietà termofisiche degli

elementi quali: Conducibilità termica; Densità; Peso specifico. Essi consentono di valutare la trasmittanza dell'elemento in esame in riferimento alla norma UNI EN 6949. Nel caso di materiali composti, come il mattone forato, è necessario, invece, ricorrere alla definizione della resistenza termica. La definizione di ogni elemento strutturale si effettua attraverso un tempalete costituito da quattro parti riguardanti: Stratigrafia: numero di strati, materiale e spessore; Proprietà superficiali: coefficiente convettivo per il trasferimento di calore della superficie interna ed esterna; Immagine riprodotte la stratigrafia impostata; Scheda con informazioni sulle proprietà di trasmissione del calore dell'elemento editato, con calcolo della trasmittanza, di seguito illustrato (Figura 2. 20).

Costruzioni Dati	
Strati	
Superficie più interna	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/m²K)	2,152
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/m²K)	5,540
Resistenza di superficie (mq·K/W)	0,130
Superficie più esterna	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/m²K)	19,870
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/m²K)	5,130
Resistenza di superficie (mq·K/W)	0,040
Nessuno strato termicamente eterogeneo	
Valore U superficie su superficie (W/mq·K)	0,372
Valore R (mq·K/W)	2,856
<b>Valore U (W/mq·K)</b>	<b>0,350</b>
Con strato termicamente eterogeneo (BS EN ISO 6946)	
Ct - Capacità Termica interna (KJ/mq·K)	134,8000
Limite di resistenza superiore (mq·K/W)	2,856
Limite di resistenza inferiore (mq·K/W)	2,856
Valore U superficie su superficie (W/mq·K)	0,372
Valore R (mq·K/W)	2,856
<b>Valore U (W/mq·K)</b>	<b>0,350</b>

Figura 2. 20- Rappresentazione delle proprietà termofisiche di una generica stratigrafia.

*Aperture:* definisce le proprietà relativamente ai serramenti in termini di dimensioni, materiali, schermature e presenza di blocchi componenti riprodotte l'ombreggiatura.

*Illuminazione:* definisce il target di illuminamento che si vuole impostare nella zona e può essere di tipo generale, per attività specifiche e proveniente anche dall'esterno.

*HVAC:* acronimo di heating ventilation air condition consente di configurare diversi sistemi previsti per il riscaldamento, raffrescamento, ventilazione meccanica e produzione di acqua calda sanitaria stabilendo il tipo di combustibile utilizzato dalla caldaia, oltre al valore di efficienza stagionale CoP. E' necessario impostare l'arco temporale in cui si vuol simulare e visualizzare il comportamento energetico dell'edificio partendo dai dati gli input precedentemente inseriti tramite la modellazione. Tale intervallo può essere Annuale, Mensile, Giornaliero, Orario, Sub-orario. Dalla finestra delle Impostazioni è possibile impostare gli algoritmi di soluzione, gli step temporali, quali outputs calcolare e visualizzare. I dati di output sono: Trasmissione di calore della superficie: genera il flusso di calore ai bordi della superficie; Controllo ambientale attraverso la definizione dei valori di temperatura e umidità; Comfort; Distribuzione della temperatura, bilancio termico e ventilazione; Apporti interni; Consumi energetici suddivisi per categoria; Consumi totali; Emissioni di CO<sub>2</sub>; I risultati conseguiti costituiscono un ausilio alla progettazione soprattutto per analizzare il caso estivo in cui gli aspetti dinamici non sono trascurabili.

### 2.2.3 Modello della copertura a verde in Design Builder

Nel progetto in esame risulta importante dedicare attenzione all'inserimento di uno specifico elemento costruttivo: la copertura verde.

Questo elemento viene modellato utilizzando la voce "green roof" come materiale più esterno della copertura. Il tetto verde così realizzato è capace di ricevere acqua, durante la simulazione da un

impianto di irrigazione e/o dalle precipitazioni in sito. Grazie alla funzione di Energy Plus, quindi, è possibile quantificare la riduzione del consumo energetico di un edificio in presenza di un tetto verde con diverse caratteristiche.

In particolare il modello green roof tiene in considerazione i seguenti parametri:

- Scambi termici radiativi all'interno dello strato vegetale;
- Effetti dello strato vegetale sul trasferimento convettivo del calore;
- Evapotraspirazione del suolo e delle piante;
- Conduzione di calore (e stoccaggio) nel substrato.

Il codice permette, quindi, di specificare i vari aspetti della costruzione del tetto verde, nonché la profondità dei substrati di coltivazione, le proprietà termiche, la densità della copertura fogliare, l'altezza delle piante, la conduttanza stomatica (capacità di traspirare l'umidità), e le condizioni di umidità del suolo (compresa l'irrigazione). La formulazione del modello include quanto segue:

Bilancio idrico semplificato delle precipitazioni, dell'irrigazione e del trasporto di umidità tra due strati del terreno (superficiale e radicale).

Bilancio energetico del suolo e dello strato vegetale realizzato in base ai modelli di vegetazione dell'Army Corps of Engineers' FASST (Frankenstein and Koenig) [35], attingendo molto dal BATS (Dickenson et al.) [50] e dal SiB (Sellers et al.) [51].

Le equazioni che definiscono le temperature della superficie del suolo ( $T_g$ ) e del fogliame ( $T_f$ ) sono risolte simultaneamente, invertendo la funzione di trasferimento conduttivo CTF per estrarre le informazioni sul flusso di calore per il calcolo del bilancio energetico. Il risultato finale è un insieme di due equazioni simultanee della temperatura, uno per la superficie del terreno e l'altro per il fogliame. Le variabili caratterizzanti il bilancio energetico sono definite nell'Energy Plus Engineering Document [49] e l'analisi del bilancio segue il modello Fast All Season Soil Strength (FASST), modello sviluppato da Frankenstein e Koenig per l'US Army Corps of Engineers e riproposto dalla trattazione di D.J.Sailor [34]. FASST è stato sviluppato, in parte, per determinare la capacità dei suoli di sostenere i veicoli con e senza pilota e per il movimento del personale. FASST è implementato in Energy Plus con solo poche modifiche, per adattarlo all'uso, con uno strato di terreno relativamente sottile. I Dati del tetto verde necessari per la simulazione sono:

*-Altezza delle piante:* l'altezza media delle piante sul tetto verde.

*-Indice aria fogliame:* è l'area fogliare prevista per unità di area di superficie del suolo. Si tratta di un numero adimensionale tra 0,001 e 5,0.

*-Riflessione fogliame:* rappresenta la frazione di radiazione solare incidente e che viene poi riflessa dalla superficie della singola foglia. La radiazione solare comprende lo spettro visibile e lunghezze d'onda infrarosse e ultraviolette. I valori per questo campo devono essere compresi tra 0,1 e 0,4.

*-Emissività fogliame:* questo campo indica il rapporto tra la radiazione termica emessa dalla superficie fogliare a quella emessa da un corpo nero ideale alla stessa temperatura. Questo parametro viene utilizzato per il calcolo della lunghezza d'onda radiante scambiata dalla superficie fogliare. I valori per questo campo sono compresi tra 0,8 e 1,0 (con 1,0 che rappresenta la condizione di "corpo nero").

*-Resistenza minima degli stomi:* questo campo rappresenta la resistenza degli stomi per il trasporto di umidità; l'unità di misura è in s/m. Una copertura realizzata con piante dai bassi valori di

resistenza stomatica, si tradurrà in maggiori tassi di evapotraspirazione delle piante. Il valore per questo campo deve ricadere nel range di 50,0-300,0.

-*Umidità massima in saturazione*: indica il massimo contenuto di umidità volumetrica del suolo, dipende dalle proprietà del suolo e, in particolare, dalla porosità.

-*Umidità residua*: individua il minimo contenuto possibile di umidità volumetrica dello strato di terreno.

-*Umidità iniziale*: Il contenuto di umidità volumetrica dello strato di terreno all'inizio della simulazione. Il contenuto di umidità viene aggiornato nel corso della simulazione sulla base dell'evaporazione superficiale, dell'irrigazione e delle precipitazioni.

Nella figura di seguito riportata, viene mostrata la schermata del Design Builder in cui vi è la possibilità di variare i parametri sopra elencati.

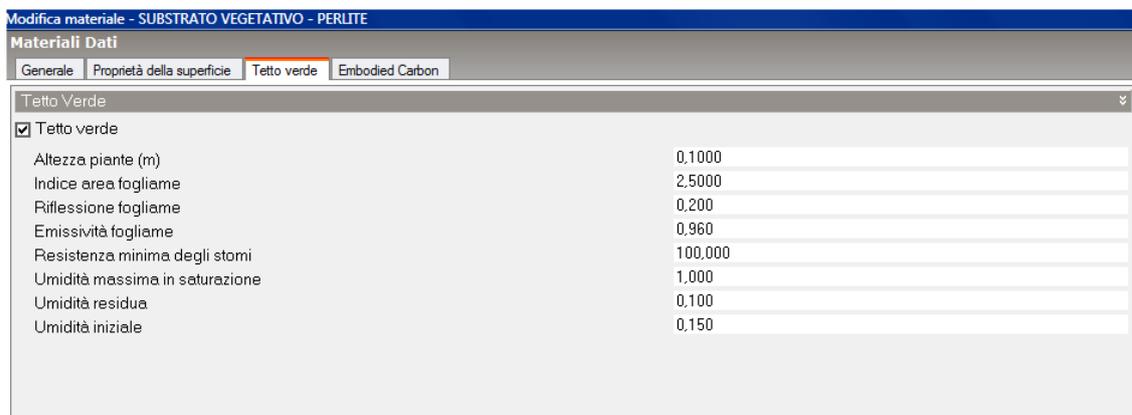


Figura 2. 21 - Scheda generale dei parametri per il tetto verde.

## **2.3 Caso studio: Cubo universitario 46 C**

### **2.3.1 Caratteristiche tecniche**

Lo studio conseguito finora si particolarizza attraverso l'analisi della copertura a verde realizzata all'Università della Calabria, sita ad Arcavacata, frazione del comune di Rende. Il complesso nasce ad opera dell'Architetto Vittorio Gregotti che la concepisce formalmente in modo da rendere possibile un ampliamento futuro, senza compromettere la sua identità originaria. L'università, infatti, si sviluppa adiacente ad un percorso rettilineo e chilometrico, pedonale e carrabile, coperto e scoperto, attraverso una serie di edifici quadrati, denominati "cubi" che si adattano all'orografia del terreno in modo da definire uno skyline pulito e lineare. Nella figura successiva si riporta una visione della facoltà di Ingegneria.

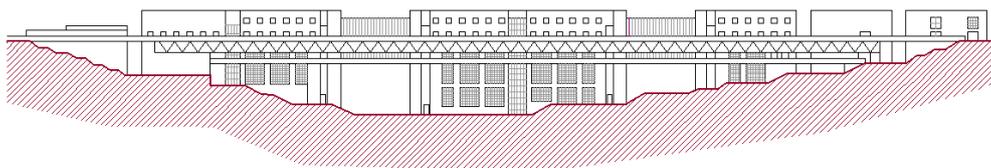


Figura 2. 22 - Skyline della facoltà di Ingegneria, Università della Calabria.

Il cubo in esame numerato 46/C, è localizzato a nord dell'intera struttura universitaria, come di seguito illustrato, e accoglie gli uffici amministrativi del dipartimento di meccanica.



Figura 2. 23 - Inquadramento territoriale della Facoltà di Ingegneria.

Creare un modello termofisico di un edificio al fine di valutarne prestazioni energetiche, fabbisogni, ecc, implica necessariamente una conoscenza approfondita delle caratteristiche geometriche - tecniche - fisiche di ogni suo componente. Il cubo universitario oggetto di studio presenta, analogamente agli altri edifici costituenti l'università, una forma geometrica parallelepipedica, regolare tanto in pianta quanto in altezza. Si erige su una pianta quadrata di lati 21,30 x 21,30 metri per una altezza di 18 metri come si può notare dalla sezione di seguito riportata nella Figura 2. 24 l'edificio si compone di 5 livelli, di cui uno interrato. Ogni piano ha una altezza di interpiano di 2,7 metri, salvo il piano interrato che risulta essere di 4,40 metri e la zona sottostante alla copertura alta 3,60 metri. Ai fini progettuali sono solo gli ultimi due livelli sottostanti in quanto beneficianti delle prestazioni termiche del tetto verde.

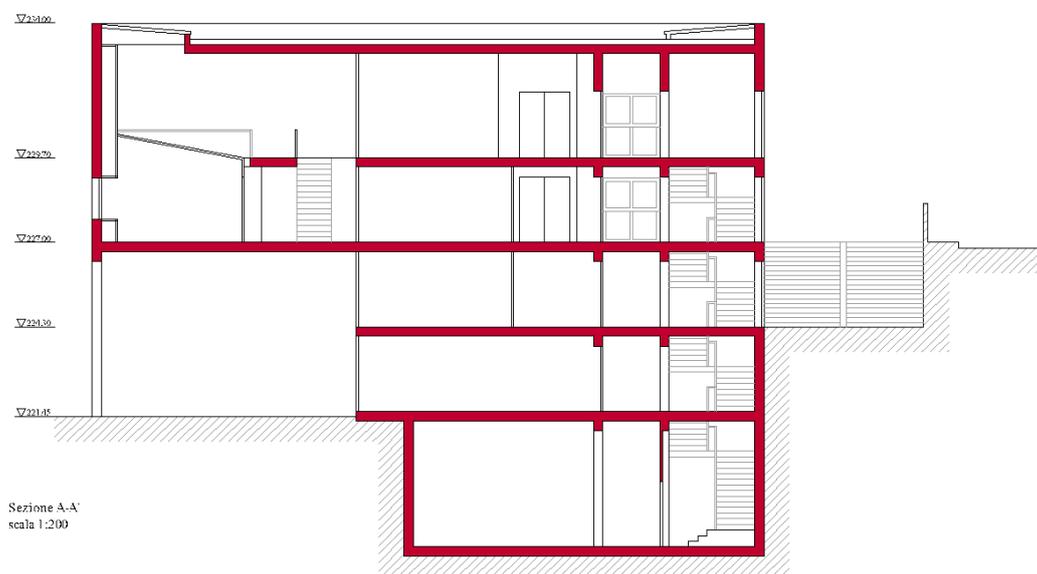


Figura 2. 24 – Sezione del Cubo universitario 46C

Come sopra illustrato, ogni livello è stato pensato e progettato con specifiche destinazioni d'uso che hanno subito, nel corso degli anni, delle variazioni; in particolare il piano interrato è adibito a deposito materiali il piano superiore, concepito inizialmente come sede di aule universitarie, è ora destinato a uso ufficio analogamente ai rimanenti piani superiori.

Ogni livello inoltre, è caratterizzato da un ambito funzionale destinato alla circolazione per il passaggio dall'esterno verso l'interno (gli uffici) e al collegamento tra i vari piani, e da un ambito funzionale sede degli uffici stessi.

### Chiusure verticali opache esterne

La struttura si compone di due differenti tipologie di muri perimetrali, con un posizionamento corrispondente alla suddivisione funzionale degli ambienti. In corrispondenza.

La zona adibita ad uso ufficio è caratterizzata da pareti molto spesse e di stratigrafia complessa che, unitamente ai 4 pilastri in acciaio, garantiscono il supporto per la realizzazione degli orizzontamenti; in corrispondenza della zona di passaggio, non riscaldata, i muri perimetrali sono, invece, di spessore ridotto. Tali due tipologie murarie sono individuate nella Figura 2. 25.

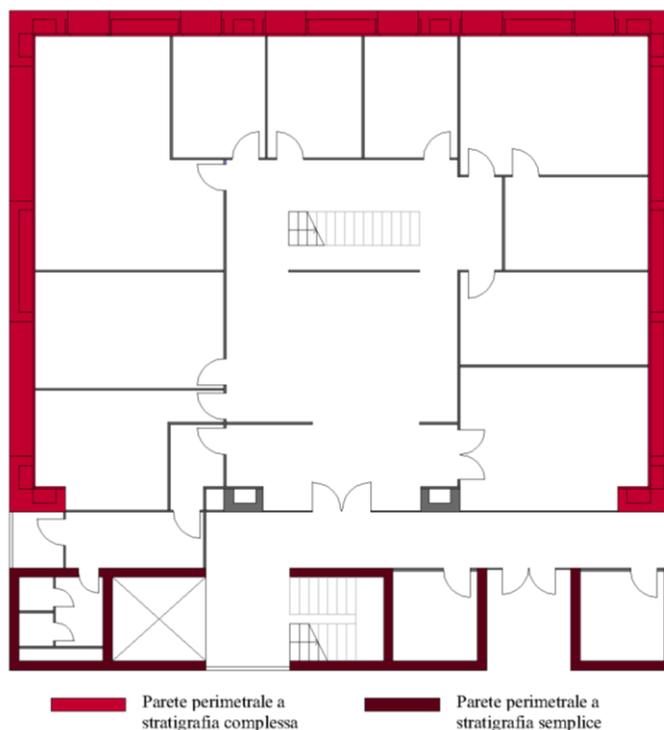


Figura 2. 25 – Planimetria del terzo piano con individuazione tipologica degli elementi di chiusura verticale.

La stratigrafia della parete complessa; procedendo dall'esterno verso l'interno, è costituita da un muro in cemento armato pieno 250 Rck, rivestito esternamente da pittura in quarzo plastico, intercapedine di aria e un pannello per il rivestimento interno costituito da isolante in fibra di vetro, compensato in cartongesso e albanit. Lo spessore complessivo della parete è di 87,9 cm. Nella Tabella 2. 6 si riportano le proprietà dei materiali costituenti tale tipologia di parete.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>Albanit</b>	14	Conducibilità	W/m K	0,44
		Calore specifico	J/kg K	1600
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	600
<b>Cartongesso</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,21
		Calore specifico	J/kg K	1090
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	900
<b>Fibra di vetro</b>	50	Conducibilità	W/m K	0,046
		Calore specifico	J/kg K	670
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	16
<b>Intercapedine d'aria</b>	500	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W	0,18
<b>Calcestruzzo 250 Rck</b>	300	Conducibilità	W/m K	1,48
		Calore specifico	J/kg K	880
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2200
<b>Pittura in quarzo plastico</b>	5	Conducibilità	W/m K	0,3
		Calore specifico	J/kg K	840
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1300

Tabella 2. 6 – Proprietà dei materiali costituenti la parete perimetrale complessa.

La tabella successiva descrive la stratigrafia della parete perimetrale semplice; procedendo dall'esterno verso l'interno, la stratigrafia è caratterizzata un muro in cemento armato pieno 250 Rck, rivestito sia esternamente che internamente da pittura in quarzo plastico. Lo spessore complessivo della parete è di 87,9 cm.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>Pittura in quarzo plastico</b>	5	Conducibilità	W/m K	0,3
		Calore specifico	J/kg K	840
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1300
<b>Calcestruzzo 250 Rck</b>	300	Conducibilità	W/m K	1,48
		Calore specifico	J/kg K	880
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2200
<b>Pittura in quarzo plastico</b>	5	Conducibilità	W/m K	0,3
		Calore specifico	J/kg K	840
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1300

Tabella 2. 7 – Proprietà dei materiali costituenti la parete perimetrale semplice.

I pannelli descritti nella prima tipologia di parete perimetrale hanno conformazioni geometriche e dimensioni differenti a secondo delle aperture presenti. In particolare gli elementi esposti a nord e a sud hanno uguale lunghezza, pari a 14,64 m, ma si differenziano per la presenza o meno di appositi fori predisposti per le aperture. Anche la dimensione delle aperture è differente come illustrato nelle Figura 2. 26 e Figura 2. 27.

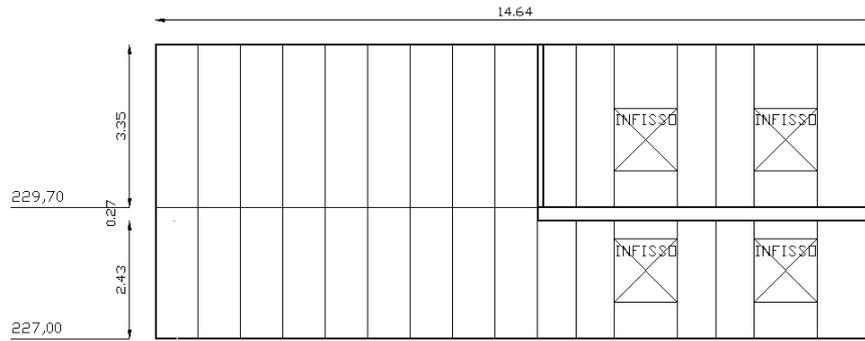


Figura 2. 26 - Rivestimento pannello interno, lato nord.

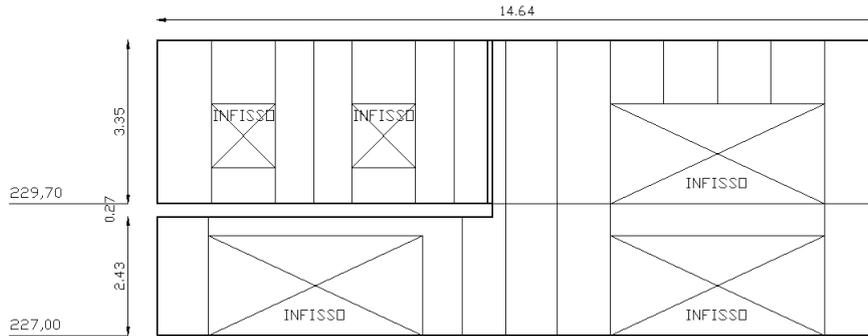


Figura 2. 27 - Rivestimento pannello interno, lato sud.

Il rivestimento esposto a ovest (Figura 2. 28) ha dimensioni maggiori, ha una lunghezza di 19,80 m e nella parte superiore corrispondente all'ultimo piano non presenta fori cioè vuol dire che l'ultimo piano della facciata ovest non ha finestre.

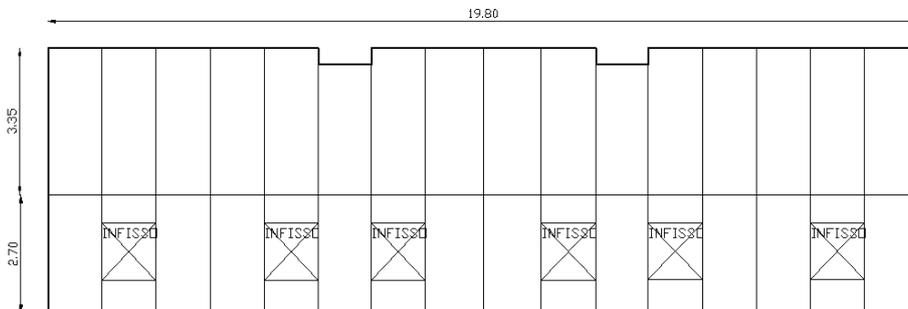


Figura 2. 28 - Rivestimento pannello interno, lato ovest.

### Partizioni verticale interne

Definite le caratteristiche delle chiusure verticali si procede con la descrizione delle partizioni interne dell'edificio; anche questa categoria risulta comprensiva di due differenti tipologie di tramezzature: quelle presenti nella zona riscaldata degli uffici, a nord sud ed ovest e quelli presenti nella zona non riscaldata di semplice circolazione ad est. Entrambe le tipologie sono formate da una serie di pannelli posti in successione costituiti da tre strati, esternamente vi sono due strati di legno compensato di spessore 10 mm mentre internamente vi è uno strato di materiale isolante realizzato in fibra di vetro con spessore di 45 mm; lo spessore totale delle tramezzature è pari a 65 mm. La tipologia che separa gli ambiti di passaggio dalla zona uffici si differenzia dall'altra per la presenza di un sottile strato aggiuntivo di intonaco. Nella Tabella 2. 8 si riportano le caratteristiche dei materiali delle tramezzature interne.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
--------	---------------	---------------------	-----------------	--------

<b>Legno compensato</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,44
		Calore specifico	J/kg K	1600
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	600
<b>Fibra di vetro</b>	45	Conducibilità	W/m K	0,046
		Calore specifico	J/kg K	670
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	16
<b>Legno compensato</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,44
		Calore specifico	J/kg K	1600
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	600

Tabella 2. 8 - Proprietà dei materiali costituenti i tramezzi.

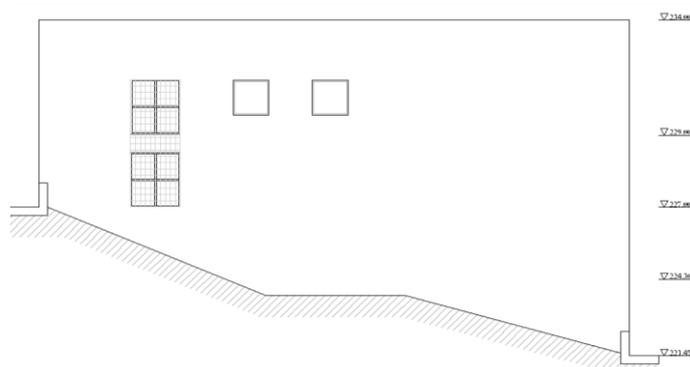
Nella Tabella 2. 9 si riportano le caratteristiche dei materiali presenti nel tramezzo intonacato.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>Intonaco interno</b>	5	Conducibilità	W/m K	0,7
		Calore specifico	J/kg K	1010
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1400
<b>Legno compensato</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,44
		Calore specifico	J/kg K	1600
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	600
<b>Fibra di vetro</b>	45	Conducibilità	W/m K	0,046
		Calore specifico	J/kg K	670
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	16
<b>Legno compensato</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,44
		Calore specifico	J/kg K	1600
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	600

Tabella 2. 9 - Proprietà dei materiali costituenti i tramezzi intonacati.

### Elementi vetrati

Tutti gli infissi sono realizzati in acciaio – vetrocamera con apertura a batista, ma presentano dimensioni differenti. Il prospetto Nord è caratterizzato da due tipologie di infissi, presenti esclusivamente negli ultimi due livelli dell'edificio: una finestra in parte opaca e in parte vetrata, di dimensioni 205cm x 180cm, ed una finestra più piccola completamente vetrata avente dimensioni 130cm x 130cm. Di seguito si riporta il prospetto in esame e le misure di relativi infissi.



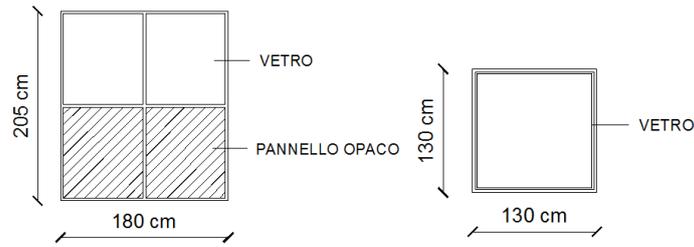


Figura 2. 29 – Prospetto Nord e tipologie di aperture del Cubo Universitario 46 C

Il prospetto Sud è provvisto di una più vasta varietà di finestre: Vetrate di dimensione 205x435 cm, in parte vetrate e in parte opaca, presenti fino al terzo piano; Finestre di 205x180 in parte opaca e in parte vetrate presenti al secondo e terzo livello; Finestre di dimensioni 130x130 in semplice vetro.

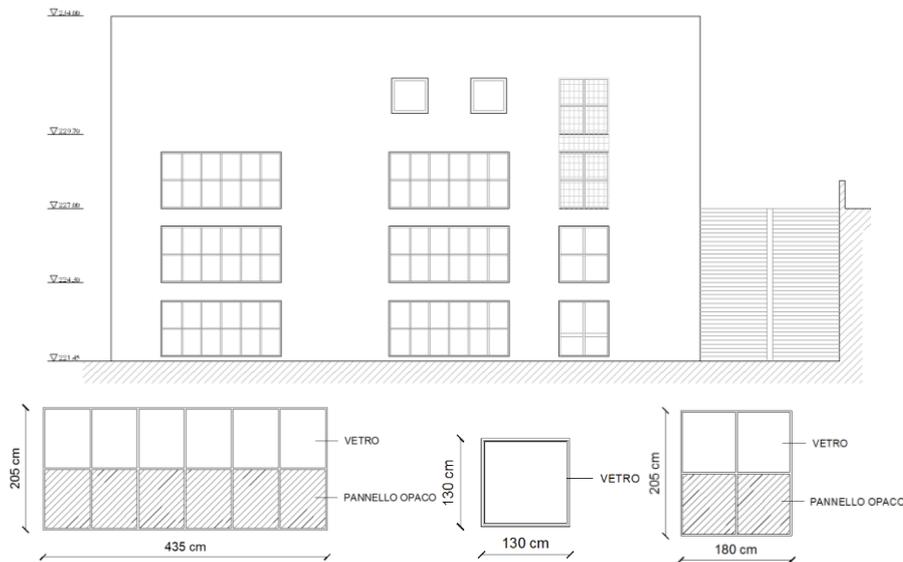


Figura 2. 30 - Prospetto Sud e tipologie di aperture del Cubo Universitario 46 C

Il prospetto Est è caratterizzato da una finestra di dimensioni 270x205, con apertura a vasistas nella zona centrale, e due ingressi vetrati 210x270.

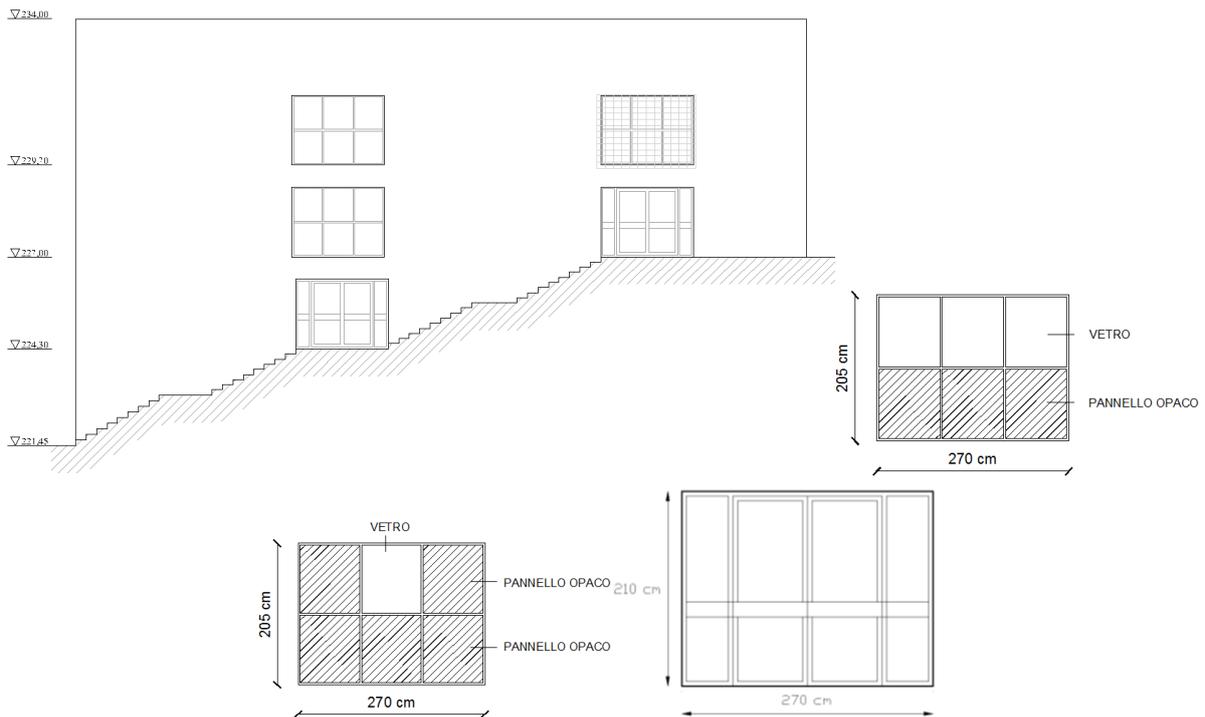


Figura 2. 31 - Prospetto Est e tipologie di aperture del Cubo Universitario 46 C

Il prospetto Ovest presenta una composizione simmetrica delle aperture. I piani inferiori sono caratterizzati da ampie vetrate di dimensioni 270x205; semplici finestre 130x130 caratterizzano invece l'ultimo livello, analogamente al prospetto Nord e Sud.

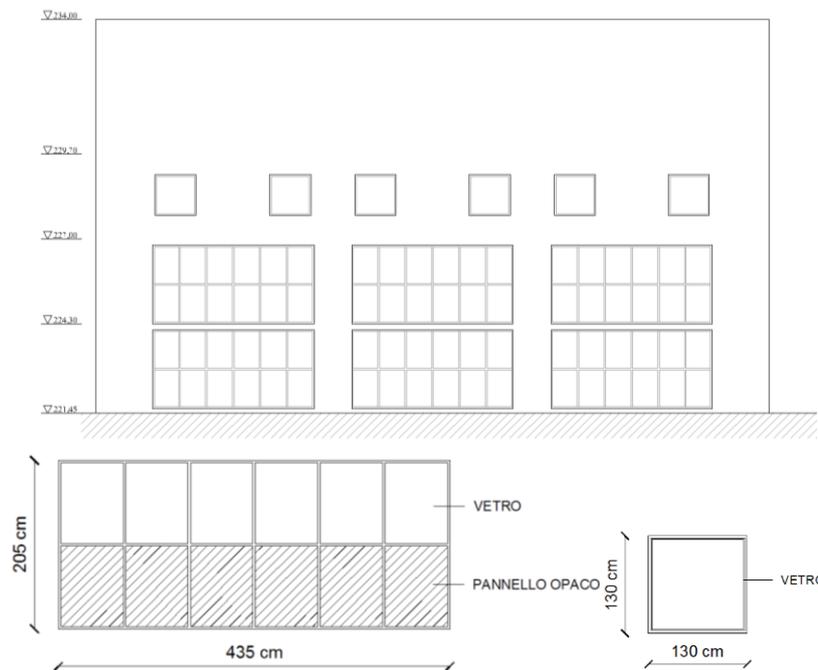


Figura 2. 32 - Prospetto Ovest e tipologie di aperture del Cubo Universitario 46 C

Si riportano nelle seguenti tabelle le caratteristiche delle finestre, delle porte esterne vetrate, delle porte interne, considerando anche la presenza di una porta tagliafuoco per piano.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>Vetro</b>	4	Conducibilità	W/m K	1
		Calore specifico	J/kg K	720
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2500
<b>Intercapedine</b>	12	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W	0,18
<b>Vetro</b>	4	Conducibilità	W/m K	1
		Calore specifico	J/kg K	720
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2500
<b>Telaio acciaio zincato</b>	45	Conducibilità	W/m K	18
		Calore specifico	J/kg K	1990
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	8000

Tabella 2. 10 – Proprietà dei materiali componenti le aperture esterne vetrate.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>Legno compensato</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,44
		Calore specifico	J/kg K	1600
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	600
<b>Fibra di vetro</b>	45	Conducibilità	W/m K	0,046
		Calore specifico	J/kg K	670
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	16
<b>Legno compensato</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,44
		Calore specifico	J/kg K	1600
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	600
<b>Telaio alluminio</b>	70	Conducibilità	W/m K	220
		Calore specifico	J/kg K	890
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2700

Tabella 2. 11 – Proprietà dei materiali componenti le porte interne.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>Lamiera acciaio zincato</b>	3	Conducibilità	W/m K	18
		Calore specifico	J/kg K	1990
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	7800
<b>Fibra di vetro</b>	44	Conducibilità	W/m K	0,046
		Calore specifico	J/kg K	670
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	16
<b>Lamiera acciaio zincato</b>	3	Conducibilità	W/m K	18
		Calore specifico	J/kg K	1990
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	7800
<b>Telaio acciaio zincato</b>	60	Conducibilità	W/m K	18
		Calore specifico	J/kg K	1990
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	7800

Tabella 2. 12 – Proprietà dei materiali componenti la porta tagliafuoco.

L'intercapedine d'aria considerata all'interno delle stratigrafie sopra descritte non viene valutata in funzione di: Conducibilità, densità peso, specifico; come avviene per gli altri materiali, ma in funzione della resistenza, come dettato dalla norma UNI EN ISO 6946 [53]. Ne caso in esame è stato adottato un valore di resistenza termica pari a 0,18 m<sup>2</sup>K/W.

### Partizioni interne orizzontali

Il cubo universitario 46 C è caratterizzato da due differenti tipologie di solaio di interpiano; un solaio in laterocemento di spessore complessivo di 22 cm e un solaio in cemento armato precompresso di spessore di 29 cm; Nella Figura 2. 33 si riporta la stratigrafia del solaio interpiano in laterocemento caratterizzato nella sua stratigrafia da: intonaco all'intradosso del solaio, strato strutturale di pignatte e travetti gettati in opera, soletta in cls, massetto e pavimentazione in pvc.

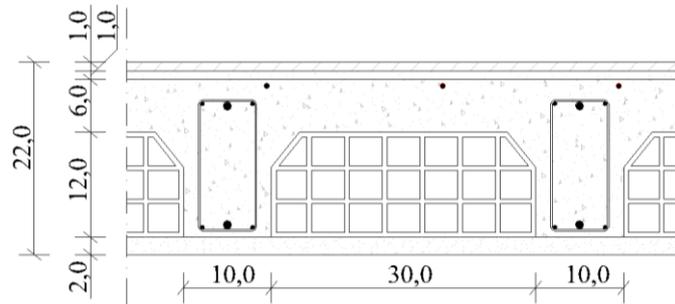


Figura 2. 33 – Stratigrafia del solaio interpiano in laterocemento.

Nella Tabella 2. 13 sono riportate le relative proprietà dei materiali.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>Pavimento in PVC</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,16
		Calore specifico	J/kg K	160
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1400
<b>Massetto in calcestruzzo magro</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,93
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1800
<b>Solette in cemento armato</b>	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2400
<b>Pignatta</b>	120	Conducibilità	W/m K	0,50
		Calore specifico	J/kg K	840
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2200
<b>Intonaco interno</b>	20	Conducibilità	W/m K	0,7
		Calore specifico	J/kg K	1010
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1400

Tabella 2. 13 – Proprietà dei materiali componenti il solaio in laterocemento.

Nella Figura 2. 34 si riporta la stratigrafia del solaio interpiano in cemento armato precompresso caratterizzato nella sua stratigrafia da: intonaco all'intradosso del solaio, strato strutturale dato da due solette in cls con interposti elementi di alleggerimento in polistirolo, massetto e pavimentazione in pvc.

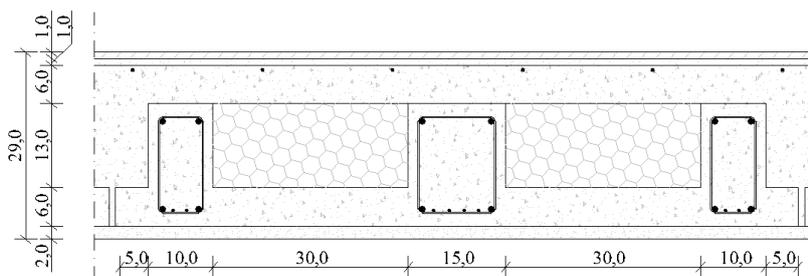


Figura 2. 34 – Stratigrafia del solaio interpianto in c.a.p.

Nella Tabella 2. 14 sono riportate le relative proprietà dei materiali.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>Pavimento in PVC</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,16
		Calore specifico	J/kg K	160
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1400
<b>Massetto in calcestruzzo magro</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,93
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1800
<b>Solette in cemento armato precompresso</b>	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2400
<b>Alleggerimento in polistirolo + travetto in c.a.p</b>	130	Conducibilità	W/m K	0,11
		Calore specifico	J/kg K	1240
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	500
<b>Solette in cemento armato precompresso</b>	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2400
<b>Intonaco interno</b>	20	Conducibilità	W/m K	0,7
		Calore specifico	J/kg K	1010
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1400

Tabella 2. 14 - Proprietà dei materiali componenti il solaio in c.a.p.

### Elementi di chiusura orizzontale

La copertura, posta ad una quota di 230,30 m s.l.m., si compone di tre differenti tecnologie:

- 1- Copertura costituita da lastre prefabbricate con travetti in cemento armato precompresso;
- 2- Copertura tradizionale in laterocemento;
- 3- Copertura in lamiera zincata.

La Figura 2. 35 illustra la stratigrafia del solaio in cemento armato precompresso di altezza complessiva di 31 cm. La parte strutturale, di 25 cm, si compone di due solette, una superiore e una inferiore, di altezza pari a 6 cm ciascuna, con presenza di elementi di alleggerimento in blocchi di polistirolo alti 13 cm. Inferiormente è rivestito da uno strato di intonaco di 2cm di spessore; superiormente è caratterizzato, procedendo dall'interno verso l'esterno, dalla presenza di un massetto delle pendenze di tipo Foamcem di 2 cm, uno strato di impermeabilizzazione di 2 cm, un secondo strato di massetto di 1 cm; inoltre, a seguito di alcuni interventi recenti è stato inserito un ulteriore strato impermeabilizzante di circa 0,5 cm.

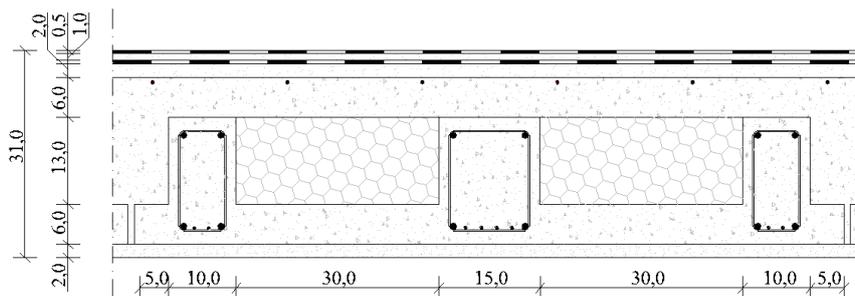


Figura 2.35 - Stratigrafia del solaio di copertura in c.a.p.

Nella Tabella 2.15 sono riportate le relative proprietà dei materiali.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>Impermeabilizzazione con bitume</b>	5	Conducibilità	W/m K	0,17
		Calore specifico	J/kg K	1470
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1200
<b>Massetto in calcestruzzo magro</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,93
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1800
<b>Impermeabilizzazione con bitume</b>	5	Conducibilità	W/m K	0,17
		Calore specifico	J/kg K	1470
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1200
<b>Massetto in pendenza foamcem</b>	20	Conducibilità	W/m K	0,098
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	400
<b>Solette in cemento armato precompresso</b>	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2400
<b>Alleggerimento in polistirolo + travetto in c.a.p</b>	130	Conducibilità	W/m K	0,11
		Calore specifico	J/kg K	1240
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	500
<b>Solette in cemento armato precompresso</b>	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2400
<b>Intonaco interno</b>	20	Conducibilità	W/m K	0,7
		Calore specifico	J/kg K	1010
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1400

Tabella 2.15 – Proprietà dei materiali costituenti il solaio di copertura in c.a.p.

Il solaio di copertura in laterocemento (Figura 2.36) ha uno spessore complessivo di 24 cm e si compone di travetti cemento armato ordinario gettato in opera, con interasse di 40 cm, ed elementi di alleggerimento costituiti da pignatte; superiormente vi è una soletta di completamento di 6 cm sulla quale sono predisposti il massetto delle pendenze Foamcem e l'impermeabilizzazione in modo analogo al caso precedente.

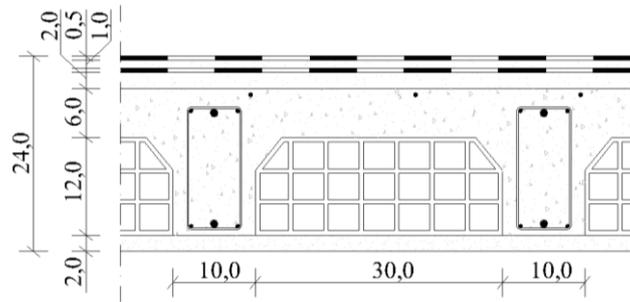


Figura 2. 36 - Stratigrafia del solaio di copertura in laterocemento.

Nella Tabella 2. 16 sono riportate le relative proprietà dei materiali.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>Impermeabilizzazione con bitume</b>	5	Conducibilità	W/m K	0,17
		Calore specifico	J/kg K	1470
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1200
<b>Massetto in calcestruzzo magro</b>	10	Conducibilità	W/m K	0,93
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1800
<b>Impermeabilizzazione con bitume</b>	5	Conducibilità	W/m K	0,17
		Calore specifico	J/kg K	1470
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1200
<b>Massetto in pendenza Foamcem</b>	20	Conducibilità	W/m K	0,098
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	400
<b>Solette in cemento armato</b>	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2400
<b>Pignatta</b>	120	Conducibilità	W/m K	0,50
		Calore specifico	J/kg K	840
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2200
<b>Intonaco interno</b>	20	Conducibilità	W/m K	0,7
		Calore specifico	J/kg K	1010
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1400

Tabella 2. 16 – Proprietà dei materiali costituenti il solaio di copertura in laterocemento.

La copertura a verde di tipo estensivo è stata realizzata sul solaio prefabbricato con travetti in cemento armato precompresso. Come rappresentato nella Figura 2. 37, quest'ultimo è stato suddiviso in quattro settori: tre sono caratterizzati da una specifica stratigrafia aggiuntiva per poter accogliere il verde pensile, il rimanente settore 4 ha conservato la sua configurazione originaria.

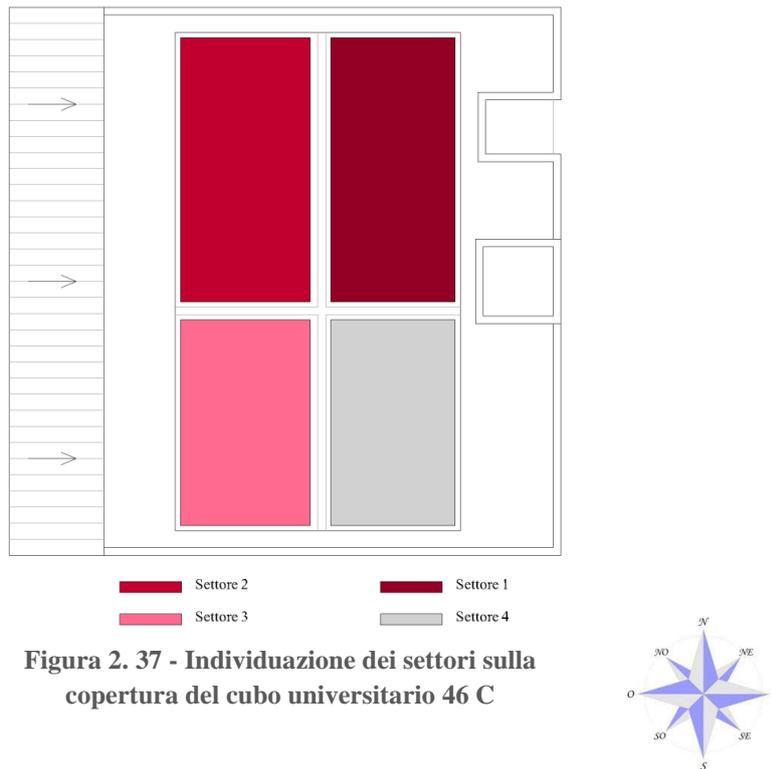
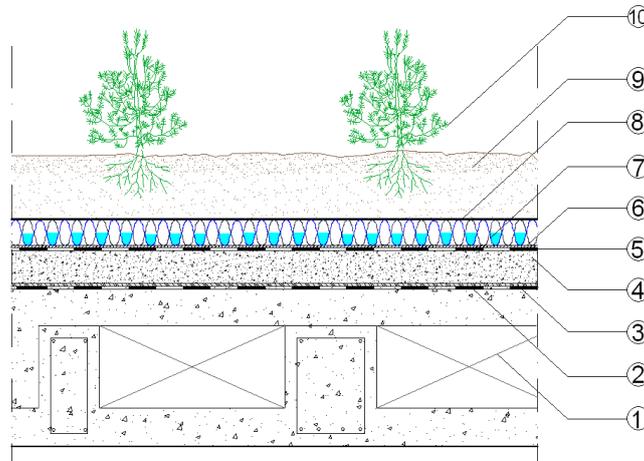


Figura 2. 37 - Individuazione dei settori sulla copertura del cubo universitario 46 C

Nella Figura 2. 38 è rappresentata la stratigrafia del Settore 1, che similmente al settore 3 non riporta lo strato isolante.



1 – Solaio 2 – Strato impermeabilizzante esistente 3 – Strato di ripresa impermeabilizzazione e separazione ICOPAS 4 – Strato di pendenza 1% ( CLS e polistirene) 5 – Strato antiradice INDEX DEFEND 6 – Strato di protezione ed accumulo – Zinco TSM 32 7 – Strato di accumulo drenaggio e aerazione CG Climadrain 55 8 – Strato filtrante CG Stuoia 105 9 – Strato di coltivazione 10 – Vegetazione mediterranea

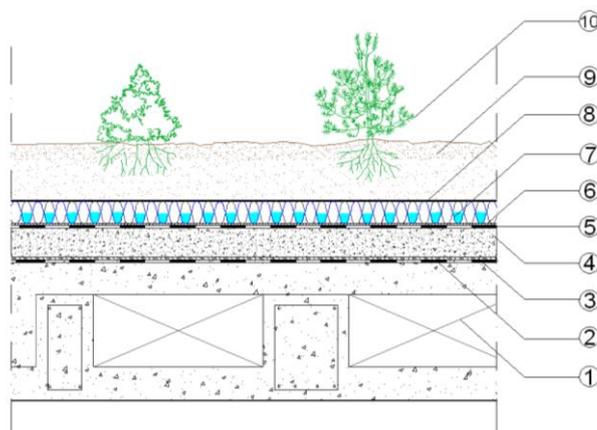
Figura 2. 38 - Analisi stratigrafica copertura a verde settore 1.

Nella tabella seguente si riportano le proprietà dei materiali componenti la stratigrafia del settore 1

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>scisto espanso sabbia compost</b>	80	Conducibilità	W/m K	0,27
		Calore specifico	J/kg K	1307
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1210
<b>Strato drenaggio Climadrain 55</b>	55	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W	0,4
<b>Protezione e accumulo Zinco TSM 32</b>	30	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W	0,71
<b>Antiradice Index Defend</b>	4	Conducibilità	W/m K	0,2
		Calore specifico	J/kg K	1925
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	900
<b>Massetto in pendenza foamcem</b>	20	Conducibilità	W/m K	0,098
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	400
<b>Impermeabilizzazione Icopas</b>	3	Conducibilità	W/m K	0,17
		Calore specifico	J/kg K	1700
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1030
<b>Solette in cemento armato precompresso</b>	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2400
<b>Alleggerimento in polistirolo + travetto in c.a.p</b>	130	Conducibilità	W/m K	0,11
		Calore specifico	J/kg K	1240
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	500
<b>Solette in cemento armato precompresso</b>	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2400

Tabella 2. 17 – Proprietà dei materiali del settore 1

La stratigrafia del Settore 2, di seguito riportata, è caratterizzata principalmente dalla presenza di uno strato isolante, aggiuntivo a quello già compreso nel solaio originario e assente negli altri settori.



1 – Solaio 2 – Strato impermeabilizzante esistente 3 – Strato di ripresa impermeabilizzazione e separazione ICOPAS 4 – Strato di pendenza 1% ( CLS e polistirene) 5 – Strato antiradice INDEX DEFEND 6 – Strato di protezione ed accumulo – Zinco BSM 64 7 – Strato di accumulo drenaggio e aerazione CG FKD 40 8 – Strato filtrante Zinco TG 9 – Strato di coltivazione 10 – Vegetazione mediterranea mista

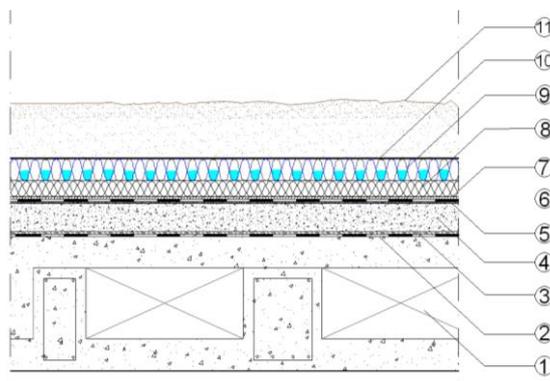
Figura 2. 39 - Analisi stratigrafica copertura a verde settore 2.

Nella tabella seguente si riportano le proprietà dei materiali componenti la stratigrafia del settore 2.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>50% scisto espanso 40% sabbia 10% compost</b>	80	Conducibilità	W/m K	0,27
		Calore specifico	J/kg K	1307
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1210
<b>Strato drenaggio FKD 40</b>	40	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W	0,4
<b>Protezione e accumulo Zinco TSM 64</b>	70	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W	0,71
<b>Antiradice Index Defend</b>	4	Conducibilità	W/m K	0,2
		Calore specifico	J/kg K	1925
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	900
<b>Massetto in pendenza foamcem</b>	20	Conducibilità	W/m K	0,098
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	400
<b>Impermeabilizzazione Icopas</b>	3	Conducibilità	W/m K	0,17
		Calore specifico	J/kg K	1700
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1030
<b>Solette in cemento armato precompresso</b>	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2400
<b>Alleggerimento in polistirolo + travetto in c.a.p</b>	130	Conducibilità	W/m K	0,11
		Calore specifico	J/kg K	1240
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	500
<b>Solette in cemento armato precompresso</b>	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2400

Tabella 2. 18 – Proprietà dei materiali del settore 2

Il Settore 3, è privo dello strato isolante, come il settore 2, e dello strato di vegetazione, come di seguito riportato.



1 – Solaio, 2 – Strato impermeabilizzante esistente, 3 – Strato di ripresa impermeabilizzazione e separazione ICOPAS, 4 – Strato di pendenza 1% ( CLS e polistirene), 5 – Strato di separazione Zinco TGF 20, 6– Strato antiradice Harpoplan ZD UV 1,8 mm, 7 – Strato di protezione ed accumulo – Zinco TSM 32, 8 – Strato Isolante Isoplan 120, 9 – Strato di accumulo drenaggio e aerazione Climadrain 55, 10 – Strato filtrante CG Stuoia 105, 11 – Strato di coltivazione

Figura 2. 40 - Analisi stratigrafica copertura a verde settore 3.

Nella tabella seguente si riportano le proprietà dei materiali componenti la stratigrafia del settore 3.

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
<b>50% scisto espanso 40% sabbia 10% compost</b>	80	Conducibilità	W/m K	0,27
		Calore specifico	J/kg K	1307
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1210
<b>Strato drenaggio Climadrain 55</b>	55	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W	0,4
<b>Strato isolante Isoplan</b>	30	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W	0,91
<b>Protezione e accumulo Zinco TSM 32</b>	3	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W	0,71 <sub>9</sub>
<b>Antiradice Haroplan ZD UV</b>	1,8	Conducibilità	W/m K	0,16
		Calore specifico	J/kg K	1200
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1400
<b>Massetto in pendenza foamcem</b>	20	Conducibilità	W/m K	0,098
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	400
<b>Impermeabilizzazione Icopas</b>	3	Conducibilità	W/m K	0,17
		Calore specifico	J/kg K	1700
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	1030
<b>Solette in cemento armato precompresso</b>	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2400
<b>Alleggerimento in polistirolo + travetto in c.a.p</b>	130	Conducibilità	W/m K	0,11
		Calore specifico	J/kg K	1240
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	500
<b>Solette in cemento armato precompresso</b>	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m <sup>3</sup>	2400

Tabella 2. 19 – proprietà dei materiali del settore 3.

Nelle tabelle precedenti sono state inserite le proprietà dei materiali considerati ai fini modellistici, trascurando strati quali intonaco interno e filtro protettivo di spessore ridotto e quindi poco rilevanti nelle analisi energetiche di seguito conseguite.

Infine i valori necessari per la compilazione della voce “green roof” sono di seguito riportati (Tabella 2. 20); essi fanno riferimento a una vegetazione di tipo mediterranea, di medie dimensioni, analogamente a quella presente sull’esistente copertura a verde del cubo universitario 46 C.

<b>Altezza fogliame</b>	0,30 m
<b>LAI</b>	4,0 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Emissività</b>	0,95
<b>Riflessione</b>	0,2
<b>Resistenza stomatica minima</b>	200 s/m
<b>Umidità massima in saturazione</b>	0,48 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
<b>Umidità residua</b>	0,01 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
<b>Umidità iniziale</b>	0,1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

Tabella 2. 20 – Parametri relativi al “green roof”.

### 2.3.2 modello termofisico

Definite accuratamente le stratigrafie e le proprietà di tutti i materiali impiegati nella realizzazione dell'edificio, è ora possibile procedere con la realizzazione del modello in Design Builder. Il primo passo nella procedura di modellazione consiste nella definizione di nuovi Templates. Si procede pertanto alla creazione del Templates di progetto denominato Progetto Cubo Universitario 46 C.

#### Template di costruzione

Si definiscono le proprietà dei componenti dell'edificio di seguito elencati.

*Pareti:* Esterno (Parete esterna in cemento armato, Rivestimento parete perimetrale con parete esterna), Interno (Tramezzo), Semiesposto, ossia quella zona intermedia tra ambiente riscaldato il non riscaldato (Tramezzo intonacato), Sotto-superficie parete esterna, ossia quella sub-superficie avente proprietà differenti rispetto al resto della parete (Pannello opaco finestra), Sottosuperficie su parete interna (nessuna)

*Pavimenti, Solai, Soffitti Combinati:* Tetti Piani (Solaio di copertura in cemento armato precompresso, Solaio di copertura in laterocemento), Pavimento Semiesposto (Solaio interpiano in laterocemento), Pavimento Interno (Solaio interpiano in cemento armato precompresso, Solaio interpiano in laterocemento), Sotto-superficie su tetto (Elemento in lamiera grecata su solaio di copertura, Tetto Verde settore 1, Tetto Verde su settore 2, Tetto Verde su settore 3, Solaio in c.a.p. solaio in laterocemento)

*Porte:* Porte esterne (Porta esterna vetrata), Porte interne (Porta interna, Porta tagliafuoco)

Per ogni componente sopra elencato sono state definite le apposite stratigrafie (attribuendo a ogni singolo strato le proprietà di spessore, conducibilità, densità e calore specifico tabellate nel paragrafo precedente) e i coefficienti di scambio termico convettivo interno ed esterno; in particolare questi ultimi sono stati rispettivamente fissati a 5 e 20 W/m<sup>2</sup>°C.

#### Templates delle attività

I Templates delle attività definiscono l'utilizzo delle zone in cui è stato suddiviso l'edificio. I dati che devono essere inseriti riguardano l'occupazione, l'uso delle attrezzature, le temperature interne di progettazione, i livelli d'illuminazione e di ventilazione. I Template delle attività realizzati per il cubo 46C sono tre:

- Zone semi esterne non condizionate
- Zone ufficio
- Zone di passaggio

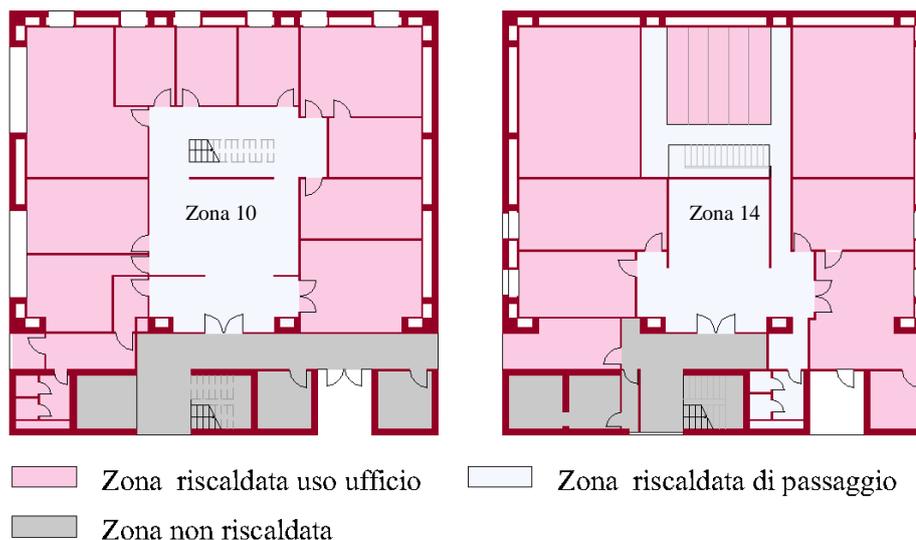


Figura 2. 41 – Zonizzazione termica del terzo e quarto piano

Dalle due piante si nota che le zone esposte ad est, evidenziate in pianta dal colore rosa, sono zone esterne non condizionate, difatti essendo zone di collegamento tra i vari piani (vi sono scale, ascensori, disimpegni e servizi igienici) non prevedono alcun impianto di riscaldamento o raffreddamento. La zona 10 del terzo piano e la zona 14 del quarto piano in realtà dovrebbe essere identificata come zona di passaggio ma essendo comunicante con una zona riscaldata del piano superiore a causa della presenza di un foro realizzato per l’inserimento di un corpo scala, il programma riconosce il tutto come zona riscaldata presupponendo che il calore in assenza di barriere si propaghi in tutti gli ambienti. Gli ambienti colorati in verde sono le zone adibite ad ufficio mentre le zone blu individuano le zone di passaggio che sono comunque riscaldate ma l’afflusso di persone è diverso e non vi sono computer o strumentazioni d’ufficio aggiuntivi.

Per la realizzazione dei templates delle attività Design Builder richiede:

**Informazioni di tipo generale:** la fonte dei dati, la regione legislativa di riferimento, la categoria a cui appartiene il template e una breve descrizione di questo.

**Definizione di tutti gli apporti:** è possibile procedere in modalità “raggruppata”, “preliminare” o “dettagliata”; la prima condizione, adottata in tale studio, permette di assumere un valore generale comprensivo di tutti i contributi termici interni di illuminazione, utenti e apparecchiature; la seconda, invece, differenzia i contributi.

**Occupazione e altri apporti:** rappresentano i contributi termici offerti dalla presenza delle persone e dalle apparecchiature presenti tipicamente nella specifica destinazione d’uso che si sta analizzando; nel caso di uffici essi saranno rappresentati da computer, stampanti, fotocopiatrici. Tali due schede non sono state compilate in quanto è stata scelta la modalità “raggruppata”.

**ACS:** acqua calda sanitaria definita in termini di consumo in l/mq giorno. La norma non fornisce precise indicazioni per ambienti destinati ad uso ufficio; pertanto anche tale parametro nello specifico caso di analisi può essere trascurato.

**Controllo ambiente:** tale voce definisce i requisiti relativi al comfort ambientale in termini di: Temperatura di raffrescamento (se l’ambiente è raffrescato), Temperatura di riscaldamento (se l’ambiente è riscaldato), Livello di illuminazione, Sistema di ventilazione (naturale o meccanica), Aria minima di rinnovo per la ventilazione.

Relativamente al raffrescamento e al riscaldamento si definiscono le temperature di set-point e set-back rispettivamente a 26 °C e 35 °C nel primo caso, 20 °C e 5 °C nel secondo. La temperatura di set-point è quella temperatura ideale a cui deve mantenersi un ambiente in presenza di persone; la temperatura di set-back, invece, è quella temperatura in corrispondenza del quale il sistema di raffrescamento/riscaldamento si attiva quando l’ambiente non è occupato dall’utenza al fine di non comportare un eccesso abbassamento/innalzamento della temperatura interna. Tale opzione si attiva quando la schedule è su “off”. Infatti, per la stagione estiva la temperatura prevista negli ambienti è di 26 C° e il “setback di raffrescamento” è stato fissato a 35 C°; ciò vuol dire che una volta raggiunta tale temperatura l’impianto di raffrescamento si accende per evitare che la temperatura si innalzi ulteriormente. Per la stagione invernale, invece, la temperatura prevista negli ambienti è di 20 C° e il “setback di riscaldamento” è stato fissato a 5 C°, una volta arrivati a questo valore l’impianto di riscaldamento si accende evitando abbassamenti eccessivi della temperatura [49]. È stato inoltre definito una “Schedule” di funzionamento sia per l’impianto di raffrescamento che di riscaldamento. La “Schedule”, infatti, rappresenta i profili di funzionamento dei sistemi di climatizzazione per fase orarie quotidiane, giorni della settimana, mesi e anno; Tali indicazioni dipendono dalla città di appartenenza dell’edificio in esame, e in particolare della fascia climatica in cui tale città ricade. Relativamente alla città di Rende, appartenente alla zona climatica D, i periodi di accensione dei sistemi di riscaldamento/raffrescamento sono di seguito riportati in modalità 7/12 (ossia in funzione delle ore, della settimana, dei mesi dell’anno):

Programmi Dati							
Generale							
Generalità							
Nome	schedule riscaldamento						
Descrizione							
Fonte	DesignBuilder						
Categoria	UFFICI						
Regione	General						
Tipo di programma	1-Programma 7/12						
Giorni di progetto							
Definizione giorno di progetto	1-End use default						
Utilizza default	1-Generale						
Profili							
Me...	Lunedì	Martedì	Mercoledì	Giovedì	Venerdì	Sabato	Domenica
Gen	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Feb	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Mar	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Apr	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Mag	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Giu	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Lug	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Ago	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Set	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Ott	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Nov	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Dic	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off

Programmi Dati

Generale

Generalità

Nome **schedule raffrescamento**

Descrizione

Fonte DesignBuilder

Categoria UFFICI

Regione General

Tipo di programma 1-Programma 7/12

Giorni di progetto

Definizione giorno di progetto 1-End use default

Utilizza default 1-Generale

Profili

Me...	Lunedì	Martedì	Mercoledì	Giovedì	Venerdì	Sabato	Domenica
Gen	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Feb	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Mar	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Apr	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Mag	8:00 to 18:00	Off	Off				
Giu	8:00 to 18:00	Off	Off				
Lug	8:00 to 18:00	Off	Off				
Ago	8:00 to 18:00	Off	Off				
Set	8:00 to 18:00	Off	Off				
Ott	8:00 to 18:00	Off	Off				
Nov	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Dic	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off

Figura 2. 42 – Rappresentazione della schedule di riscaldamento e raffrescamento.

L’aria minima di rinnovo si riferisce all’immissione dell’aria esterna da parte dell’impianto e questo valore varia in funzione della destinazione d’uso. Il ricambio d’aria assicura condizioni ambientali igieniche e di benessere. Il valore inserito è stato ricavato dalla normativa UNI 10339 [55]

Le zone non condizionate non prevedono alcun tipo di impianto per cui per la realizzazione di questo template bisogna andare sulla Scheda delle Attività e spuntare il Tipo di Zona “Semi esterno non condizionato”.

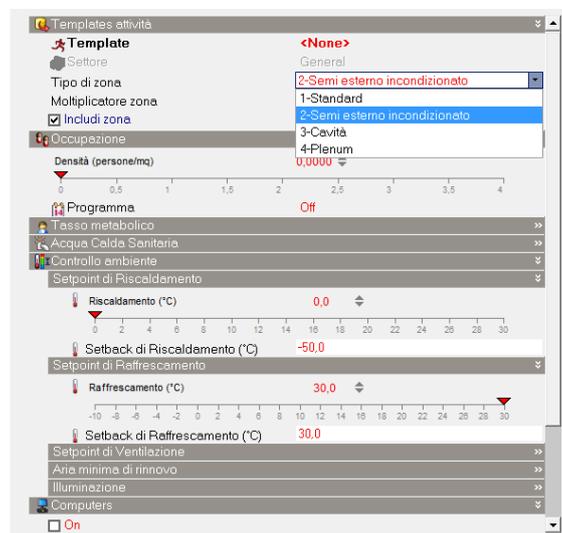


Figura 2. 43 - Template semi esterno non condizionato.

Infine nella definizione degli apporti interni, in riferimento al caso in esame i valori da impostare sono stati estratti dalla norma UNI TS 11300-1 relativa alla determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. Tale norma riporta due differenti metodologie di calcolo degli apporti interni: una globale, generalmente impiegata in fase di progetto per la certificazione energetica dell’edificio, una dettagliata, maggiormente adatta alla definizione dell’audit energetico e della verifica dei consumi reali di un edificio già esistente. Il

caso studio attinge ai valori dettagliati dei profili temporali degli apporti termici degli occupanti e delle apparecchiature. Per edifici adibiti ad uffici è stato utilizzato il prospetto 10 della norma UNI TS 11300-1 di seguito riportata [56]:

**Profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature** (edifici adibiti ad uffici)

Giorni	Ore	Ambienti ufficio (60% della superficie utile di pavimento) $(\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}})/A_f$ W/m <sup>2</sup>	Altre stanze, atri, corridoi (40% della superficie utile di pavimento) $(\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}})/A_f$ W/m <sup>2</sup>
Lunedì - Venerdì	07.00 - 17.00	20,0	8,0
	17.00 - 23.00	2,0	1,0
	23.00 - 07.00	2,0	1,0
	Media	9,50	3,92
Sabato - Domenica	07.00 - 17.00	2,0	1,0
	17.00 - 23.00	2,0	1,0
	23.00 - 07.00	2,0	1,0
	Media	2,0	1,0
Media		7,4	3,1

$(\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}})$  è il flusso termico dalle persone e dalle apparecchiature, in W;  
 $A_f$  è la superficie utile di pavimento.

**Tabella 2. 21 – Profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature per edifici adibiti ad uffici.**

Quindi :

- Per il Template “Zona Ufficio” si ha un apporto interno raggruppato di massimo 20 W/m<sup>2</sup>;
- Per il Template “Zona di passaggio” si ha un apporto raggruppato di massimo 8 W/m<sup>2</sup>.

In funzione di tali valori massimi si è proceduto alla definizione della Schedule degli apporti termici, programmata in modalità “compact” visto che il contributo degli apporti viene considerato in tutto l’arco annuale senza periodi di interruzione come accadeva per i sistemi di climatizzazione. Come suggerito dalla norma UNI TS 11300 La schedule deve distinguere gli apporti termici dei giorni lavorativi e di quelli festivi, in cui la presenza di persone il funzionamento delle apparecchiature sono minime; all’interno di tali giorni, poi, definisce gli apporti relativamente a specifiche fasce orarie.

### Template delle vetrate

La realizzazione di tale template risulta di facile realizzazione in quanto si dispone di un’unica tipologia di vetrata nonostante le aperture siano costituite da dimensioni geometriche differenti. Le voci da compilare riguardano pertanto: Vetro: viene stabilita la tipologia di vetro secondo la stratigrafia precedentemente tabellata ed il tipo di telaio in acciaio zincato; Sistemi di schermatura: tale voce offre la possibilità di non trascurare eventuali sistemi di schermatura presenti sull’edificio quali veneziane, frangisole, ecc; tale condizione non ricade nel caso in esame.

### Template HVAC

Tale template risulta necessario per le impostazioni dei sistemi di riscaldamento – raffrescamento e ventilazione, da caricare poi nei dati dell’edificio che si è costruito. La voce riguardante la ventilazione naturale come precedentemente dichiarato; la voce “Riscaldamento e Raffrescamento”

consente di stabilire la tipologia di combustibile (elettricità dalla rete) e i valori riguardanti il coefficiente di prestazione degli impianti adoperati nell'edificio in esame. La ventilazione meccanica viene considerata impostando come modalità di aria esterna la voce "Aria minimo di rinnovo per area?"; quest'ultimo viene determinato

Come prodotto tra l'aria minima di rinnovo, per uso ufficio, pari a 11l/s per persona e l'indice di affollamento pari a 0,06 persona/mq; entrambi i parametri sono forniti dalla norma UNI 10339. Il valore definitivo inserito nel codice risulta, pertanto 0,66 l/s m<sup>2</sup>.

The screenshot shows the 'Templates di HVAC Dati' window with four tabs: 'Generale', 'Ventilazione', 'Riscaldamento e Raffrescamento', and 'Distribuzione temperatura aria'. The 'Riscaldamento e Raffrescamento' tab is active, showing parameters for both heating and cooling systems.

Riscaldamento	
<input checked="" type="checkbox"/> On	
Combustibile	1-Elettricità della rete
Preriscaldamento (hr)	0,0
Semplice	
CoP del sistema di riscaldamento	2,35
Tipo di sistema di riscaldamento	1-Convettivo
Condizione aria immessa	
Temperatura aria immessa (°C)	30,00
Tasso di umidità per l'aria immessa (g/g)	0,010
Compact	
CoP della caldaia	4,35
Perdita per distribuzione in riscaldamento (%)	5,00
Corresponding outdoor low temperature (°C)	-6,70
Min off-coil setpoint temperature (°C)	12,00
Corresponding outdoor high temperature (°C)	10,00
Raffrescamento	
<input checked="" type="checkbox"/> On	
Preraffrescamento (hr)	0,0
Semplice	
CoP del sistema di raffrescamento	1,83
Condizione aria immessa	
Temperatura aria immessa (°C)	18,00
Tasso di umidità per l'aria immessa (g/g)	0,008
Compact	
CoP del chiller	2,50
Perdita per distribuzione in raffrescamento (%)	5,00
Setpoint batteria di raffrescamento (°C)	14,00
Corresponding outdoor high temperature (°C)	26,70
Max off-coil setpoint temperature (°C)	18,00
Corresponding outdoor low temperature (°C)	15,60

Figura 2. 44 – Rappresentazione del Template di HVAC Dati.

### 2.3.3 Modello geometrico dell'edificio

Conclusa la costruzione dei templates si procede con la modellazione geometrica del cubo universitario.

-definizione del nome del progetto e della località in cui esso è collocato. Quest'ultimo rappresenta un parametro fondamentale per la simulazione dinamica in quanto è caratterizzato dai valori di radiazione solare medi mensili, di temperatura dell'aria esterna media mensile, di temperatura del cielo del giorno medio mensile e della velocità del vento media annuale.

-creazione della geometria del terzo e del quarto piano del cubo universitario 46C supportati dalla planimetria precedentemente creata e semplificata rispetto a quella reale, in funzione delle zone riscaldate e non condizionate. Creato l'involucro esterno si è proceduto poi alla definizione delle partizioni interne, delle aperture interne (porte) ed esterne (finestre e ingressi). È stato inoltre necessario inserire, in corrispondenza di alcune vetrature esterne, apposite "sottosuperfici" con il quale modellare la parte degli infissi costituiti da pannelli opachi. Ulteriori sottosuperfici sono state inserite in corrispondenza del tetto al fine di distinguere la zona costituita da lamiera grecata, la zona corrispondente al tetto verde (settore1, settore 2, settore3), la zona occupata dalla sola copertura in c.a.p. e l'area occupata dalla copertura tradizionale in laterocemento.

- Assegnazione delle attività in ogni zona per entrambi i blocchi.
- Assegnazione degli apporti precedentemente definiti; nelle zone individuate come “non condizionate”, ossia quelle zone di passaggio fungenti da filtro tra interno - esterno non è assegnato alcun apporto; alle zone rappresentanti gli uffici è stato assegnato il template caratterizzato dal valore di apporto massimo  $20 \text{ W/m}^2$ , mentre alla zona riscaldata fungente da transito per i vari uffici è stato assegnato il template caratterizzato dal valore di apporto massimo  $8 \text{ W/m}^2$  (Zona 10 del terzo piano e Zona 14 del quarto piano).
- Assegnazione dei materiali a ogni singolo componente dell'edificio, quali infissi esterni ed interni, partizioni interne, muri perimetrali, solai intermedi e di copertura. Inserimento del “blocco componente di tipo adiabatico” collocato inferiormente all'edificio modellato. Tale blocco risulta necessario in quanto sono stati riprodotti solamente gli ultimi due livelli dell'edificio; pertanto con tale procedura si imposta che inferiormente l'edificio non è a contatto con il terreno, bensì con zone aventi approssimativamente temperature analoghe a quelle corrispondenti superiormente.

### 2.3.4 Dati Climatici

Allo scopo di effettuare le simulazioni energetiche, è stato messo a punto un file climatico per la città di Cosenza. Si è fatto uso di dati appositamente elaborati attraverso la procedura di generazione contenuta nel software TRNSYS, metodi empirici e dati sperimentali.

I dati climatici richiesti in Energy Plus sono:

Località: *Città*: Cosenza - *Paese*: Italia - *Latitudine*:  $39^{\circ}18'$  - *Longitudine*:  $16^{\circ}15'$  - *Altitudine*: 238

Riferimento temporale: *Anno*: Anno dei dati. Non è realmente usato in Energy Plus, è utilizzato nel programma Meteo Converter per la visualizzazione del file di controllo. *Mese*: Il campo Mese non può mancare, va da 1 a 12. *Giorno*: Il campo Giorno dipende dal mese, non può mancare. *Ora*: Il campo Ora va da 1 a 24, un'ora è da 00:01 a 01:00. Non può mancare. *Minuto*: il campo minuti va da 1 a 60.

Grandezze climatiche:

*Temperatura a Bulbo Secco* [ $^{\circ}\text{C}$ ]: oscillazione dei valori validi da  $-70^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$ . *Umidità Relativa* [%]: umidità relativa in percentuale al momento indicato. I valori vanno da 0% a 100%. *Pressione Atmosferica* [Pa]: oscillazione dei valori validi da 31.000 a 120.000. Questi valori sono stati stabiliti dalla “pressione barometrica standard” per tutte le altezze del mondo. *Radiazione Infrarossa Orizzontale* [ $\text{Wh/m}^2$ ]: dovrebbe avere un valore minimo di 0; il valore mancante per questo campo è 9999. *Radiazione Diretta Normale* [ $\text{Wh/m}^2$ ]: quantità di radiazione solare in  $\text{Wh/m}^2$  ricevuta direttamente dal disco solare su una superficie perpendicolare ai raggi del sole durante il numero di minuti precedenti all'ora indicata. *Radiazione Orizzontale Diffusa* [ $\text{Wh/m}^2$ ]: quantità di radiazione solare in  $\text{Wh/m}^2$  ricevuta dal cielo (escluso il disco solare) su una superficie orizzontale durante i minuti precedenti all'ora indicata. *Indice di nuvolosità*: variabile tra 0 e 1. *Velocità del Vento* [m/s]: oscillazione dei valori da 0 a 40. *Altezza delle Precipitazioni* [mm]: quantità di precipitazioni liquide osservata al momento indicato per il periodo indicato.

### Generazione dei dati climatici

Il TRNSYS è un codice di simulazione dinamica caratterizzato da una struttura modulare, un sistema definito da più componenti interagenti tra di loro. Ogni componente è rappresentato da un “box”, ossia un TYPE, che richiede parametri input e che produce, a sua volta, parametri output. Si parte dalla definizione dei singoli componenti e dalla connessione tramite legami fisici tra questi per poter definire il modello dell'intero sistema. Ad ogni TYPE, inoltre, è associata una sub-routine che modella il componente in termini di equazioni differenziali del primo ordine e/o sistemi di equazioni algebriche. Al modulo di simulazione è affidato il compito di risolvere numericamente l'intero sistema di equazioni associato al sistema complessivo tenendo conto delle interconnessioni, che matematicamente si traducono nella necessità di trovare mediante processo iterativo i valori delle variabili d'uscita che soddisfino, entro i limiti di tolleranza specificati, tutte le equazioni del sistema [57]. Inizialmente si è fatto uso del TYPE 54 Hourly Weather Data Generator necessario per generare dati meteorologici orari a partire da dati input quali: valori medi mensili di radiazione solare, temperatura a bulbo secco, umidità e velocità del vento. I dati sono generati in modo tale che le loro statistiche associate siano approssimativamente uguali alle statistiche a lungo termine nella località specificata. Lo scopo di tale metodo è di generare un anno di dati tipici, simili ad un anno tipico meteorologico attraverso specifici algoritmi.

I dati input richiesti dal TYPE 54 sono di seguito elencati e presentati nella Figura 2. 45:

- Nome della località
- Latitudine (oscillante tra  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ )
- Radiazione solare globale giornaliera media mensile [KJ/m<sup>2</sup>]
- Contenuto di Umidità giornaliera media mensile [%]
- Temperatura giornaliera media mensile [°C]

line 1: NLOC	
line 2: LOCATION 1	LATITUDE
line 3: I1 I2 I3 ... I12	
line 4: w1*10000 w2*10000 w3*10000 ... w12*10000	
line 5: TEMP1 TEMP2 TEMP3 ... TEMP12	
line 6: LOCATION 2	LATITUDE
line 7: I1 I2 I3 ... I12	
ETC.	

Figura 2. 45 – Format per dati input

### Generazione dei Dati Climatici Orari

Le grandezze generate mediante il Type 54 del codice TRNSYS sono:

- Temperatura di bulbo secco: tale parametro viene definito attraverso un modello denominato stocastico in cui vengono calcolati 24 valori della temperatura a bulbo secco media oraria mensile e le deviazioni orarie da questi valori medi sono poi calcolate con un modello auto regressivo del secondo ordine.
- Umidità relativa: l'input dei valori di umidità sono convertiti in temperature di rugiada medie mensili. Le temperature di rugiada medie giornaliere sono ottenute da una distribuzione normale (con la media pari alla temperatura di rugiada e la deviazione standard pari alla deviazione standard della temperatura a bulbo secco massimo giornaliero) e ordinati secondo una sequenza.
- Radiazione globale sul piano orizzontale;
- Radiazione diretta normale;
- Velocità del vento: il codice richiede in input i valori medi mensili della velocità del vento dai quali riesce a valutare i valori orari.

La velocità del vento è assunta di default pari a 4 m/s, a meno che l'utente immetta altri valori di input. I valori giornalieri sono calcolati da una distribuzione normale con una media pari al valore medio mensile e ad una deviazione standard pari a 0,31 volte la media; i valori orari sono poi ordinati da una sequenza. I valori orari sono selezionati a caso da una distribuzione normale con una media uguale al valore medio giornaliero e la deviazione standard uguale a 0,35 volte la media. Non disponendo di valori medi mensili per la località in questione, si è utilizzato il solo dato disponibile, ovvero quello medio annuale pari a 2,4 m/s, attribuendolo costante per ogni mese. Successivamente è stato utilizzato il **TYPE 16: Solar Radiation Processor**, che è un componente che gestisce tutte le operazioni necessarie per calcolare la radiazione incidente su una superficie inclinata a partire dalla radiazione solare disponibile nel file dati. Per calcolare la radiazione solare su un piano il TYPE 16 pone a disposizione 5 metodi; la differenza tra questi metodi sta nei dati di input. In questo caso è stato utilizzato il metodo 4 che assume la radiazione globale sul piano orizzontale e la radiazione diretta normale come dati di input per il calcolo della diffusa sul piano orizzontale. Per il calcolo dell'intensità di Radiazione Infrarossa Orizzontale, richiesta dall'energy plus come dato input, non disponendo per le diverse località valori ottenuti da misurazioni sistematiche, si ricorre a metodologie indirette che impiegano correlazioni empiriche funzioni di variabili meteorologiche misurate a terra. L'irraggiamento infrarosso viene calcolato, basandosi sulla formulazione di Stefan Boltzmann, considerando l'emissività apparente dell'atmosfera  $\varepsilon$ , definita con riferimento all'emissione  $G_a$  di una superficie nera posta alla temperatura dell'aria  $T_a$  **Error! Reference source not found.:**

$$G_l = \varepsilon \cdot G_a = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{aria}^4$$

Con:  $G_l$ : irraggiamento infrarosso [ $W/m^2$ ];  $\varepsilon$ : emissività del cielo;  $\sigma$ :  $5,7 \cdot 10^{-8}$  [ $W/m^2 \cdot K^4$ ] è la costante di Stefan-Boltzman,  $T_{aria}$ : temperatura dell'aria [K].

Il valore di emissività viene definito attraverso la correlazione di Aubinet ad un solo parametro, ovvero l'emissività media giornaliera, correlata empiricamente all'indice di serenità  $k$  come segue:

$$\varepsilon = 0.909 - 0.233K$$

Per determinare l'emissività, quindi, risulta necessaria la conoscenza dell'indice di serenità; Questo indice consente di svincolare la distribuzione della radiazione solare sia dalla località che dal mese di appartenenza. Infatti, come è stato dimostrato dagli autori stessi, mentre la distribuzione di frequenza della radiazione giornaliera ha caratteristiche dipendenti dalla località considerata, la distribuzione di frequenza dell'indice di serenità ha una validità pressoché globale, dipendendo esclusivamente dal valore medio mensile dell'indice di serenità stesso. Il metodo in questione si basa proprio su tale parametro adimensionale definito come il rapporto tra la Radiazione Totale sulla superficie orizzontale e la Radiazione Solare Extratmosferica  $H/H_{ext}$  ricavati con il Type 16.

Il valore della radiazione infrarossa, pertanto risulterà essere calcolata in tale procedura come valore giornaliero medio mensile; si è ricorso, così, al TYPE 16 per la necessità di disporre di risultati orari medi giornalieri. Altro parametro richiesto come input è l'indice di nuvolosità calcolato attraverso il TYPE 69, il quale utilizza la seguente correlazione:

$$N = \left( 1,4286 \frac{E_{Dif}}{E_{Glob,H}} - 0,3 \right)^{0,5}$$

dove  $E_{dif}$  è la radiazione diffusa oraria e  $E_{Glob,H}$  è la radiazione globale sul piano orizzontale. Per le ore notturne viene utilizzato un fattore medio calcolato nelle ore pomeridiane.

## Dati di Precipitazione

Per definire i dati di precipitazione si è partiti dalla considerazione che tale fenomeno è sempre legato al valore di umidità relativa, in quanto più alto è il valore di umidità relativa, e quindi la quantità di vapore presente nell'aria, per una certa temperatura, più ci si avvicina a saturazione e quindi più probabile sarà il fenomeno di precipitazione. Il valore di umidità relativa inoltre è fortemente legato, tramite una correlazione inversa, alla temperatura di rugiada, o ancor meglio alla differenza tra la temperatura di rugiada e quella a bulbo secco; minore è tale scarto, maggiore risulterà il valore di umidità relativa e di conseguenza la possibilità che si verifichi il fenomeno piovoso [58]. Occorre ricordare, inoltre, che la temperatura di bulbo umido  $T_{wet}$  è sempre compresa tra la temperatura di rugiada  $T_d$  e quella dell'aria esterna  $T_{bs}$  e in particolare quando l'aria risulta satura la temperatura di bulbo umido coincide con quella di rugiada e con quella a bulbo secco. La relazione generale tra le tre temperature quindi è del tipo:

$$T_d \leq T_{wet} \leq T_{bs}$$

In funzione di tale considerazione si è proceduto, per la definizione del fenomeno precipitativo considerando i valori orari di umidità relativa e la differenza di temperatura:

$$\Delta T = T_{bs} - T_{wet}$$

Con:  $T_{bs}$ : Temperatura a Bulbo Secco [°C],  $T_{wet}$ : Temperatura a Bulbo Umido [°C].

Per tutte le ore in cui il  $\Delta T$  ricade in un prefissato intervallo, è stato calcolato il valore medio di umidità relativa. I valori ottenuti sono riportati in Tabella 2. 22:

	$0 < \Delta T < 0,5$	$0 < \Delta T < 1$	$0 < \Delta T < 1,5$	$0 < \Delta T < 2$	$0 < \Delta T < 3$	$0 < \Delta T < 4$
Ur (%)	97.4	93.3	89.6	86.2	80.5	76.1

Tabella 2. 22 - Intervalli di temperatura e umidità relativa media.

In questo modo è possibile ottenere una preliminare selezione delle ore in cui vi è possibilità che si verifichi un evento piovoso. Per un risultato più accurato si è proceduto ad un ulteriore controllo che utilizza l'indice di serenità  $k$ . Tale indice risulta variabile nell'intervallo che va da 0 (cielo totalmente nuvoloso) a 1 (cielo completamente sereno). In particolare si deciso di eliminare tutte quelle ore per le quali risulta essere  $K > 0.3$ . Tale procedura è stata attuata poiché è necessario elidere dalla valutazione appena fatta quelle ore in cui il fenomeno precipitativo è poco probabile; pertanto maggiore è il valore di  $K$ , maggiore sarà la radiazione incidente sul terreno, e quindi minore sarà la probabilità di evento piovoso. Lo scopo di questa verifica è di non cadere nell'errore per cui nelle ore in cui l'indice di serenità assume un valore elevato vi sia un evento piovoso. Il confronto con l'indice  $K$  considera esclusivamente le ore diurne poiché nelle ore notturne l'indice assume valore pari a 0, dipendendo per definizione dalla radiazione solare, assente di notte. Pertanto, al fine di rendere ancora più accurata la procedura, è stata effettuata una ulteriore restrizione prendendo in considerazione l'indice di nuvolosità  $N$ . Nello specifico si è proceduto ad eliminare tutte le ore in cui risulta un valore  $n < 7$  decimi di cielo associando a un basso tasso di copertura di copertura del cielo un altrettanto basso valore probabilistico del fenomeno di pioggia. Con tale procedura sono state prese in analisi anche le ore notturne altrimenti escluse con l'utilizzo del solo indice di serenità. Nella figura successiva sono riportate le ore di precipitazione considerate nei vari range di  $\Delta T$  nel caso di nessun controllo, nel caso di controllo con l'indice di serenità, nel caso di controllo con l'indice di serenità e l'indice di nuvolosità.

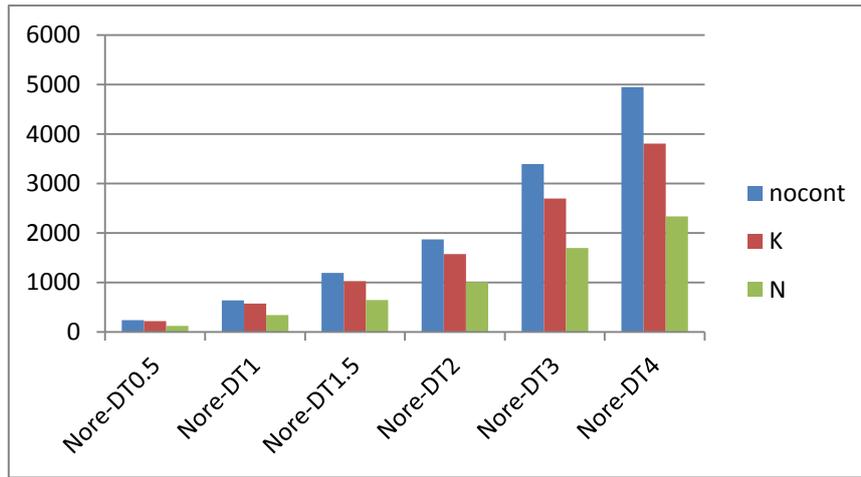


Figura 2. 46 - Numero di ore in cui è possibile il verificarsi di un evento piovoso, determinate secondo diverse strategie di controllo.

I medesimi risultati sono inoltre riportati nella seguente Tabella 2. 23.

	<b>Nore-DT0.5</b>	<b>Nore-DT1</b>	<b>Nore-DT1.5</b>	<b>Nore-DT2</b>	<b>Nore-DT3</b>	<b>Nore-DT4</b>
<b>nocont</b>	239	642	1191	1871	3395	4948
<b>K</b>	222	573	1024	1576	2699	3803
<b>N</b>	123	343	645	1008	1699	<b>2331</b>

Tabella 2. 23 – Tabella dei risultati descrittivi il numero complessivo di ore di precipitazione in cui è possibile il verificarsi di n evento piovoso, determinate secondo diverse strategie di controllo.

La banca dati dell'Arpacal (Centro Funzionale Multirischi della Calabria) fornisce il valore medio annuale di giorni piovosi per Cosenza. Tale numero è pari a 95, che equivalgono a 2280 ore, per cui è risultato opportuno scegliere come  $\Delta T$  massimo il valore di 4°C. E' stata messa a punto una metodologia che consenta di distribuire, secondo un criterio giustificato, una appropriata quantità di pioggia per ogni ora del giorno così da ottenere una valutazione dinamica dell'evento. Tale criterio si fonda sulla correlazione dell'intensità di pioggia con l'indice di nuvolosità n , in quanto risulta una buona approssimazione considerare il fenomeno piovoso più intenso allorché il cielo si presenti maggiormente coperto da nubi. È stata a tal fine elaborata una correlazione di tipo lineare tra i due parametri. Nello specifico si sono presi in considerazione, come dati di riferimento, i valori derivanti dal sito Arpacal [59]. Tali dati sono relativi alle precipitazioni medie mensili della città di Cosenza degli ultimi 96 anni (vedi Figura 2. 47 e Tabella 2. 24)

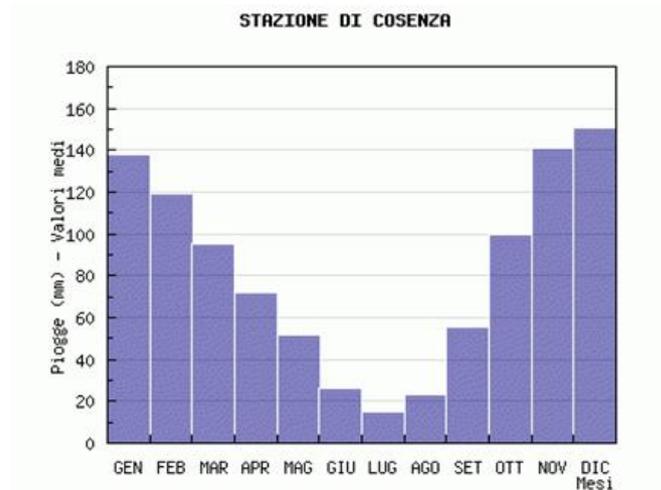


Figura 2. 47 - Valori medi mensili delle precipitazioni (mm) degli ultimi 96 anni, Cosenza.

A tali valori è stata affiancata, per ogni mese dell'anno, la somma delle ore di pioggia valutate nel range di  $\Delta T$  precedentemente definito e da una semplice rapporto è stata ricavato un valore orario di precipitazione mm/h per ogni mese dell'anno.

Mese	Altezza Precipitazioni [mm]	Numero di ore [ora]
Gennaio	138.3	424
Febbraio	119.1	328
Marzo	95.2	205
Aprile	71.8	183
Maggio	51.9	94
Giugno	26.6	52
Luglio	14.8	65
Agosto	23.0	46
Settembre	55.7	90
Ottobre	100.0	196
Novembre	140.9	271
Dicembre	151.1	377
		somma=2331

Tabella 2. 24 - Valori medi mensili dei dati di pioggia negli ultimi 96 anni, Cosenza

La correttezza di tali valori orari di peso di pioggia è stata valutata mensilmente verificando che la somma di tutte le portate orarie corrispondesse al valore di precipitazione mensile derivante dall'Arpacal ed elencato nella tabella precedente.

## 2.4 Soluzioni Proposte e Risultati

Le analisi verificanti le prestazioni termiche della copertura a verde sono state effettuate ponendo a confronto i consumi energetici dell'edificio (di cui si sono presi in considerazione solamente i due livelli sottostanti alla copertura) con diverse tipologie di tetto (Figura 2. 37):

- 1- Copertura interamente costituita da solaio tradizionale in c.a.p., preso come riferimento;
- 2- Copertura interamente costituita dalla stratigrafia “Settore 1”;
- 3- Copertura interamente costituita dalla stratigrafia “Settore 2”;
- 4- Copertura interamente costituita dalla stratigrafia “Settore 3”;
- 5- Copertura con presenza contemporanea di 4 differenti settori, data dalla combinazione delle tipologie precedentemente elencate. Le coperture appena definite sono state ipotizzate esclusivamente sulla porzione di tetto corrispondente agli ambienti riscaldati, ad esclusione di quella parte occupata dalla lamiera zincata. In relazione a tutta la superficie della copertura, pari a 414,24 m<sup>2</sup>, la lamiera zincata ne rappresenta un 17,74%, la porzione di tetto corrispondente alla zona non riscaldata è pari al 13,03% , mentre la porzione di copertura su cui sono state disposte le differenti stratigrafie da analizzare corrisponde al 69,23%

### 2.4.1 Proprietà termofisiche dei sistemi di copertura analizzati

#### *Copertura tradizionale in c.a.p.*

La Figura 2. 48 riporta le caratteristiche termofisiche di tale tipo di copertura avente un valore di trasmittanza globale pari a 0,59 W/m<sup>2</sup>K.

Superficie più interna	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/m <sup>2</sup> K)	4,460
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/m <sup>2</sup> K)	5,540
Resistenza di superficie (mq-K/W)	0,100
Superficie più esterna	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/m <sup>2</sup> K)	19,870
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/m <sup>2</sup> K)	5,130
Resistenza di superficie (mq-K/W)	0,040
Nessuno strato termicamente eterogeneo	
Valore U superficie su superficie (W/mq-K)	0,645
Valore R (mq-K/W)	1,691
<b>Valore U (W/mq-K)</b>	<b>0,591</b>
Con strato termicamente eterogeneo (BS EN ISO 6946)	
Ct - Capacità Termica interna (KJ/mq-K)	184,6800
Limite di resistenza superiore (mq-K/W)	1,691
Limite di resistenza inferiore (mq-K/W)	1,691
Valore U superficie su superficie (W/mq-K)	0,645
Valore R (mq-K/W)	1,691
<b>Valore U (W/mq-K)</b>	<b>0,591</b>

Figura 2. 48 – Proprietà termo fisiche della copertura tradizionale in c.a.p.

#### *Copertura “settore 1”.*

Questa soluzione ipotizza che la porzione di tetto sovrastante gli ambienti riscaldati, sia ricoperta interamente a verde secondo la stratigrafia “Settore 1”. La Figura 2. 49 riporta le caratteristiche termofisiche di tale tipo di copertura avente un valore di trasmittanza globale pari a 0,34 W/m<sup>2</sup>K.

<b>Superficie più interna</b>	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/...)	4,460
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/...)	5,540
Resistenza di superficie (mq-K/W)	0,100
<b>Superficie più esterna</b>	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/...)	19,870
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/...)	5,130
Resistenza di superficie (mq-K/W)	0,040
<b>Nessuno strato termicamente eterogeneo</b>	
Valore U superficie su superficie (W/mq-K)	0,357
Valore R (mq-K/W)	2,944
<b>Valore U (W/mq-K)</b>	<b>0,340</b>
<b>Con strato termicamente eterogeneo (BS EN ISO 6946)</b>	
Ct - Capacità Termica interna (KJ/mq-K)	168,8000
Limite di resistenza superiore (mq-K/W)	2,944
Limite di resistenza inferiore (mq-K/W)	2,944
Valore U superficie su superficie (W/mq-K)	0,357
Valore R (mq-K/W)	2,944
<b>Valore U (W/mq-K)</b>	<b>0,340</b>

Figura 2. 49 – proprietà termo fisiche della copertura “Settore 1”

### Copertura “settore 2”

Le caratteristiche termofisiche di tale tipo di copertura, avente un valore di trasmittanza globale pari a  $0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$ , risultano equivalenti a quella del settore 1

### Copertura “settore 3”

La Figura 2. 50 riporta le caratteristiche termofisiche di tale tipo di copertura avente un valore di trasmittanza globale pari a  $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

<b>Superficie più interna</b>	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/...)	4,460
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/...)	5,540
Resistenza di superficie (mq-K/W)	0,100
<b>Superficie più esterna</b>	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/...)	19,870
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/...)	5,130
Resistenza di superficie (mq-K/W)	0,040
<b>Nessuno strato termicamente eterogeneo</b>	
Valore U superficie su superficie (W/mq-K)	0,270
Valore R (mq-K/W)	3,845
<b>Valore U (W/mq-K)</b>	<b>0,260</b>
<b>Con strato termicamente eterogeneo (BS EN ISO 6946)</b>	
Ct - Capacità Termica interna (KJ/mq-K)	168,8000
Limite di resistenza superiore (mq-K/W)	3,845
Limite di resistenza inferiore (mq-K/W)	3,845
Valore U superficie su superficie (W/mq-K)	0,270
Valore R (mq-K/W)	3,845
<b>Valore U (W/mq-K)</b>	<b>0,260</b>

Figura 2. 50 - Proprietà termofisiche della copertura “Settore 3”

### Copertura con presenza contemporanea di 4 differenti settori

Rispetto all'area di tetto sovrastante gli ambienti riscaldati, pari a  $286,80 \text{ mq}$ , le dimensioni di ogni settore sono:

	settore 1	Settore 2	Settore 3	Copertura c.a.p.
<b>Area [mq]</b>	51,10	51,10	40,00	40,00
<b>Percentuale di copertura [%]</b>	17,82	17,82	13,95	13,95

Tabella 2. 25 – Dimensione di ogni settore rispetto all'intera copertura

## 2.4.2 Risultati

Eseguita la modellazione geometrica dell'edificio, la definizione delle proprietà dei materiali, degli impianti di riscaldamento e raffrescamento, della destinazione d'uso e dei dati climatici del sito in cui il cubo universitario è collocato, si è proceduto con la simulazione dinamica attraverso l'ausilio del codice Energy Plus, attraverso cui è stato possibile risalire all'entità dei consumi energetici degli impianti, considerati a regime discontinuo, ossia con funzionamento esclusivo nelle ore e nei giorni lavorativi. La durata di funzionamento degli impianti di climatizzazione, è determinata in funzione della zona climatica di appartenenza. Essendo il cubo universitario situato a Rende, e rientrando di conseguenza nella zona climatica D, viene ritenuta stagione di riscaldamento, come dettato dalla norma UNI TS 11300 [56], il periodo intercorrente tra il 1° Novembre e il 15 Aprile; quella di raffrescamento comprende i rimanenti mesi dell'anno. In particolare, la medesima normativa definisce "stagione di raffrescamento" quel periodo durante il quale è necessario un apporto dell'impianto di climatizzazione per mantenere all'interno dell'edificio una temperatura interna non superiore a quella di progetto. Nella tabella seguente si riporta la durata della stagione di riscaldamento in funzione della zona climatica:

Zona climatica	Inizio	Fine
<b>A</b>	1° Dicembre	15 Marzo
<b>B</b>	1° Dicembre	31 Marzo
<b>C</b>	15 Novembre	31 Marzo
<b>D</b>	1° Novembre	15 Aprile
<b>E</b>	15 Ottobre	15 Aprile
<b>F</b>	5 ottobre	22 Aprile

Tabella 2. 26 - Durata della stagione di riscaldamento in funzione della zona climatica

È necessario inoltre ricordare che il funzionamento degli impianti di climatizzazione è tale da rispettare la temperatura di set-point di 20 °C nel periodo invernale e di 26 °C nel periodo estivo.

### Fabbisogni termici del cubo universitario 46 C con copertura tradizionale in c.a.p.

Tabella 2. 27 sono rappresentativi del consumo necessario per la climatizzazione invernale ed estiva; tutte le simulazioni successive sono state comparate a questa e i valori derivanti da ogni analisi sono stati valutati sia mensilmente che stagionalmente e normalizzati rispetto all'area utile degli ambienti riscaldati ( $m^2$ ); pertanto tali valutazioni saranno sempre riportate in  $Wh/m^2$

#### Copertura tradizionale in c.a.p.

Mesi	Riscaldamento [Wh/m <sup>2</sup> ]	Raffrescamento [Wh/m <sup>2</sup> ]
<b>Gennaio</b>	6102.48	0

<b>Febbraio</b>	4649.22	0
<b>Marzo</b>	2705.76	0
<b>Aprile</b>	1447.48	0
<b>Maggio</b>	0	-625.65
<b>Giugno</b>	0	-2456.99
<b>Luglio</b>	0	-4652.00
<b>Agosto</b>	0	-4126.12
<b>Settembre</b>	0	-2005.82
<b>Ottobre</b>	0	-250.21
<b>Novembre</b>	1634.53	0
<b>Dicembre</b>	4868.63	0

Tabella 2. 27 - Fabbisogno termico mensile dell'edificio con copertura tradizionale in c.a.p

**Copertura tradizionale in c.a.p.**

<b>Stagione</b>	Riscaldamento [Wh/m <sup>2</sup> ]	Raffrescamento [Wh/m <sup>2</sup> ]
<b>Inverno</b>	21408.10	0
<b>Estate</b>	0	-14116.82

Tabella 2. 28 - Fabbisogno termico stagionale dell'edificio con copertura tradizionale in c.a.p

Di seguito sono stati riassunti in grafico i fabbisogni termici mensili descritti nella tabella precedente:

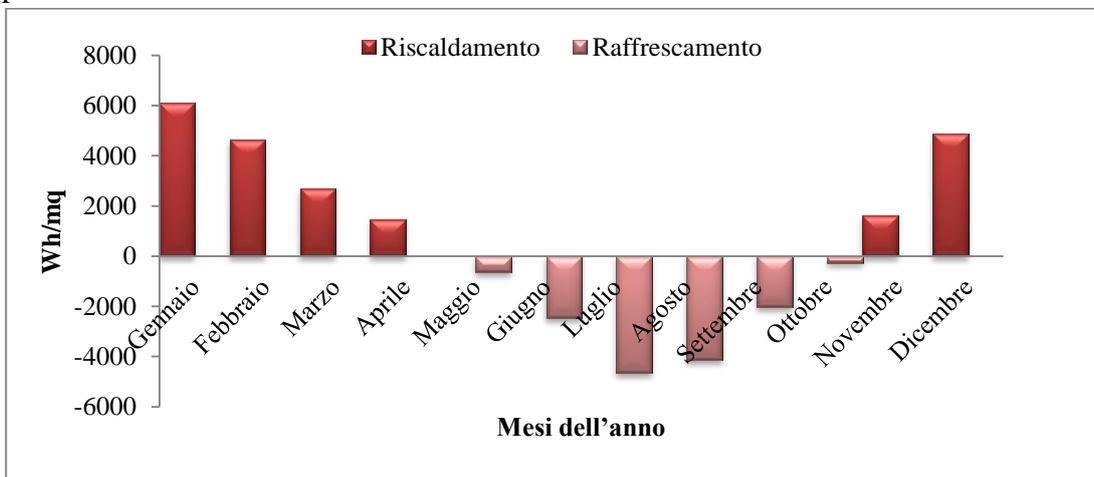


Figura 2. 51 - Fabbisogni mensili dell'edificio con tetto tradizionale in c.a.p.

**Fabbisogni termici del cubo universitario 46 C con copertura “Settore1”**

I fabbisogni termici risultati dalla procedura di simulazione dinamica sono così riportati:

<b>Copertura con settore 1</b>		
<b>Mesi</b>	<b>Riscaldamento [Wh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Raffrescamento [Wh/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Gennaio</b>	5097.98	0
<b>Febbraio</b>	3896.43	0
<b>Marzo</b>	2212.63	0
<b>Aprile</b>	1182.03	0
<b>Maggio</b>	0	-684.113
<b>Giugno</b>	0	-2310.05
<b>Luglio</b>	0	-4272.74
<b>Agosto</b>	0	-3923.28
<b>Settembre</b>	0	-2125.11
<b>Ottobre</b>	0	-418.63
<b>Novembre</b>	1105.23	0
<b>Dicembre</b>	3867.90	0

Tabella 2. 29 - Fabbisogno termico mensile dell'edificio con copertura “Settore 1”

<b>Copertura con settore 1</b>		
<b>Stagione</b>	<b>Riscaldamento [Wh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Raffrescamento [Wh/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Inverno</b>	17362.23	0
<b>Estate</b>	0	-13733.92

Tabella 2. 30 - Fabbisogno termico stagionale dell'edificio con copertura “Settore 1”

Di seguito sono stati riassunti in grafico i fabbisogni termici mensili descritti nella tabella precedente:

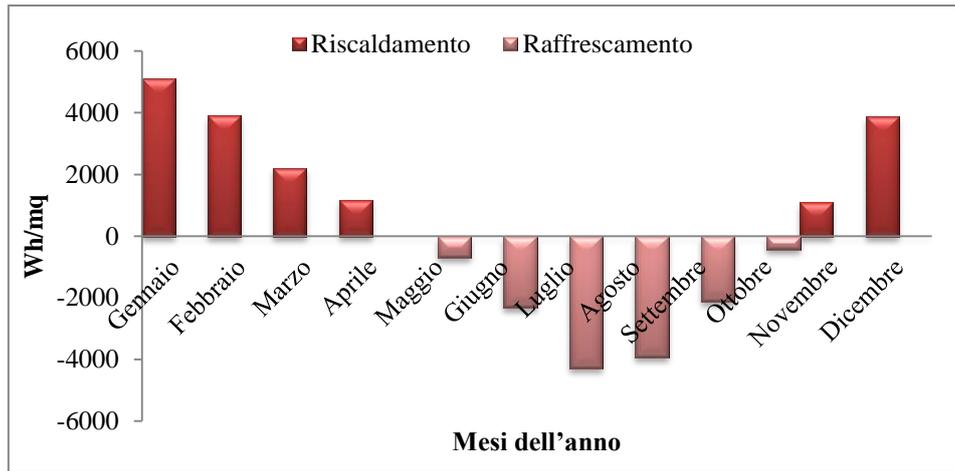


Figura 2. 52 - Fabbisogni mensili dell’edificio con copertura “Settore 1”

**Fabbisogni termici del cubo universitario 46 C con copertura “Settore2”**

Tale simulazione è stata condotta ipotizzando che la porzione di tetto sovrastante gli ambienti riscaldati, sia ricoperta interamente a verde secondo la stratigrafia “Settore 2”. I fabbisogni termici mensili e stagionali corrispondenti al settore 1 sono equivalenti a quelli ottenuti per il settore 2, in quanto le due tipologie di copertura sono costituite da materiali simili, ad esclusione dei rispettivi strati di accumulo e drenaggio. Questi ultimi, in particolare, offrono prestazioni termiche differenziate, in funzione della loro capacità di accumulo; tuttavia il codice di simulazione dinamica trascura la variabilità della conduttività termica in funzione del contenuto d’acqua in ogni strato, fedelmente al modello di D.J.Sailor. Pertanto, essendo trascurato l’unico parametro variabile tra i due modelli, i risultati risultano analoghi, come mostrato nel grafico e nella tabella successiva.

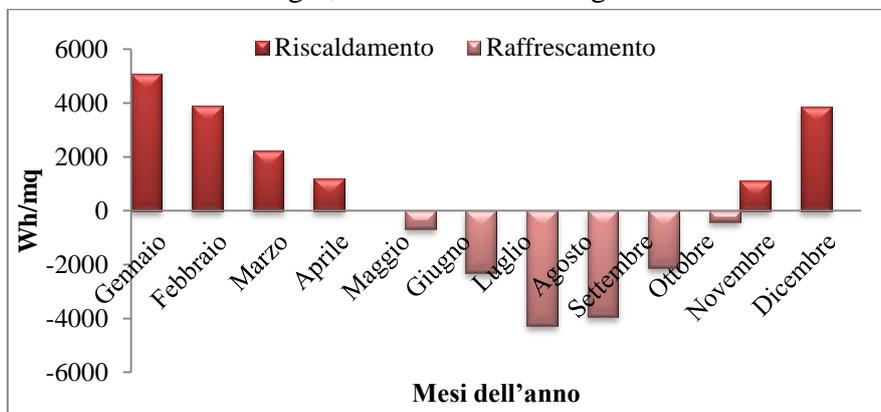


Figura 2. 53 - Fabbisogni mensili dell’edificio con copertura “Settore 2”

**Copertura con settore 2**

Stagione	Riscaldamento [Wh/m <sup>2</sup> ]	Raffrescamento [Wh/m <sup>2</sup> ]
Inverno	17362.23	0
Estate	0	-13733.92

Tabella 2. 31 - Fabbisogno termico stagionale dell’edificio con copertura “Settore 2”

### Fabbisogni termici del cubo universitario 46 C con copertura “Settore 3”

Tale simulazione è stata condotta ipotizzando che la porzione di tetto sovrastante gli ambienti riscaldati, sia costituita dalla stratigrafia “Settore 3, il quale si differenzia dal settore 1 per l’assenza di vegetazione e la presenza di uno strato aggiuntivo di isolante. I fabbisogni termici risultati dalla procedura di simulazione dinamica sono così riportati:

**Copertura con settore 3**

Mesi	Riscaldamento [Wh/m <sup>2</sup> ]	Raffrescamento [Wh/m <sup>2</sup> ]
<b>Gennaio</b>	4857.82	0
<b>Febbraio</b>	3588.24	0
<b>Marzo</b>	1891.12	0
<b>Aprile</b>	906.31	0
<b>Maggio</b>	0	-980.53
<b>Giugno</b>	0	-2768.60
<b>Luglio</b>	0	-4801.21
<b>Agosto</b>	0	-4380.07
<b>Settembre</b>	0	-2470.01
<b>Ottobre</b>	0	-584.56
<b>Novembre</b>	901.47	0
<b>Dicembre</b>	3549.28	0

Tabella 2. 32 - Fabbisogno termico mensile dell’edificio con copertura “Settore 3”

**Copertura con settore 2**

Stagione	Riscaldamento [Wh/m <sup>2</sup> ]	Raffrescamento [Wh/m <sup>2</sup> ]
<b>Inverno</b>	15694.2283	0
<b>Estate</b>	0	-15984.9687

Tabella 2. 33 - Fabbisogno termico stagionale dell’edificio con copertura “Settore 3”

Di seguito sono stati riassunti in grafico i fabbisogni termici mensili descritti nella tabella precedente

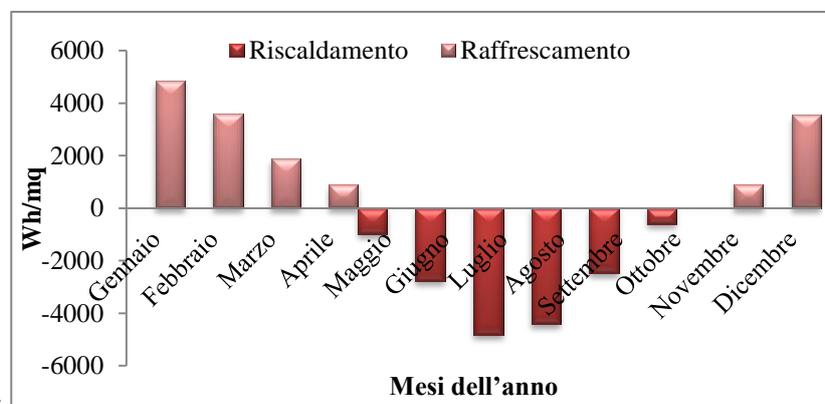


Figura 2. 54 - Fabbisogni mensili dell’edificio con copertura “Settore 3”

### Fabbisogni termici del cubo universitario 46 C con copertura di 4 differenti settori

Tale simulazione è stata condotta ipotizzando che la porzione di tetto sovrastante gli ambienti riscaldati, sia costituita dalla presenza contemporanea dei tre settori, già precedentemente descritti, e di una porzione rimanente in c.a.p.

I fabbisogni termici risultati dalla procedura di simulazione dinamica sono così riportati:

<b>Copertura a 4 settori</b>		
<b>Mesi</b>	<b>Riscaldamento [Wh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Raffrescamento [Wh/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Gennaio</b>	5212.95	0
<b>Febbraio</b>	4002.11	0
<b>Marzo</b>	2326.95	0
<b>Aprile</b>	1276.53	0
<b>Maggio</b>	0	-567.57
<b>Giugno</b>	0	-2119.84
<b>Luglio</b>	0	-4096.89
<b>Agosto</b>	0	-3750.89
<b>Settembre</b>	0	-1980.33
<b>Ottobre</b>	0	-323.44
<b>Novembre</b>	1175.50	0
<b>Dicembre</b>	3994.65	0

Tabella 2. 34 - Fabbisogno termico mensile dell'edificio con copertura costituita dalla presenza contemporanea di tre tipi di tetto verde e di un solaio in c.a.p.

<b>Copertura con settore 2</b>		
<b>Stagione</b>	<b>Riscaldamento [Wh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Raffrescamento [Wh/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Inverno</b>	17988.69	0
<b>Estate</b>	0	-12838.97

Tabella 2. 35 - Fabbisogno termico stagionale dell'edificio con copertura costituita dalla presenza contemporanea di tre tipi di tetto verde e di un solaio in c.a.p.

Di seguito sono stati riassunti in grafico i fabbisogni termici mensili descritti nella tabella precedente:

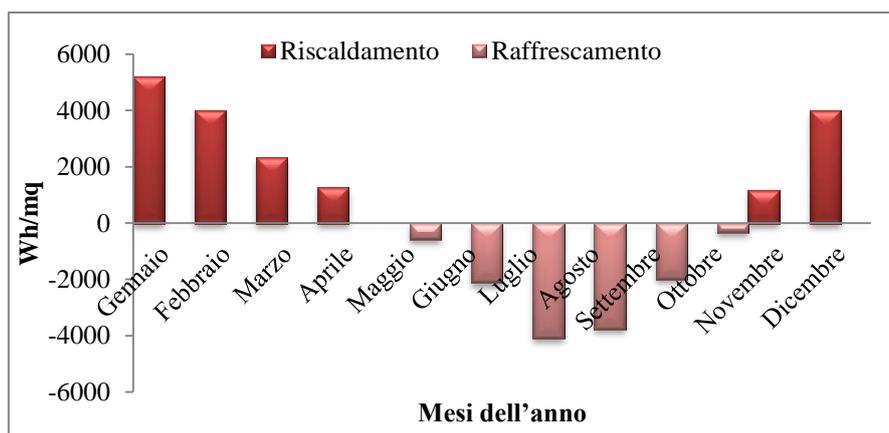


Figura 2. 55 - Fabbisogni mensili dell'edificio con copertura in presenza contemporanea di tre tipi di tetto verde e di un solaio in c.a.p.

### 2.4.3 Analisi dei Risultati

La prima osservazione emergente dal confronto delle varie tipologie di copertura prese in esame è l'incisività della presenza del tetto verde nei fenomeni di trasmissione del calore attraverso il tetto. Esso infatti condiziona notevolmente la trasmittanza termica della copertura, come di seguito rappresentato:

	Settore 1	Settore 2	Settore 3	Copertura tradizionale in c.a.p.
<b>Trasmittanza della copertura [W/m<sup>2</sup>K]</b>	0,34	0,34	0,26	0,591

Tabella 2. 36 - Valori di trasmittanza termica delle tre tipologie di tetto verde e della copertura tradizionale in c.a.p.

Una copertura a verde, quindi, possiede sempre una trasmittanza termica inferiore rispetto a una tradizionale; il valore più basso si riscontra per il settore 3 per la presenza aggiuntiva di uno strato isolante. Per un confronto tra i vari casi sperimentati, si riporta di seguito un ulteriore grafico riassuntivo descrivente i consumi stagionali di climatizzazione invernale per ogni tipologia di copertura applicata.

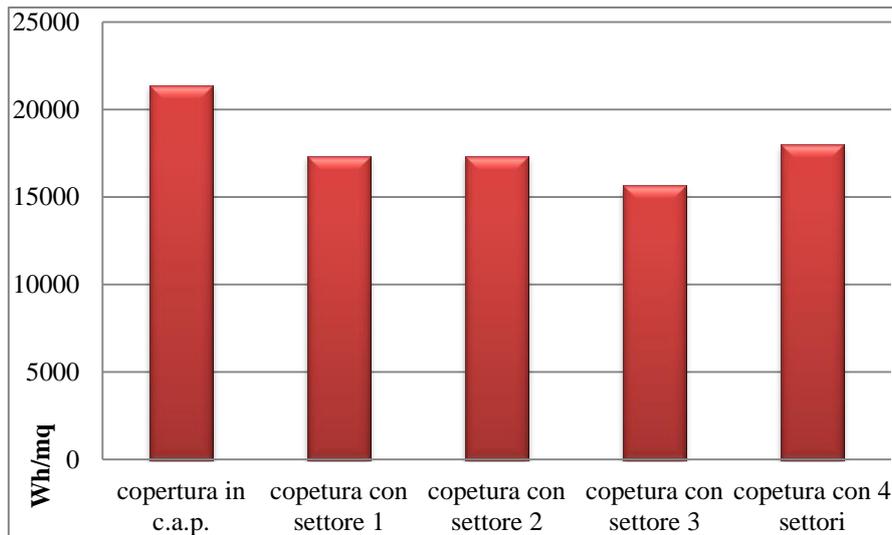


Figura 2. 56 - Fabbisogni stagionali di riscaldamento dell'edificio con diverse tipologie di copertura

I risultati delle simulazioni dimostrano che, relativamente al periodo invernale, la presenza di un tetto verde garantisce in ogni caso un risparmio nel consumo di energia per la climatizzazione. In particolare, tra le differenti tipologie di copertura a verde, la più performante è risultata quella occupata interamente dal settore 3. Esso è caratterizzato, diversamente dagli altri due settori, dalla presenza di uno strato aggiuntivo di isolamento; tale materiale aumenta lo spessore complessivo della copertura rispetto agli altri casi analizzati e conferisce al sistema, grazie alla sua bassa conducibilità termica, un valore di trasmittanza termica più basso e quindi una inerzia termica più elevata. Di seguito si riporta un riassunto dei consumi energetici invernali del cubo universitario e il risparmio percentuale per le differenti tipologie di copertura a verde rispetto al tetto tradizionale in c.a.p.

	Copertura in c.a.p.	Settore 1	Settore 2	Settore 3	Settori 4
Fabbisogno invernale [Wh/m <sup>2</sup> ]	21408.08	17362.23	17362.2	15694.23	17988.70
Risparmio del fabbisogno [%]	--	18.90%	18.90%	26.69%	15.97%

Tabella 2. 37 - Riduzione percentuale del fabbisogno termico invernale per le diverse tipologie di copertura studiate

Da tale tabella si evince che la combinazione dei 4 settori risulta essere comunque più vantaggiosa rispetto al solo tetto tradizionale, offrendo un risparmio dei consumi di poco inferiore a quelli associati alla copertura interamente caratterizzata dal settore 1 o 2; ciò è giustificato dalla condizione che la copertura a verde ricopre comunque buona parte del tetto, pertanto la sua presenza anche se discontinua, risulta nel complesso migliorativa per quanto concerne il risparmio di fabbisogno termico invernale. I consumi della climatizzazione estiva, per ogni tipologia di copertura applicata sono riportati nella Figura 2. 57; il risparmio conseguibile nel consumo energetico, rispetto a una copertura tradizionale, è schematizzato nella Tabella 2. 38:

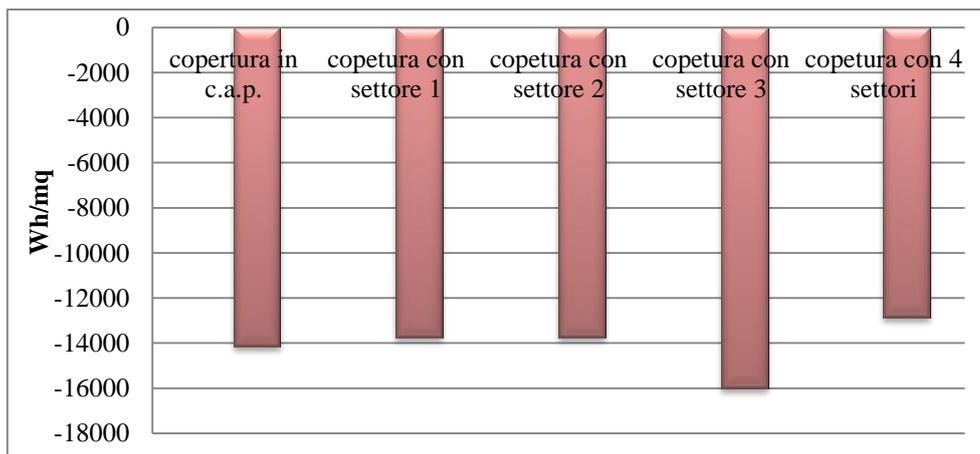


Figura 2. 57 - Fabbisogni stagionali di raffrescamento dell'edificio con diverse tipologie di copertura

	Copertura in c.a.p.	Settore 1	Settore 2	Settore 3	Settori 4
Fabbisogno estivo [Wh/m <sup>2</sup> ]	-14116.82	-13733.92	-13733.92	-15984.97	-12838.97
Risparmio del fabbisogno [%]	--	2.71%	2.71%	<b>-13.23%</b>	9.05%

Tabella 2. 38 - Riduzione percentuale del fabbisogno termico estivo per le diverse tipologie di copertura studiate

I risultati delle simulazioni mostrano nel complesso che la copertura a verde garantisce un maggior risparmio energetico nella stagione invernale piuttosto che in quella estiva. In particolare, se si pongono a paragone la copertura caratterizzata dalla stratigrafia del settore 1 (o quella del settore 2) rispetto alla copertura tradizionale si avrà un risparmio nel fabbisogno termico estivo del 2,71%. La presenza della stratigrafia del settore 3 estesa su tutta la copertura risulta addirittura meno prestante della copertura tradizionale in c.a.p.; ciò è giustificato dalla combinazione di due fattori: l'assenza delle piante sullo strato colturale, e di conseguenza l'annullamento dei fenomeni evapotraspirativi caratterizzanti le stesse, e la presenza di uno strato isolante che non compare nella stratigrafia del tetto in c.a.p. La presenza dell'isolamento aggiuntivo, quindi, favorisce un risparmio energetico in inverno, ma non in estate, nonostante la trasmittanza termica della copertura sia nel complesso più bassa. Ne risulta che assumere tale parametro come unico indicatore delle prestazioni energetiche del tetto risulta essere approssimativo. In realtà la sua presenza può determinare effetti incerti nel periodo estivo, così come le simulazioni dinamiche hanno dimostrato. L'isolamento termico, che trattiene il calore in inverno, durante l'estate svolge la medesima funzione, determinando il potenziale surriscaldamento degli ambienti. Pertanto, nei climi più caldi, come nel caso in esame, esso deve essere necessariamente affiancato da adeguati sistemi per controllare e gestire i guadagni gratuiti. La validazione di quanto detto è stata garantita effettuando il confronto tra la copertura tradizionale in c.a.p. realmente esistente sul tetto del cubo universitario 46 C, e un ipotetico solaio di copertura avente medesima stratigrafia del primo, eccetto uno strato isolante aggiuntivo. A parità di condizioni ambientali è stata effettuata una simulazione dinamica al fine di valutare i fabbisogni

stagionali nei i due casi. Ciò che ne deriva è che la copertura caratterizzata dalla presenza di isolante garantisce un risparmio energetico superiore in inverno, ma non in estate.

	Copertura in c.a.p.	Copertura in c.a.p. + isoalante
<b>Estate</b>	Fabbisogno Totale [Wh/m <sup>2</sup> ]	-14116.82
	Risparmio [%]	--
<b>Inverno</b>	Fabbisogno totale [Wh/m <sup>2</sup> ]	21408.08
	Risparmio [%]	--

Tabella 2. 39 - Confronto dei fabbisogni stagionali per una copertura in c.a.p. in assenza e in presenza di strato isolante.

Il maggior risparmio energetico per l'edificio, nel periodo estivo, si ottiene quando la copertura è caratterizzata solo parzialmente dalla presenza di tetto verde.

## CONCLUSIONI

L'analisi del contesto energetico odierno ha identificato nel settore edilizio-residenziale una delle principali fonti di consumo energetico e di inquinamento. In tale ambito l'elemento costruttivo maggiormente interessato da intensi flussi di calore è stato individuato nella chiusura orizzontale superiore dell'involucro edilizio. Tale analisi ha giustificato lo studio e l'applicazione della copertura a verde, capace di produrre benefici sia su scala urbana, come mitigazione del microclima, riduzione del deflusso idrico, fissaggio delle polveri sottili e piacevole fruibilità visiva, che in relazione al singolo edificio su cui tale tecnologia viene applicata, ossia riduzione dei flussi termici tra ambiente interno ed esterno, comfort termico, risparmio economico nell'utilizzo degli impianti di riscaldamento e raffrescamento.

L'excursus normativo, e nello specifico l'approfondimento della norma UNI 11235, ha consentito di comprendere le corrette modalità di realizzazione e i requisiti progettuali necessari per tale tecnologia.

L'attenzione è stata successivamente incentrata sull'aspetto termofisico del tetto verde, ossia sull'analisi e sul confronto dei modelli matematici elaborati nel corso degli anni e descrittivi le modalità di trasporto di energia termica tra gli strati componenti la copertura a verde e l'ambiente esterno.

Sono stati revisionati numerosi articoli scientifici relativi a tale tematica. In particolare sono stati identificati quattro differenti finalità nello studio dei fenomeni caratterizzanti il tetto verde e le sue prestazioni energetiche:

1. Modellazione matematica e/o trattazione fisica del problema;
2. Simulazione delle prestazioni energetiche del tetto verde mediante modelli già esistenti;
3. Sperimentazione su piccola scala (riproduzione in laboratorio) o su grande scala con realizzazione di una copertura a verde su un edificio;

#### 4. Validazione dei modelli attraverso la combinazione della modellazione matematica con la sperimentazione.

Alcuni di questi modelli risultano alquanto approssimativi e poco rappresentativi del reale comportamento di una copertura verde in quanto trascurano processi essenziali quali il fenomeno dell'evapotraspirazione. Altri propongono maggiore accuratezza, sebbene si fondano sempre su assunzioni semplificative di base al fine di ottenere un modello semplificato. Per tali motivazioni si è scelto di analizzare nel dettaglio i 7 modelli ritenuti più rappresentativi comparando ogni singolo contributo termico presente nell'equazione di bilancio. Alcuni propongono soltanto una equazione di bilancio termico, altri associano ad essa anche una formulazione di bilancio di massa, risultando maggiormente dettagliati e complessi. L'accuratezza dei modelli matematici recentemente presentati in letteratura, infatti, è determinata dall'introduzione di fattori quali la frazione di copertura dello strato vegetativo e soprattutto la variabilità della resistenza stomatica delle foglie e della conducibilità termica degli strati abiotici rispetto al contenuto d'acqua; parametri trascurati nella letteratura passata per la difficoltà di trattazione, ma che condizionano notevolmente le prestazioni termiche della copertura a verde. Lo studio condotto recentemente da Tabares-Velasco si pone come unico esempio scientifico completo definente un proprio modello matematico, rappresentante tutti i processi di trasferimento di calore e di massa costituenti un tetto verde, un nuovo apparato sperimentale denominato Cold Plate e un processo di validazione dei risultati teorici con quelli sperimentali. Il presente lavoro si è concluso con l'utilizzo del codice di simulazione dinamica Energy Plus, che elabora la presenza della copertura verde attraverso il modello matematico proposto da D.J.Sailor; tale codice ha consentito di valutare i benefici termici che può apportare il "green roof" sull'involucro edilizio e, in particolare, è stato valutato come caso studio il cubo universitario 46 C. Ai fini di una valutazione quanto più possibile vicino al reale dei consumi energetici, gli impianti di climatizzazione sono stati considerati a regime discontinuo secondo una programmazione di funzionamento giornaliero rispettante le prescrizioni della norma UNI TS 11300. Le analisi verificanti le prestazioni termiche della copertura a verde sono state effettuate ponendo a confronto i consumi energetici dell'edificio (di cui si sono presi in considerazione solamente i due livelli sottostanti alla copertura) con diverse tipologie di tetto:

- 1- Copertura interamente costituita da solaio tradizionale in c.a.p.;
- 2- Copertura interamente costituita dalla stratigrafia "Settore 1";
- 3- Copertura interamente costituita dalla stratigrafia "Settore 2";
- 4- Copertura interamente costituita dalla stratigrafia "Settore 3";
- 5- Copertura con presenza contemporanea di 4 differenti settori, data dalla combinazione delle tipologie precedentemente elencate.

Tutti i risultati in termini di fabbisogno energetico sono stati comparati a quelli ottenuti con il solaio tradizionale in c.a.p. La prima osservazione emergente dal confronto delle varie tipologie di copertura prese in esame è l'importanza della presenza del substrato vegetale nei fenomeni di trasmissione del calore attraverso il tetto. Esso infatti riduce notevolmente la trasmittanza termica della copertura, specialmente se al tetto verde si associa uno strato isolante. I risultati delle simulazioni raccontano che, relativamente al periodo invernale, la presenza di un tetto verde garantisce migliori prestazioni termiche rispetto alla tradizionale copertura in c.a.p., favorendo, pertanto, un maggior risparmio nel consumo di energia per la climatizzazione. In particolare, tra le differenti tipologie di copertura a verde, la più performante è rappresentata da quella occupata interamente dal settore 3 caratterizzata dalla presenza dell'isolante. Esso favorisce un risparmio non

indifferente nel consumo energetico invernale, ma nel contempo comporta un peggioramento prestazionale nel periodo estivo. I dati dimostrano che la copertura a verde garantisce un maggior risparmio energetico nella stagione invernale piuttosto che in quella estiva. Inoltre, confrontando i fabbisogni termici mensili e stagionali corrispondenti al settore 1 e 2, è emersa una equivalenza dei risultati in quanto le due tipologie di copertura risultano costituite da materiali con caratteristiche termiche simili, ad esclusione dei rispettivi strati di accumulo e drenaggio. Questi ultimi, in particolare, offrono prestazioni termiche differenziate, in funzione della loro capacità di accumulo; tuttavia il codice di simulazione dinamica trascura la variabilità della conduttività termica in funzione del contenuto d'acqua in ogni strato, fedelmente al modello di D:J:Sailor. Pertanto, essendo trascurato l'unico parametro variabile tra i due modelli, i risultati si equivalgono. I risultati conseguiti si mostrano interessanti in quanto danno indicazioni sulla tipologia di stratigrafia di tetto verde più conveniente da utilizzare e permettono di mettere a confronto le prestazioni termiche offerte da soluzioni di tipo tradizionale (miglioramento dell'isolamento termico) con quelle di una copertura a verde opportunamente progettata.

### **CAPITOLO 3 ELEMENTO DI INVOLUCRO OPACO: PCM INTEGRATO NEGLI ELEMENTI ESTERNI ED INTERNI**

I materiali a cambiamento di fase (PCM) costituiscono una nuova soluzione di involucro particolarmente indicata per la riqualificazione energetica di edifici a basse capacità termiche. Tali materiali sono in grado di migliorare le performance termiche di un edificio in termini di attenuazione dei carichi e di contenimento della temperatura interna nella zona di comfort termico. Numerosi sono i PCM presenti in commercio inclusi in differenti tipologie di prodotto, quali pannelli prefabbricati, mattoni contenenti PCM e miscele con malte. Allo scopo di valutare il fabbisogno di energia termica nelle diverse configurazioni, è stato utilizzato il codice di simulazione dinamica TRNSYS®, in cui è stato appositamente sviluppato un modello simulativo per la descrizione delle pareti esterne in presenza di PCM. Con riferimento ad un edificio residenziale esistente sono state analizzate le prestazioni energetiche conseguibili nelle diverse configurazioni di montaggio del PCM, considerato incapsulato in pannelli prefabbricati, al variare delle condizioni climatiche e della quantità e temperatura di melting del materiale impiegato. In particolare, è stato valutato il comportamento termico in regime dinamico delle partizioni interne (verticali e orizzontali) e delle pareti che costituiscono l'involucro esterno nel caso in cui sia presente il materiale PCM.

#### **3.1 Introduzione**

I materiali a cambiamento di fase phase change material (PCM) sono materiali di origine naturale o artificiale possono essere utilizzati come accumulatori di calore sfruttando il fenomeno fisico del passaggio di stato. Nelle prime fasi di riscaldamento si comportano come materiali convenzionali, registrando un incremento della temperatura, invece quando la temperatura di transizione di fase viene raggiunta assorbono grandi quantità di calore mantenendo la temperatura costante. Viceversa, se sottoposti a decrementi di temperatura, rilasciano tutto il calore assorbito ripercorrendo il processo di trasformazione di fase inverso. L'andamento di un materiale PCM soggetto a riscaldamento e raffreddamento è mostrato in Figura 3. 1. Il calore latente può essere assorbito mediante processi di vaporizzazione, fluidificazione e sublimazione. Le trasformazioni solido-gas e liquido-gas consentono un maggiore accumulo di energia, ma presentano variazioni di volume così elevate da rendere i processi difficili da gestire. I materiali che sfruttano i fenomeni di fluidificazione, invece, assorbono discrete quantità di calore con minime variazioni volumetriche. Diversi studi hanno analizzato materiali in grado di assorbire e cedere calore mediante trasformazioni solido-solido. Quest'ultimi sono in grado di trasferire quantitativi di energia prossimi a quelli accumulati mediante fluidificazione senza variare la loro forma. Sono maggiormente maneggevoli e non necessitano di materiali di contenimento, ma spesso presentano temperature di fluidificazione elevate, risultando idonei solo per alcune applicazioni.

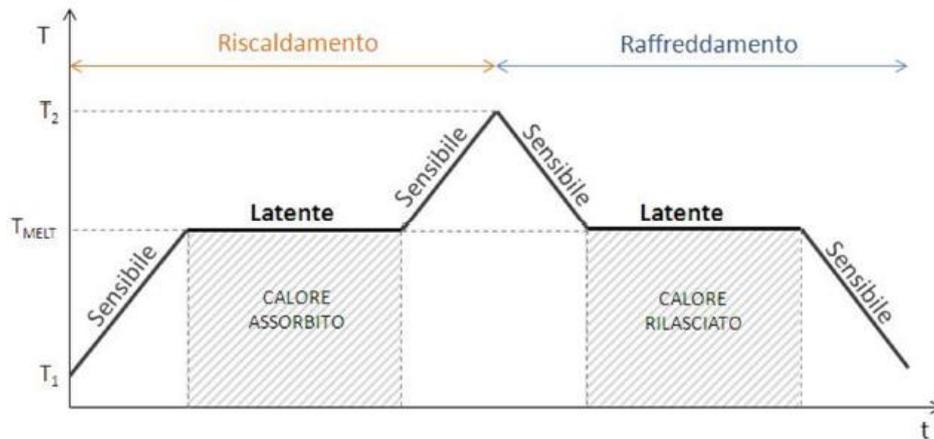


Figura 3. 1- Andamento di un materiale a cambiamento di fase soggetto a riscaldamento e raffreddamento

Inizialmente sviluppati dalla Nasa, per applicazioni su tute e strumentazioni, i PCM da qualche tempo sono studiati per sfruttarne le potenzialità termoregolatrici, anche nell'ambito dell'architettura ecosostenibile e nella bioedilizia. I principali risultati si sono avuti con applicazioni su pannelli di cartongesso, sistemi di facciata in vetro e isolanti, ma anche con impianti, come quello di riscaldamento o di raffreddamento per il periodo estivo, o inseriti nei serbatoi di accumulo di energia termica. La loro capacità termoregolante, consente di ottenere benefici in termini di climatizzazione ambientale interna, con riduzione dei picchi di calore e di conseguenza, anche un buon risparmio energetico. Questa tipologia di materiali è in grado di accumulare energia termica, per rompere i propri legami chimici e liquefarsi, passando da uno stato all'altro. Quando però la temperatura scende sotto il valore del punto di fusione, i PCM solidificano, e nel contempo cedono l'energia termica accumulata, rilasciando quindi calore. A differenza dei classici materiali edili, come pietrame e mattoni, i PCM non dipendono dallo spessore. Infatti presentano un buon comportamento termico, rilasciando e conservando energia termica in porzioni di massa minima.

### 3.1.1 Classificazione

Proprio come nel caso della classificazione degli accumuli, anche per la classificazione dei materiali a cambiamento di fase si è evidenziato che non esiste in letteratura una classificazione univoca. Molti composti sono stati studiati come potenziali materiali ad accumulo di calore latente, scelti in relazione alle loro caratteristiche fisiche, tecniche ed economiche. Tra questi quelli maggiormente idonei possono essere suddivisi in tre classi: organici, inorganici ed eutettici. Un gran numero di materiali a cambiamento di fase (organici, inorganici e eutettico) sono disponibili in ogni intervallo di temperatura richiesto. Una classificazione di PCM è mostrata in Figura 3. 2 [62]

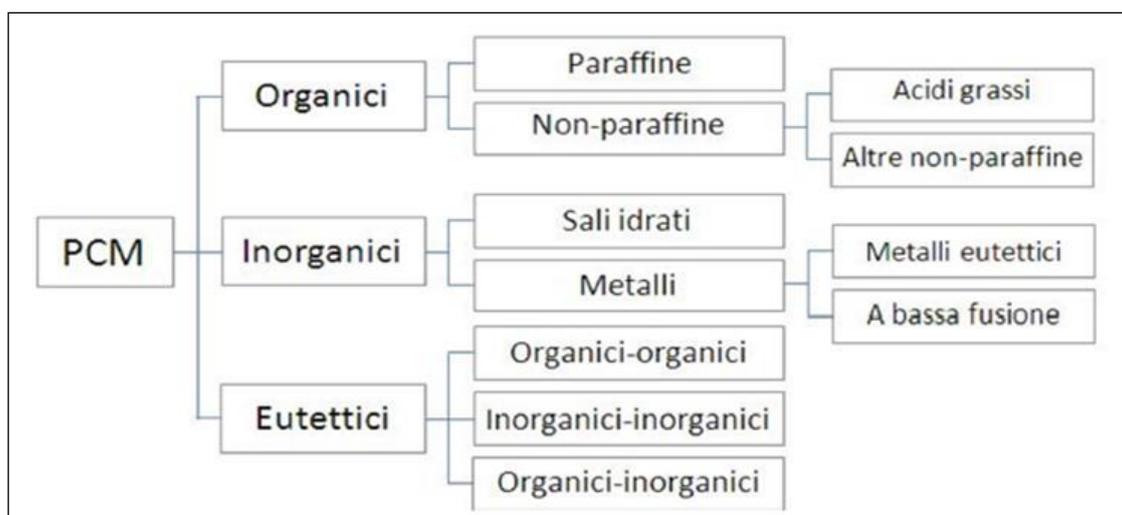


Figura 3. 2 - Classificazione dei materiali PCM

Per il loro comportamento molto diverso termicamente e chimicamente, le proprietà di ciascun sottogruppo che riguarda la progettazione di sistemi energetici latenti ad accumulo di calore utilizzando PCM sono discusse in dettaglio di seguito. Nei materiali inorganici proprietà come la disponibilità in varie temperature di fluidificazione e l'elevata entalpia di transizione li rendono particolarmente appetibili come mezzi di assorbimento del calore latente, ma la presenza di problematiche quali il surraffreddamento e la segregazione di fase ne limitano l'utilizzo. I materiali organici, invece, sono caratterizzati da buona stabilità ciclica e buon comportamento termico, ma la bassa densità che li contraddistingue determina valori minimi di entalpia di fusione. Nella Tabella 3. 1 sono riassunte le principali differenze tra i due materiali:

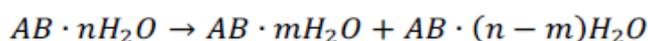
	<i>Organici</i>	<i>Inorganici</i>
<b>Vantaggi</b>	Basso o nessun sottoraffreddamento	Un ampio picco entalpico in corrispondenza del cambiamento di fase
	Non corrosivi	
	Stabilità termica e chimica	
	Un piccolo picco entalpico in corrispondenza del cambiamento di fase	Sottoraffreddamento
<b>Svantaggi</b>	Bassa conduttività termica	Corrosione
	Infiammabilità	Separazione di fase
		Bassa stabilità chimica

Tabella 3. 1 - Vantaggi e svantaggi tra PCM organici e inorganici

### 3.1.2 Sali idrati

Di tutti i potenziali PCM gli unici messi in commercio sono i sali idrati e le paraffine, che, come visto precedentemente, appartengono rispettivamente alle categorie dei materiali inorganici e organici. Essi sono stati prescelti per caratteristiche quali la disponibilità in numerose temperature di fluidificazione, le discrete quantità di calore assorbite e soprattutto per gli apprezzabili requisiti economici della materia prima. Sebbene siano disponibili a basso costo le tecniche necessarie per renderli utilizzabili, e sfruttare al meglio le proprietà che li differenziano, sono complicate e costose. In questo lavoro è stato considerato esclusivamente la tipologia sale idrato. I sali idrati sono

definiti come leghe di sali inorganici ed acqua, che danno luogo ad una struttura solida cristallina con formula generale  $AB \cdot nH_2O$ . La regolarità della struttura dei sali determina temperature di fluidificazione relativamente alte, ordinariamente comprese tra  $5\text{ }^\circ\text{C}$  e  $130\text{ }^\circ\text{C}$ . La liquefazione e la solidificazione del sale idrato sono in realtà una disidratazione e idratazione del sale. Come sottolinea la formula seguente i cristalli idrati si scompongono in sale anidrate e acqua, o in uno meno idrato e acqua:



In Figura 3. 3 è riportata, a titolo esemplificativo, la forma cristallina del cloruro di magnesio esaidrato, con formula chimica  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ . In esso gli ioni di cloro  $Cl^-$  e le sei molecole d'acqua sono legate agli ioni magnesio  $Mg^{2+}$  mediante legami ione-dipolo, formando un configurazione esagonale.

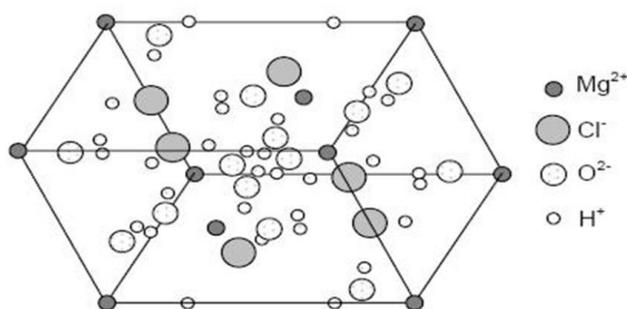


Figura 3. 3 - Forma cristallina del cloruro di magnesio esaidrato

I sali idrati sono dotati di una buona conduttività termica e di una limitata variazione volumetrica durante i cambiamenti di fase. La caratteristica che li rende particolarmente idonei per applicazioni termiche è l'elevata entalpia di fusione. Per ogni  $m^3$  di sostanza, infatti, riescono ad accumulare fino a  $350\text{ MJ}$  di calore. Tale proprietà è determinata dalla notevole densità di cui i sali idrati sono dotati, grandezza che influenza la capacità di accumulo per unità di volume del materiale. I sali idrati risultano essere la categoria di PCM inorganici più importante e più approfonditamente studiata grazie ai molti vantaggi derivanti da un loro utilizzo come materiali per accumuli a calore latente. La Tabella 3. 2 riassume i principali vantaggi e svantaggi derivanti dall'utilizzo di questi materiali PCM. Tra gli svantaggi derivanti dal loro utilizzo in accumuli a cambiamento di fase compare la fusione incongruente ed il sottoraffreddamento. La fusione incongruente si verifica quando l'acqua rilasciata in fase di cristallizzazione non è sufficiente a dissolvere tutta la fase solida presente. A causa della minor densità i sali meno idrati vanno così a posizionarsi nella parte inferiore dell'accumulo rendendo nel tempo il cambiamento di fase sempre più irreversibile. Nella Tabella 3. 3 sono presentati i più comuni Sali idrati e le rispettive caratteristiche termiche e fisiche.

TIPO DI PCM	CATEGORIA	VANTAGGI	SVANTAGGI
Sali idrati	PCM inorganici	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevato calore latente per unità di volume;</li> <li>- elevata conduttività termica;</li> <li>- ridotta variazione di volume durante la variazione di fase;</li> <li>- bassa corrosività;</li> <li>- compatibilità con le plastiche;</li> <li>- bassa corrosività;</li> <li>- minor costo rispetto alle paraffine.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fusione incongruente;</li> <li>- sottoraffreddamento;</li> <li>- bassa conduttività termica</li> </ul>

Tabella 3. 2 - Vantaggi e svantaggi dei Sali idrati

Sali idrati	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O
Temp. di fusione (°C)	36,1	48,5	35,0	29,7	32,4
Entalpia fusione (kJ/kg)	146,95	208,80	278,84	169,98	254,00
Calore specifico (kJ/kgK)	1,34 (sol.) 2,26 (liq.)	1,46 (sol.) 2,38 (liq.)	1,55 (sol.) 2,51 (liq.)	1,46 (sol.) 2,13 (liq.)	1,76 (sol.) 3,31 (liq.)
Densità (kg/m <sup>3</sup> )	1954	1666	1522	1560	1458
Massa (kg)	211	180	164	168	157
Calore latente (kJ)	31007	37584	45730	28557	39878
Calore sensibile (kJ)	- 16166 (liq.)	920 (sol.) 9211 (liq.)	- 14407 (liq.)	- 14421 (liq.)	- 19540 (liq.)
Calore totale (kJ)	55777	56319	68741	51582	68002

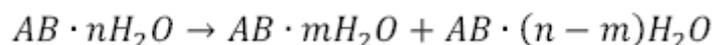
Tabella 3. 3 - I principali sali idrati e le rispettive caratteristiche termiche

Il sotto-raffreddamento è invece dovuto al fatto che la velocità di nucleazione dei cristalli di sale idrato è generalmente molto bassa. Questo significa che il calore latente, invece di essere rilasciato alla temperatura di fusione, viene rilasciato ad una temperatura minore. Possibili soluzioni per limitare il problema del sottoraffreddamento e della fusione incongruente sono l'introduzione di agenti di nucleazione che facilitino la formazione di cristalli, l'agitazione meccanica, l'incapsulamento del PCM, l'utilizzo di acqua in eccesso o di agenti nucleanti, il trattenimento di alcuni cristalli in una regione piccola e fredda in modo che si comportino come nuclei o la modifica della composizione chimica del sistema. Anche in questo caso viene riportata la Tabella 3. 4 con i valori di temperatura e calore latente di fusione di un elevato numero di sali idrati presenti in letteratura.

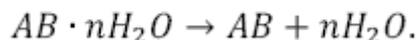
Melting point and latent heat of fusion: salt hydrates		
Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	14.0	109
FeBr <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	21.0	105
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	25.5	148
FeBr <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	27.0	105
CaCl <sub>2</sub> ·12H <sub>2</sub> O	29.8	174
LiNO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O	30.0	296
LiNO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	30	189
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O	32.0	267
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	32.4	241
KFe(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·12H <sub>2</sub> O	33	173
CaBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	34	138
LiBr <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	34	124
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	36.1	134
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	37.0	223
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	37.1	115
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	40.0	279
CoSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	40.7	170
KF·2H <sub>2</sub> O	42	162
MgI <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	42	133
CaI <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	42	162
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	45.0	145
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	45	110
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	47.0	142
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	47.0	153
Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	47	155
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ·4H <sub>2</sub> O	48	168
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O	48	99
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	48.5	210
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	48.5	202
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O	51	104
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	55	68
FeCl <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O	56	90
Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	57.0	169
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	58.0	151
MgCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	58.0	178
CH <sub>3</sub> COONa·3H <sub>2</sub> O	58.0	265
Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	60.5	126
NaAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·10H <sub>2</sub> O	61.0	181
NaOH·H <sub>2</sub> O	64.3	273
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	65.0	190
LiCH <sub>3</sub> COO·2H <sub>2</sub> O	70	150
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	72	155
Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	78	265
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	89.9	167
KAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·12H <sub>2</sub> O	91	184
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	117	167

Tabella 3.4 - Valori di temperatura e calore latente di fusione di un elevato numero di sali idrati presenti in letteratura

Ciò che limita l'utilizzo dei sali idrati è l'impossibilità di mantenere costante la capacità di accumulo che li caratterizza. Con il passare dei cicli di riscaldamento e raffreddamento, infatti, l'entalpia di fusione degrada a causa di fenomeni di segregazione di fase e surraffreddamento. Un altro elemento che insidia il corretto accumulo e rilascio di calore latente è l'instabilità chimica. Alcuni sali, infatti, se soggetti ad elevate temperature, degradano perdendo parte del contenuto d'acqua necessario per la solidificazione del materiale. Le sostanze comunemente impiegate per limitare i fenomeni di surraffreddamento e segregazione di fase sono agenti nucleanti, sostanze gelatinizzanti e addensanti. La fluidificazione di un sale idrato può avvenire mediante disidratazione del sale, che si trasforma in sale idrato con minor numero di moli:



o in sale anidro:



Nel primo caso la fluidificazione può essere di tipo congruente o incongruente. È congruente se, raggiunta la temperatura di fluidificazione, il sale anidro è completamente solubile nell'acqua di idratazione. La soluzione liquida ottenuta ha la stessa composizione omogenea di partenza ed il processo di transizione è completamente reversibile. È invece incongruente se, raggiunto il punto di fusione, il sale non è completamente solubile in acqua. Il composto così ottenuto ha una combinazione diversa rispetto a quella di partenza ed il processo di fase diventa irreversibile, ovvero a partire dalla fase fluida non è più possibile ottenere la fase solida originaria. La seconda trasformazione determina una fluidificazione definita semi congruente. La composizione fluida è differente rispetto a quella di partenza, ma il sale idrato con minor numero di moli è completamente solubile nell'acqua di idratazione. Il processo di transizione è dunque reversibile e a partire dallo stato fluido è possibile ottenere la fase solida di partenza. Nella Figura 3. 4 è rappresentato il diagramma di fase del sale di Glauber, utilizzato in questo lavoro, avente fluidificazione incongruente. Il composto allo stato solido è costituito da una percentuale di sale  $Na_2SO_4$  pari al 43%. Se il materiale è raffreddato, raggiunta una temperatura di circa  $32^\circ C$ , si scinde nel sale anidro  $Na_2SO_4$  ed una fase liquida meno concentrata. Le due fasi sono caratterizzate da concentrazioni differenti ed il sale anidro, maggiormente denso, si deposita sul fondo. Da questo punto in poi il comportamento è simile a quello del cloruro di calcio esaidrato, con l'unica differenza che, con l'aumento della temperatura, la solubilità del sale anidro diminuisce, determinando l'impossibilità di ricreare un fluido con la stessa composizione omogenea che aveva allo stato solido. Se il materiale è nuovamente raffreddato, inoltre, il sale di Glauber si forma in posizione intermedia, dove la fase solida e quella liquida sono a stretto contatto; lo strato solido si comporta così da barriera, impedendo l'agevole reazione delle altre parti di composto (Figura 3. 5). Il ciclo diventa così irreversibile ed il sale non è più in grado di accumulare e rilasciare calore.

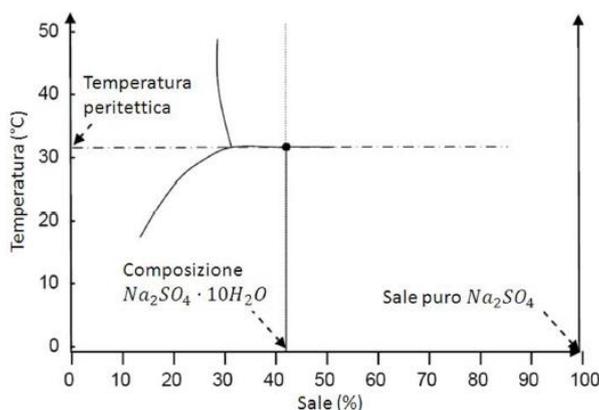


Figura 3. 4 - Diagramma di fase del solfato di sodio decaidrato. Comportamento incongruente.

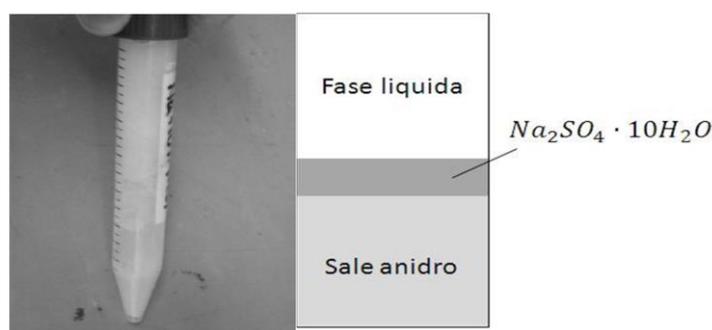


Figura 3. 5 - Segregazione di fase di un sale idrato e Barriera di sale idrato che impedisce la solidificazione del materiale

### 3.1.3 Usi edili

[65]

L'utilizzo dei PCM in edilizia si sta espandendo, non solo in via sperimentale, ma anche nell'edilizia convenzionale, destinata alla vendita. Difficilmente vengono usati direttamente nel mix cementizio, 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. Gli esempi applicativi che possono essere citati sono dei pannelli opachi e dei pannelli vetrati (serramenti pluristrato). I primi sono costituiti da una matrice porosa contenente al suo interno i PCM (sottoforma di cera) in microcapsule; possono avere spessori anche molto ridotti, ma presentare elevata capacità termica e bassa trasmittanza. I pannelli vetrati pluristrato contengono i PCM all'interno di una vetrocamera; come nel caso precedente, anche questa soluzione permette di ottenere valori ridotti di trasmittanza. In estate il calore viene accumulato di giorno e rilasciato di notte, in modo tale da smorzare l'onda di calore, mentre in inverno viene immagazzinato per poi essere rilasciato verso l'ambiente interno, evitando o ritardando la perdita di calore verso l'esterno. Sperimentazioni condotte recentemente sull'integrazione dei PCM nei serramenti hanno dimostrato che la finestra PCM si comporta come uno schermo dinamico che reagisce alle condizioni esterne inducendo un'inerzia termica artificiale programmabile in funzione della temperatura desiderata.

Un esempio di soluzione tecnica per quanto riguarda gli impianti di riscaldamento o condizionamento prevede che si collochino i PCM all'interno di serbatoi, sfruttando la loro energia per mantenere il fluido termovettore alla temperatura del PCM stesso.

Le funzioni svolte in edilizia dai PCM sono molteplici e vi sono molte tipologie di prodotti in commercio, molte volte sconosciute o poco utilizzate.

In comparto edilizio i PCM possono venire utilizzati:

- sfusi;
- micro-incapsulati;
- macro-incapsulati;
- immersi in matrici porose.

Le modalità di utilizzo dei materiali a cambiamento di fase sono invece molteplici, a seconda delle finalità che si vogliono ottenere dal loro utilizzo. Una prima grande distinzione riguarda l'applicazione nelle costruzioni edilizie.

Si sono distinte le seguenti principali applicazioni edilizie:

- *involucro opaco*: PCM inseriti in aggiunta ai normali isolanti, nell'interfaccia tra interno ed esterno oppure in alcuni casi nelle pareti interne;

- *controsoffittatura o in pavimenti radianti*: elementi inseriti in controsoffitti o pavimenti radianti, che permettono di ottenere da questi sistemi di climatizzazioni risultati migliori;
- *involucro trasparente*: in sostituzione dell'intercapedine d'aria presente tra lastre di vetro oppure in aggiunta ad essa, con opportune lastre schermanti o riflettenti;
- *sistemi tecnologici e di climatizzazione*: PCM inseriti all'interno di scambiatori di calore a fascio tubiero che ne incrementano le prestazioni, oppure inseriti direttamente nella parte terminale dell'impianto di ventilazione nel caso di impianti a tutt'aria.

Queste sono le principali applicazioni ora presenti in edilizia, ma non sono le uniche. Sono infatti in corso numerose sperimentazioni per applicare i PCM in molte altre parti dell'edificio, non citate nell'elenco precedente in quanto non ancora direttamente utilizzate. I vantaggi, relativi all'uso del PCM in edilizia, sono molteplici e si possono così sintetizzare:

Materiali facilmente reperibili sul mercato; Presenza di molte case produttrici e svariate tipologie di incapsulamento; Risultati teorici sperimentali molto buoni; Riduzione delle spese di riscaldamento e raffrescamento teoriche, nell'ordine del 5 – 10%; Possibilità di utilizzo sia sulle nuove costruzioni che nei casi di recupero edilizio; Applicazione in sistemi tecnologici e di climatizzazione, oltre che in sistemi solari passivi.

Ovviamente ai numerosi vantaggi si affiancano anche alcuni svantaggi, elencati di seguito: Assenza di risultati reali affidabili e di applicazioni che giustifichino l'utilizzo; Scarsa informazione sui prezzi e sulla convenienza economica di un tale investimento; Scarsa diffusione sul mercato italiano; Possibilità, dopo svariati cicli di utilizzo, di variazione delle capacità di accumulo termico; Necessità di incapsulamento per il contenimento durante la fase liquida; Assenza di capacità portante.

### **3.2 Performance Energetiche e modello termofisico**

#### **3.2.1 Integrazione in elementi di involucro edilizio**

L'utilizzo dei PCM permette di incrementare la capacità termica dell'elemento opaco di una percentuale variabile tra il 90 ed il 130% [66]; questa proprietà può essere usata per ridurre i consumi sia nel raffreddamento che nel riscaldamento degli edifici. Come hanno osservato Ana M. Borreguero et al. il ricorso ai PCM permette di ottenere pareti di spessore ridotto ma con alta capacità termica, in grado di garantire lo stesso livello di comfort raggiungibile con pareti tradizionali [67]. Negli ultimi anni gli studi condotti sull'utilizzo dei PCM negli edifici, hanno riguardato in particolar modo gli elementi dell'involucro esterno piuttosto che gli elementi divisorii interni. C.K. Halford et al. hanno dimostrato che l'utilizzo di PCM, inseriti all'interno degli elementi opachi esterni dell'edificio, comporta, durante la stagione estiva, una riduzione dei picchi di carico di raffreddamento dell'ordine del 19-57%, per temperature di melting comprese tra 307 e 314 K [68]. Yahaya et al. hanno dimostrato che posizionando il PCM nella stratigrafia del solaio di una abitazione ad un piano di 100 m<sup>2</sup>, in climi caldi, è possibile ottenere un risparmio di 350 – 600 Wh di energia di raffreddamento, nell'arco di tempo che va dalle 10 alle 15 [69]. M.A. Izquierdo-Barrientos et al. hanno studiato gli effetti della temperatura di melting del PCM collocato nelle pareti esterne degli edifici. Dall'analisi è emerso che, scegliendo un'appropriata temperatura di melting in funzione della stagione e dell'orientamento della stessa parete, è possibile ridurre in maniera significativa il consumo di energia dell'impianto di condizionamento [70]. Cabeza et al.

hanno dimostrato che le fluttuazioni di temperatura dell'aria all'interno di edifici aventi pareti esterne contenenti PCM diminuiscono in maniera considerevole rispetto allo stesso edificio realizzato con pareti convenzionali, portando conseguentemente ad un risparmio energetico [71]. Analogamente, Kuznik et al., sono giunti alla medesima conclusione, utilizzando però i PCM negli elementi opachi interni [72].

### 3.2.2 Integrazione in elementi di involucro edilizio esterno

Uno tra i più rappresentativi test sui PCM sugli edifici è quello condotto da Scalat in Canada [73]. Questo studio si basa sulla costruzione di un piccolo edificio costituito da due stanze in ambiente controllato al Centre for Building Studies alla Concordia University (CBS) di Montreal. Queste stanze hanno una lunghezza di 2290 mm, una larghezza di 2270 mm ed un'altezza di 2450 mm e sono state costruite nello stesso modo. Una parete normalmente isolata divide le due stanze Figura 3. 6. La parte interna delle pareti esterne ed il solaio di una delle due stanze sono state ultimate con l'utilizzo di un pannello di intonaco ordinario, nella seconda invece sia la parte interna delle pareti esterne che per il solaio si è utilizzato un pannello di intonaco impregnato con PCM. Le unità di condizionamento dell'aria sono stati installati in alto in ogni stanza

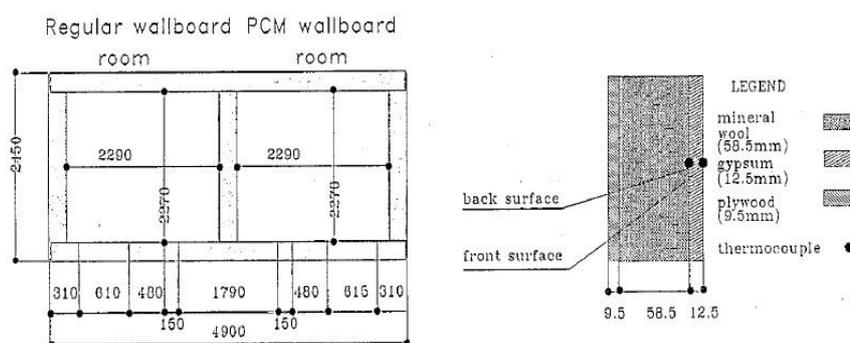


Figura 3. 6 - Configurazione del sito sperimentale

La selezione del PCM appropriato deve rispondere a determinate caratteristiche; anche in questo caso si è proceduto ad una selezione che prendesse in considerazione le caratteristiche fisiche, chimiche, termiche, cinetiche ed economiche. Il PCM utilizzato in questo progetto è stato una miscela del 50% di stearato di butile a del 48% di butyl palmitate. Tale miscela è stata prodotta in Canada dalla Henckel Canada sotto il nome di Emerest 2326. Si è quindi proceduto con impregnare la parete al 25,7%. Questo esperimento è stato condotto mantenendo le condizioni dell'aria circostante all'incirca sui 12 °C. In un primo momento si è proceduto mantenendo la temperatura della stanza a 26 °C per 24 ore. Successivamente si è spento il sistema di riscaldamento e si è continuato a monitorare i valori della temperatura nelle due stanze per le successive 24 ore. Ciò che si è notato in questo studio, è che nella stanza con PCM dopo aver spento il sistema di riscaldamento si è registrata una temperatura superiore ai 16 °C (temperatura ritenuta di comfort nelle ore notturne) per le successive 35,5 ore con un incremento del 135% rispetto alla stanza senza PCM che invece mantiene una temperatura superiore ai 16 °C per 15,1 ore. Si è anche osservato, come similamente, se la stanza con pareti ordinarie viene riscaldata a 24 °C, avendo fissato una temperatura ambiente minima di 18 °C, manterrà una temperatura superiore al minimo per circa 8,5 ore a differenza della stanza con PCM che invece riesce a mantenere una temperatura superiore ai 18 °C per circa 18 ore, con un incremento del 121 %. Nel caso di raffreddamento si nota invece,

come la stanza con pareti ordinarie passi da una temperatura di 16 °C ad una di 22 °C in 27,2 ore, diversamente da ciò che si è riscontrato nel caso di stanza con PCM in cui si è registrato un lasso di tempo di 50 ore. Il tempo richiesto per innalzare la temperatura dai 18 °C ai 22 °C per la stanza senza PCM è di 24,1 ore, mentre per la stanza con PCM è di 45,6 ore. Ciò dimostra come nel caso di raffreddamento le pareti con PCM garantiscano un incremento dell'84% nel mantenere la temperatura più vicina possibile a quella di benessere notturna, e dell'89% per innalzare la temperatura della stanza fino ai 22 °C.

Tipi di utilizzo	Wallboard impregnated PCM 25,7%
Tipo di PCM	50% BUTYL STEARATE
	48% BUTYL PALMITATE
	(Registrato come Emerest 2326 dalla Henckel Canada)
Melting temperature	21 °C
Tempo dell'esperimento	72 ore totali
	▪ 24 ore (T costante 24-26 °C)
	▪ 48 ore (Turned off)
Heating performance	T= 16 °C per 35,5 h ( +135 % )
	T> 18 °C per 18,8 h ( +121 % )
Cooling performance	T<22 °C per 50 h ( +89% )

Tabella 3. 5 - Sommario dei risultati

Allo scopo di avere una ampia e puntuale visione sull'utilizzo dei PCM integrati in elementi di involucro lungo le stagioni di condizionamento si riporta un esperimento condotto in inverno nel nord-est della Cina [74]. I pannelli di PCM sono stati incorporati in degli ordinari muri. Si è posto sotto le stesse condizioni climatiche due stanze, una con PCM e l'altra senza, le si è studiate e paragonate. Da ciò si è potuto notare come l'impiego del PCM apporti notevole confort termico alla stanza che ne è provvista. L'esperimento ha avuto sede a Shenyang, nel nord-est della Cina, dove le 4 stagioni sono chiaramente distinte; lo studio è stato condotto in inverno (da metà Novembre a Marzo dell'anno successivo). Il tipo di PCM usato da Shilei è stata una miscela di capric acid e lauric acid miscelati nelle proporzioni di 82 a 18 %. Tale miscela è stata testata in DSC (Calorimetria differenziale a scansione) dal Changchun Institute of Applied Chemistry of Chinese Academy Sciences. La temperatura di fusione e quella di solidificazione del PCM risultano rispettivamente di 20,394 e di 19,138 °C, valori che rientrano in quelli di comfort invernale. Ci sono molti materiali da costruzione come l'intonaco, il cartongesso, il cemento, che possono essere combinati col PCM. Dopo aver analizzato e comparato i vari materiali, è stato determinato che l'intonaco è il più poroso, caratterizzato dal 40% del volume di aria e quindi più facilmente predisposto ad assorbire il PCM. In aggiunto, l'intonaco è leggero, poco costoso, conveniente e facile da lavorare e può essere isolato acusticamente e ignifugo. Per lo studio è stato scelto il Mount Thai, un intonaco di 9,5 mm. E' stato necessario tenere in ammollo per circa 6-10 minuti il pannello in intonaco nel PCM liquido. Il PCM assorbito dall'intonaco è stato circa del 26 % del peso totale. Il nuovo pannello di intonaco con il PCM è contraddistinto da una melting temperature di 18,491 °C e da una frozen temperature di 18,587 °C; la melting latent heat è invece di 39,126 J/g mentre la frozen latent heat è di 36,965 J/g; entrambe queste misure provano che la grande capacità di assorbire calore latente da parte del PCM. L'esperimento sulla stanza con l'impiego di PCM è stato condotto dopo aver effettuato lo studio della stessa con muri ordinari. La stanza sperimentale ha dimensioni di 5 m x 3,3 m x 2,8 m con finestre di 1,5 x 1,5 m (Figura 3. 7).

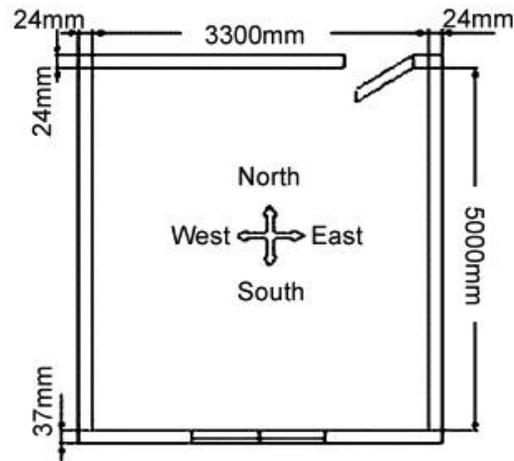


Figura 3. 7 - Configurazione del sito sperimentale

La stanza è stata riscaldata da 2040 W tramite una membrana posta nel solaio, sopra la quale è stato posto un sottile strato di lana di vetro di circa 40 mm di spessore come strato termoisolante. Un altro strato di lana di vetro con 150 mm di spessore è stato posto nella stanza per rendere la stanza ed il soffitto isolate dal calore. La camera è stata ulteriormente dotata di un condizionatore per miscelare l'aria interna. In un primo momento, la stanza con i muri ordinari è stata testata per tre giorni continui. Successivamente, con le stesse condizioni climatiche esterne, la stanza è stata studiata con l'utilizzo del pannello in PCM per lo stesso lasso di tempo. Durante il test, la membrana elettrica posta nel solaio è stata posta in funzione, a pieno regime. Poiché la temperatura di transizione del pannello in PCM si trova nel range di temperature interne di design in periodo invernale, quando la temperatura interna è più alta della temperatura di transizione, il PCM nel pannello passa dallo stato solido al liquido assorbendo il surplus di calore nella stanza. Al contrario, quando la temperatura interna è più bassa della temperatura di transizione, il pannello in PCM rilascia calore ed aumenta la temperatura interna.

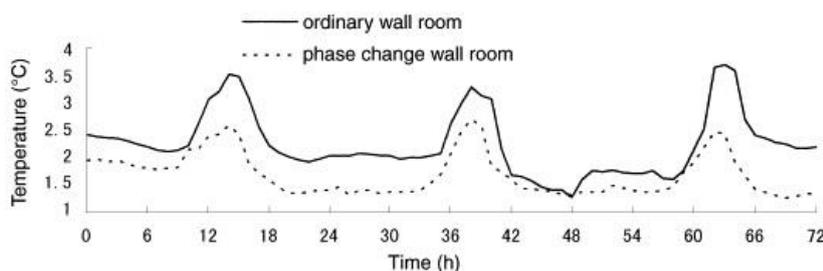


Figura 3. 8 - Confronto dell'andamento della temperature del parete con e senza PCM

La figura soprastante mostra la curva delle temperature interne alla stanza in tre giorni continui sperimentata sia in relazione ai muri ordinari, sia in relazione ai muri con PCM. E' possibile notare come le temperature interne nella stanza senza PCM ha una fluttuazione termica tra i 19 °C ed i 24 °C, mentre quella con i PCM varia tra i 18.5 °C ed i 22°C. Nell'esperienza sulla stanza senza PCM, la massima variazione termica che è stata registrata è di 3,74 °C nei tre giorni, nel giorno più caldo, ma la massima oscillazione nella stanza con PCM è di 2,59 °C, circa 1, 15 °C meno rispetto alla stanza senza PCM.

Tipi di utilizzo	Gypsum impregnated PCM
Tipo di PCM	Gypsum da 9,5 mm impregnated per il 26% 82% capric acid- 18 % lauric acid
Melting temperature	21-25 °C
Stagione dell'esperimento	Inverno (da metà Novembre a Marzo)
Temperature con PCM	40°C giorno 23 °C notte (20°C di escursione termica)
Caratteristiche tecniche PCM	Melting temperature 20,394 °C
	Frozen temperature 19,138 °C
	Melting latent heat 150,305 °J/g
	Frozen latent heat 144,182 J/g

Tabella 3. 6 - Sommario dei risultati

### 3.2.3 Integrazione in elementi di involucro edilizio interno

[75]

Questo studio investiga come migliorare il comportamento termico di una costruzione leggera usando nelle partizioni interne un pannello di PCM. L'esperimento è stato condotto in due stanze, una con ed una senza PCM, entrambe di dimensioni 5x3,3x2,8 m con finestre di 1,50x1,50 m in cui tutto è stato monitorato, simulando una temperatura esterna come un ripetitivo giorno estivo. Si è valutato la differenza tra l'uso di un pannello PCM nella stratigrafia del muro e la non presenza dello stesso. Si è deciso di utilizzare come PCM un prodotto della DuPont de Nemours Society, costituito dal 60% di PCM microincapsulato, che ha una temperatura di fusione di 22 °C. La forma finale di PCM usato è stato un pannello flessibile di 5 mm di spessore con una densità di  $\rho_{PCM}=1019 \text{ kg/m}^3$ . Le due stanze MINIBAT (CHETIL-INSA de Lyon, France), consistono ognuna in due custodie identiche, chiamate cell1 e cell2, ognuna di dimensione 3,10x3,10x2,50 m (Figura 3. 9). La temperatura della camera climatica può variare tra i -10 °C ed i 40 °C in funzione del tempo. La protezione termica ci permette di mantenere le altre 5 pareti esterni con una temperatura uniforme di 20,5 °C. Una batteria di 12 luci, di 1000 W ognuna, hanno reso possibile simulare un giorno estivo; le luci sono poste su tre linee orizzontali, per un numero di 4 per linea (Figura 3. 9).

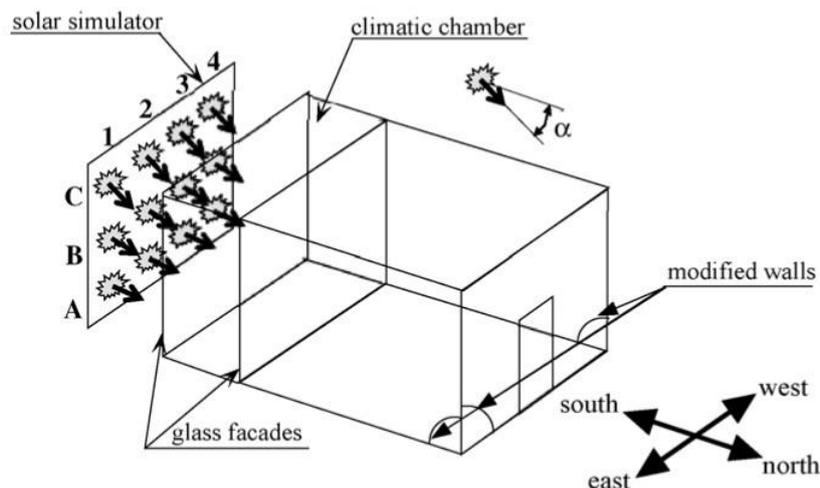


Figura 3. 9 - Configurazione del sito sperimentale

Il passo temporale scelto tra due diverse simulazioni è di 10 minuti e la durata di ogni prova è di 3 giorni. Come già detto sopra, questo test si riferisce ad un periodo estivo con una temperatura della camera climatica che varia tra i 15 ed i 30 °C. Nel caso specifico la temperatura della camera climatica varia tra i 15 ed i 30 °C. La temperatura dell'aria interna per il caso con PCM oscilla tra i 36,6 °C ed i 18,9 °C, mentre per il caso con PCM varia tra i 32,8 °C ed i 19,8 °C. Ciò evidenzia come, l'uso del PCM possa far diminuire le fluttuazioni di temperatura di 4,7 °C, infatti le fluttuazioni di temperatura nella parete con PCM sono più basse rispetto a quelle senza. L'effetto di accumulo di energia del materiale PCM non può essere discusso efficacemente solo con l'osservazione delle evoluzioni delle varie temperature. Per esempio, l'energia accumulata non può essere misurata facilmente; al fine di ottenere tale valore, si è studiato in questo articolo un metodo di investigazione inverso basato sulla modellazione numerica del calore trasferito alle pareti, usando anche delle condizioni al contorno. L'effetto di stocking-destocking del materiale PCM è chiaramente valutabile quando si osserva l'evoluzione della densità di flusso del calore interno. Per il caso del PCM le fluttuazioni variano tra 36 e -103 W/m<sup>2</sup>, invece per quello senza PCM si ha una fluttuazione termica tra 4 ed i -22 W/ m<sup>2</sup>. Il calore penetra il pannello di PCM quando la densità del flusso radiativo è massima e rilascia calore quando la temperatura è minima con tutte le luci spente. In questo test si è notato come l'effetto di surriscaldamento sia più basso con l'utilizzo del PCM e che l'energia stoccata sia fuoriuscita dal PCM quando la temperatura nella stanza si abbassa. La temperatura della pareti con PCM si è ridotta , migliorando il comfort termico radiativo. L'accumulo di energia disponibile utilizzando nella parete lo strato di PCM di 5 mm della DuPont fa sì che l'accumulo di energia disponibile sia del doppio rispetto alla parete ordinaria; tale valore corrisponde ad un equivalente accumulo di energia di uno strato di 8 cm di calcestruzzo.

Tipi di utilizzo	Fogli flessibili di 5mm
Tipo di PCM	PCM con 60% di microincapsulato paraffina con copolimeri ( in struttura polimerica) (Energain della DuPont de Nemours Society)
Melting temperature	22 °C
Stagione dell'esperimento	Stagione estiva
Conduktività termica	Sotto il melting point < 0,22 W/mk
	Sopra il melting point=0,18 W/mk

Tabella 3. 7 - Sommario dei risultati

### 3.2.4 Software e Modello termofisico

Per poter avere delle informazioni sulle performance energetiche dell'impianto da noi considerato, ci siamo avvalsi di un particolare software: il TRNSYS (Transient System Simulation Program), disponibile in commercio dal 1975, un software pensato per l'analisi di sistemi complessi capace di determinare le prestazioni transitorie di sistemi energetici termici il cui comportamento sia variabile nel tempo, con notevole grado di dettaglio [76]. La sua natura modulare rende il software molto flessibile, facile da usare, e consente l'aggiunta di modelli matematici non presenti nella libreria standard, qualora questo si renda necessario per consentire la simulazione di componenti non presenti nella sua libreria. Un sistema definito in TRNSYS si presenta costituito da una serie di componenti (types), collegati tra loro in modo opportuno, al fine di poter simulare le prestazioni del sistema oggetto di studio. TRNSYS contiene al suo interno una serie di sottoprogrammi (subroutines) scritti in linguaggio Fortran. Ogni sottoprogramma contiene un modello di un

componente del sistema contraddistinto da un numero che ne illustra la funzione (Type number); specificando i parametri, i valori indipendenti dal tempo, i dati di input, i valori dipendenti dal tempo il modello può calcolare gli output funzioni del tempo stesso. Gli output così ottenuti possono essere usati come input per altri componenti che contengono un diverso modello matematico. L'utente può realizzare autonomamente un componente di TRNSYS per modellare nuovi componenti messi a disposizione dalla nuova tecnologia. Ovviamente, sarà prima necessario verificare che il modello che si intende simulare non sia contenuto tra i 72 componenti della libreria standard o nelle librerie aggiuntive che modellano diversi componenti quali ad esempio le costruzioni edilizie a più zone, i controllers, i collettori solari, le turbine eoliche, ecc. oltre che ai modelli per l'input di informazioni climatiche, alle forcing functions, i profili di occupazione, e quelli per l'output dei risultati.

La modellazione avviene tramite l'interfaccia grafica IISiBat, traducendo dal francese in maniera approssimativa "interfaccia intelligente per la simulazione degli edifici", la quale è un programma generale dell'ambiente di simulazione che è stato adattato dalla casa del software di TRNSYS.

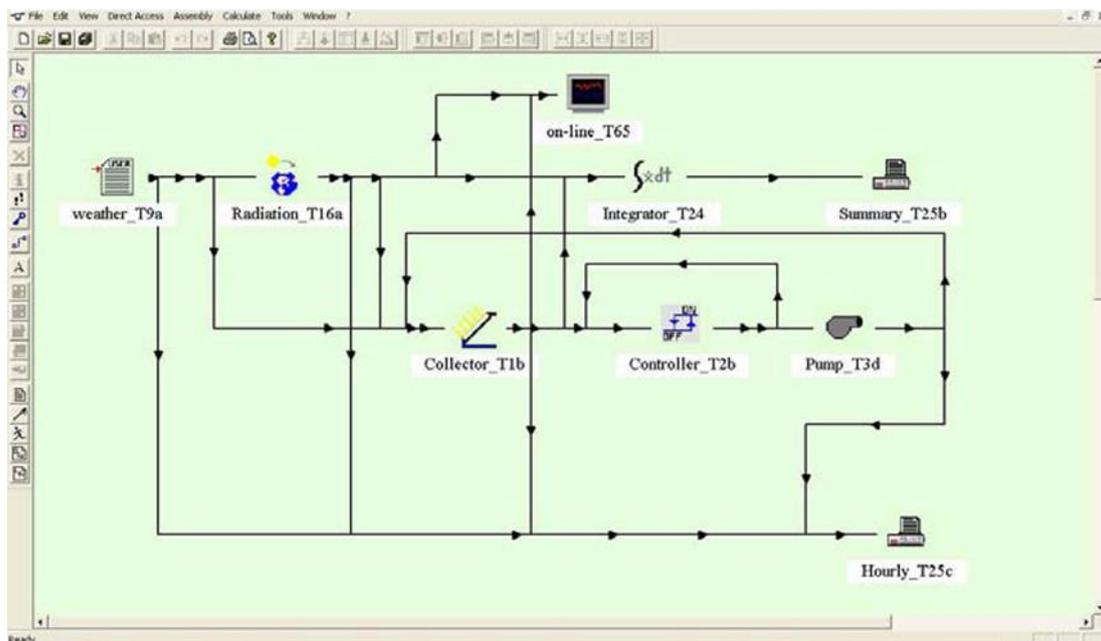


Figura 3. 10 - Finestra di assemblaggio di IISiBat

La Figura 3. 10 mostra la finestra di assemblaggio di IISiBat (assembly window), che viene usata per predisporre e far funzionare le simulazioni di TRNSYS. La finestra principale contiene icone descrittive dei types collegate da links. Ogni icona rappresenta un differente componente di sistema: una pompa, un collettore solare, ecc. L'utente sceglie il type necessario alla propria simulazione tra quelli presenti nella lista per categorie posta sulla destra (Direct Access) e, da qui, trascina l'icona corrispondente all'interno della finestra di assemblaggio. A questo punto non rimane che creare i collegamenti che ripartiscono le informazioni fra i componenti: le linee che collegano le icone rappresentano Figura 3. 10. Sono possibili collegamenti distinti tra variabili diverse di due componenti: temperature, portate, energie, ecc.; ogni link tra due types deve essere specificato cliccando sul collegamento, in modo da aprire una finestra dettagliata. IISiBat controlla che le dimensioni delle caratteristiche collegate siano uguali e non permette collegamenti tra caratteristiche incompatibili. Ad ogni componente è associato un file Proforma (Figura 3. 11) che dà una descrizione in forma sintetica del componente.

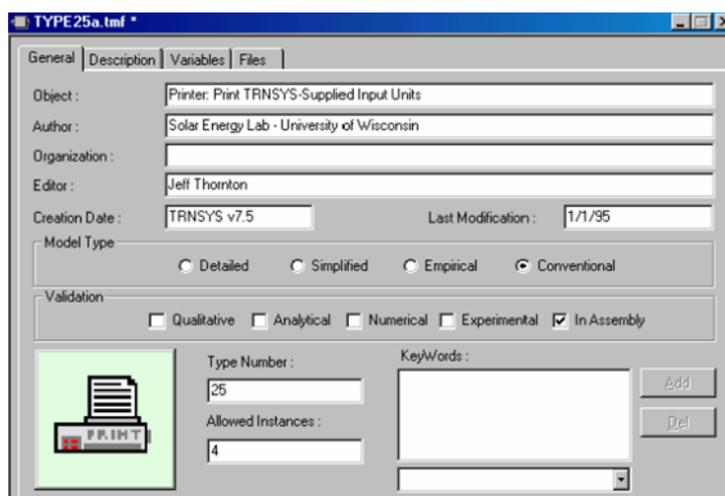


Figura 3. 11 - Finestra Proforma.

Tutti i componenti creati o aggiunti al programma IIsibat devono avere un proforma completo per poter essere usati nell'Assembly Panel. Questa finestra Proforma è soltanto informativa e non può essere modificata dall'utente quando questo vi accede. È composta da quattro finestre contenenti tutte le informazioni richieste per consentire che il modello venga usato nella maniera corretta. La prima finestra, General, contiene informazioni relative alla storia e alla funzione del componente. La seconda finestra, Description, contiene una descrizione dettagliata del componente. La terza finestra, Variable, contiene una descrizione completa delle variabili, parametri, input, output, richiesti dal componente. La quarta finestra, files, contiene informazioni riguardanti i files associati al componente, richiesti durante la simulazione. Un altro passo importante nella creazione di una simulazione in IIsibat è la specificazione dei parametri richiesti, dei valori degli input iniziali e dei files esterni.

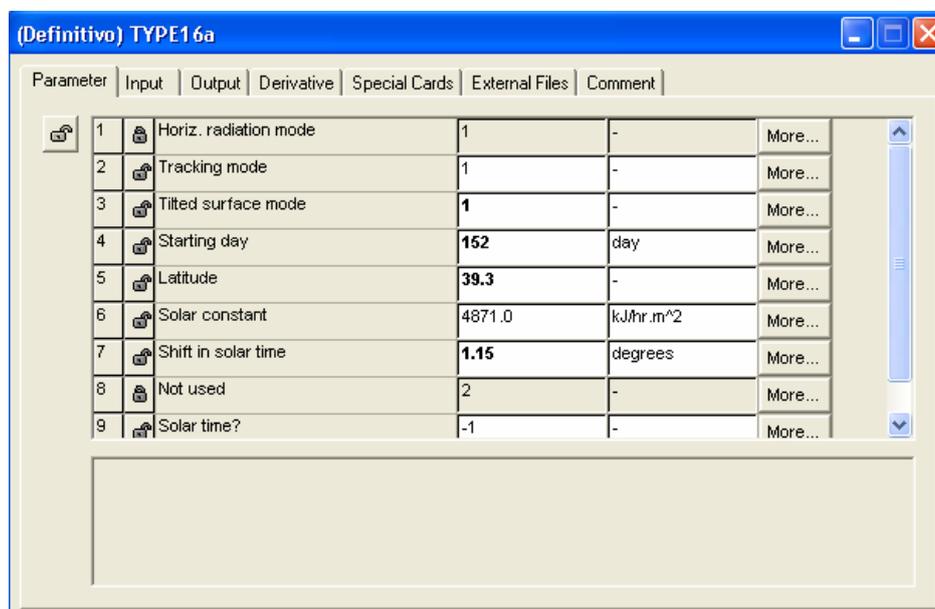


Figura 3. 12 - Finestra proprietà componente 16a TRNSYS

Questo si ottiene attraverso una finestra (Figura 3. 12) che si apre nell'Assembly Panel una volta che si clicca sull'icona del componente desiderato. La finestra contiene un numero di azioni che sono comuni ad ogni type di modello. Il passo successivo, prima di collegare i componenti tra loro,

è quello di specificare la durata della simulazione, il timestep ( tempo di campionamento ) e il nome del file di input che verrà scritto. Questo si ottiene attraverso la finestra della Simulation Control Card. A questo punto non rimane che collegare tra loro i vari componenti. Per fare ciò viene usato lo strumento Link. Eseguito il collegamento, si devono specificare i dettagli del collegamento tra i due componenti, utilizzando la finestra Connection. La finestra (Figura 3. 13) si apre cliccando sul collegamento tra i due componenti. Al suo interno contiene due colonne di variabili: la prima colonna mostra gli output del primo componente, la seconda gli input del secondo componente. Tutti gli input che non vengono collegati vengono assunti pari al valore inizialmente specificato e rimarranno costanti durante tutta la durata della simulazione.

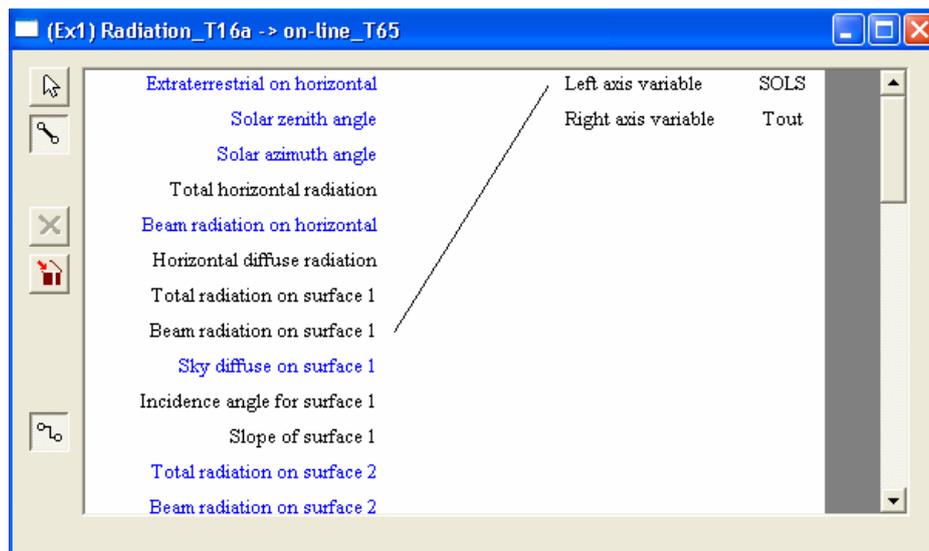


Figura 3. 13 - Finestra Connection.

Eseguiti tutti i collegamenti, il progetto è pronto per essere simulato con TRNSYS, attraverso il comando Run Simulation, per determinare i risultati. A questo punto IIsibat mostra il messaggio Verifying Project per indicare che sta controllando che il progetto non contenga errori. Quando la simulazione è completata, TRNSYS mostra un messaggio che comunica all'utente che la simulazione è ultimata; se dovessero esserci degli errori, il software consiglia di controllare il list file. I risultati della simulazione vengono registrati in alcuni files di testo. Inoltre, se durante la costruzione del progetto si introduce il componente Online Plotter, i risultati finali vengono visualizzati, durante l'esecuzione della simulazione, in forma grafica, diagrammati in funzione del tempo.

### Type 56

Il TRNSYS quindi, consente di valutare il comportamento dinamico di sistemi energetici complessi, tra i quali anche gli edifici. Per questi ultimi si fa ricorso ad una specifica subroutine, la TYPE 56 Multizone Building, in grado di caratterizzare le prestazioni energetiche di un edificio e di dettagliare i risultati rispetto al numero di zone termiche richiesto dall'utente.

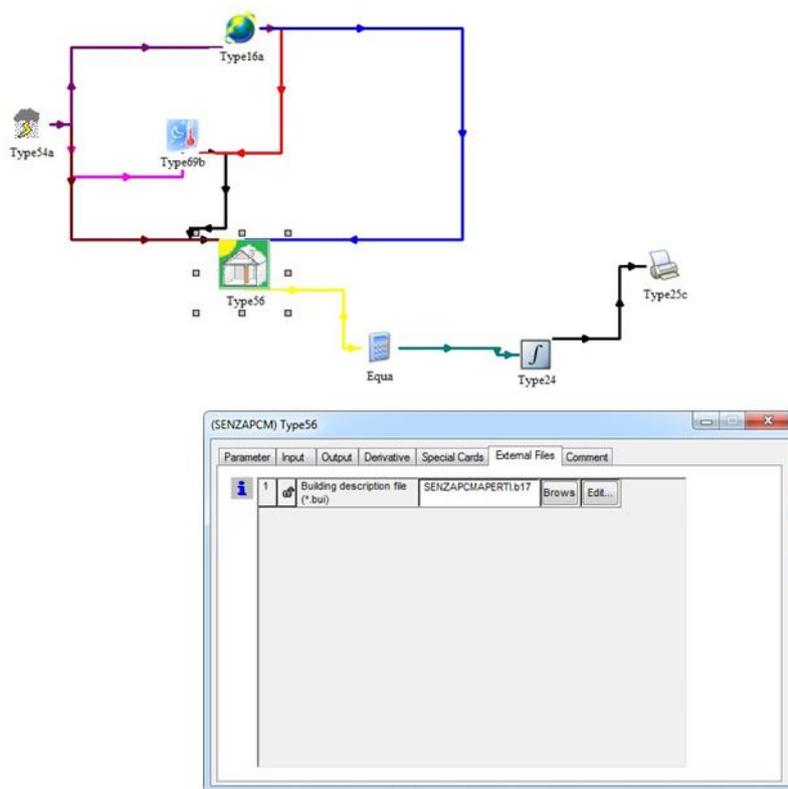


Figura 3. 14 - Interfaccia TRNSYS\_ Type 56.

Dal TRNSYS si carica direttamente il TRNBuild, il componente TRNSYS atto a definire ed a determinare le caratteristiche di qualsiasi edificio.

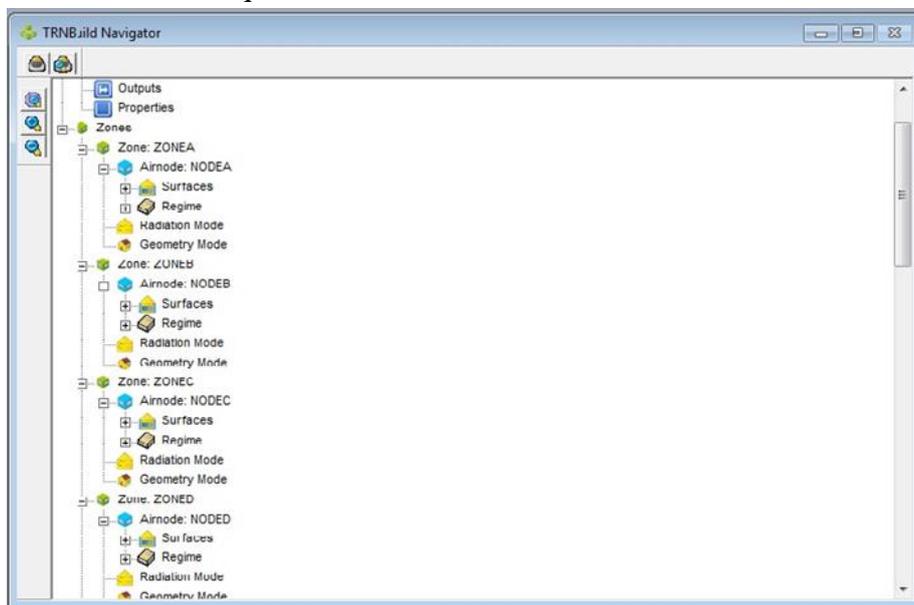


Figura 3. 15 - TRNBuild\_ Finestra di navigazione.

Con TRNBuild è possibile definire qualsiasi tipo di edificio si voglia, poiché, si ha la possibilità di descrivere qualsiasi zona (definite NODE).

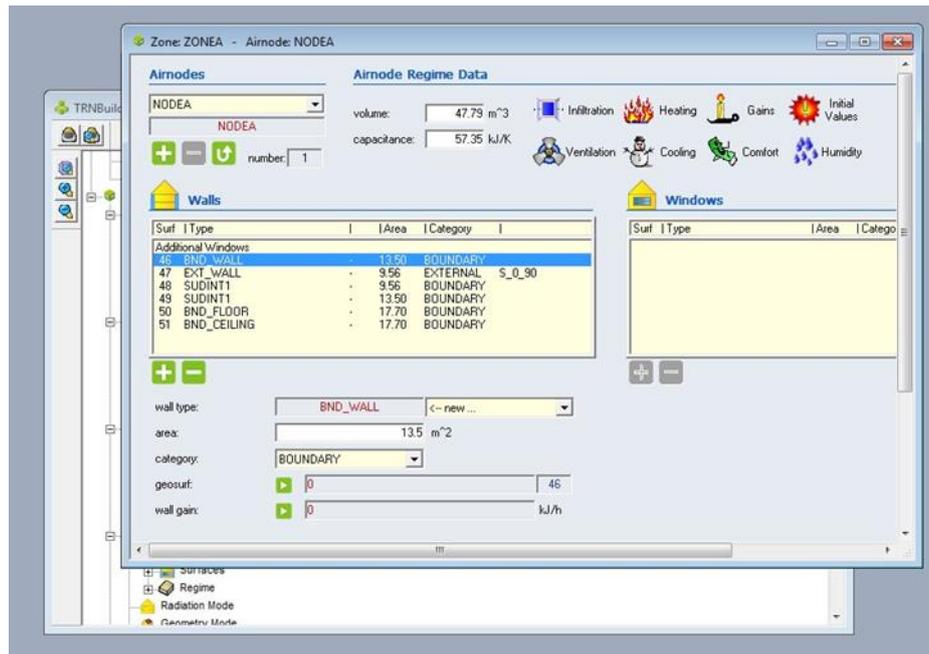


Figura 3. 16 - TRNBuild\_ Finestra ZONE.

Dalla figura sopra si può facilmente notare come si fattibile la descrizione dei vari ambienti, tramite la definizione delle varie pareti che la definiscono; ciascuna parete può essere definita come una parete di confine ( BOUNDARY), come una parete esterna od interna, di ciascuna ovviamente è possibile definire la stratigrafia; in ogni muro può essere aggiunto uno o più infissi, di cui è possibile definire materiali, proprietà, trasmittanze. Inoltre si può definire il volume della stanza, le infiltrazioni (come da NORMA), i riscaldamenti e gli impianti di condizionamento.

### Type 1270: PCM

Il modello Type 1270 descrive il comportamento di un materiale a cambiamento di fase completamente contenuto all'interno di una parete (quindi il PCM non è direttamente a contatto con l'aria). Il Type1270 è studiato per interagire con il Type56 e può modellare un PCM posizionato ovunque nello spessore di una parete Type56. L'utente può specificare le proprietà fisiche del PCM (densità, calore specifico, temperatura di fusione, temperatura di congelamento ed il calore latente di fusione). Il modello inoltre è dotato di valori per una determinata marca di PCM; l'utente può selezionare un qualsiasi modello direttamente impostando un singolo parametro. Il Type1270 modella un PCM puro; da un punto di vista fisico questo implica che il PCM ha il suo processo di congelamento/scongelo a temperatura costante, per avere un calore specifico costante in fase solida e avere un calore specifico costante in fase liquida.

### Modello termofisico

Per valutare dei casi come il trasferimento di energia tra un edificio ed il terreno in cui risiede (Type49) o per valutare la temperatura e la pressione del flusso di aria tra zone termiche diverse di un edificio con CONTAM (Type97), i TRNSYS Type56 creano interfacce con altri tipi di modelli TRNSYS. Il Type997 PCM Wall Layer segue lo stesso modello: il Type 1270 fa uso del Type56 BOUNDARY per consentire all'utente di inserire uno strato PCM ovunque si voglia all'interno di una struttura muraria. In questo caso le parti standard del muro sono modellate in Type56 mentre lo strato PCM è modellato esternamente. Come succede per il Type49 e per il Type97, le informazioni

vengono passate dal modello Type56 al modello esterno. Il modello esterno valuta l’impatto di tali informazioni e passa le informazioni al Type56. Il Type56 rivaluta (e se necessario) passa informazioni al modello esterno. L’interazione tra il Type56 ed il modello esterno continua automaticamente in base alla capacità intrinseca del kernel TRNSYS di risolvere tali sistemi per sostituzione successiva. Nel caso del Type1270, l’utente divide la parete contenente il PCM in due parti, ciascuna parte contenente gli strati della parete standard che sono disposte su un lato dello strato PCM. Le due pareti sono ognuno un insieme di “BOUNDARY” con il coefficiente connettivo impostato a 0.0001 per il lato posteriore (che indica il contatto diretto) e la temperatura di boundary impostata su un valore definito di input denominato T\_PCM. L’utente seleziona quindi l’output Type56 "QCOMO" (NTYPE20) per ciascuna delle due pareti. Questi output danno il flusso di energia che attraversa la superficie esterna di ciascuna parete BOUNDARY. NOTA: Bisogna fare attenzione ad invertire i segni degli outputs quando si trasferiscono; il Type56 definisce positiva il flusso di energia che entra nel muro BOUNDARY, invece il modello Type1270 definisce come flusso di energia positiva l’energia entrante all’interno dello strato PCM. Uno dei due valori deve essere cambiato invertendo semplicemente il segno. Il modello PCM prende i due inputs di energia dal Type56 e calcola la temperatura dello strato PCM. Questa temperatura viene riportata all’ingresso Type56 come T\_PCM. La Figura 3. 17 che segue mostra un diagramma schematico del concetto di modellazione.

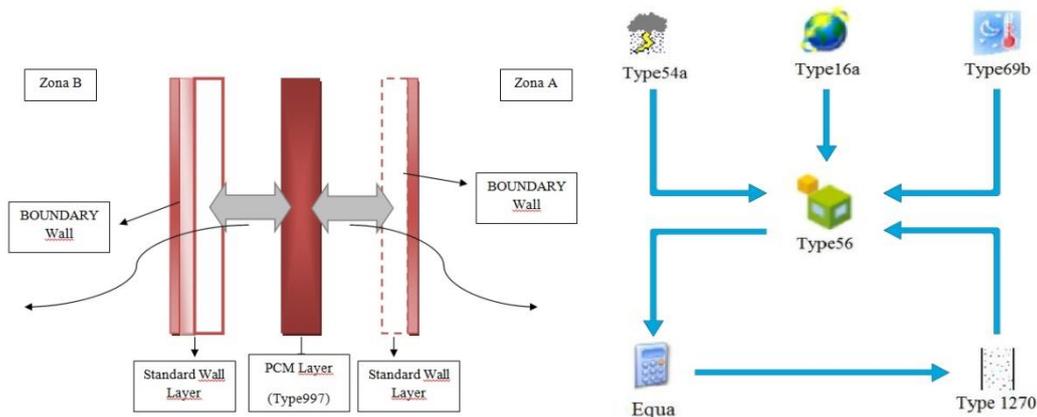


Figura 3. 17 - Modello descrittivo e schema di simulazione TRNSYS per utilizzo di PCM integrato in elementi opachi

Le ipotesi assunte dal Type 1270 sono:

1. Il calore specifico del PCM è costante ed uguale sia nello stato liquido che nello stato solido.
2. La resistenza termica di contatto tra il PCM e gli strati adiacenti è trascurabile.
3. Il processo di solidificazione e di fusione avviene ad una specifica temperatura.

Semplificazione del comportamento di un PCM.

Indicando con  $q_1$  e  $q_2$  i flussi di energia entranti nello strato di PCM attraverso gli strati di parete adiacenti, si distinguono due condizioni [77]:

se lo strato di PCM è in fase solida, la sua temperatura è calcolata alla fine del timestep con l’eq. (3.1):

$$T_f = T_i + \frac{(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)}{m_{PCM}c_{ps}} \quad (3.1)$$

mentre se è in fase liquida, si fa riferimento all’eq. (3.2):

$$T_f = T_i + \frac{(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)}{m_{PCM}c_{pl}} \quad (3.2)$$

Quando la temperatura dello strato di PCM è uguale alla temperatura di melting (Figura 3. 1) si verifica al suo interno il processo di solidificazione o di fusione, ed il Type 1270 memorizza la quantità di energia rilasciata o immagazzinata. Se l'energia assorbita dallo strato di PCM eccede la capacità di accumulo latente dello stesso in un determinato timestep, il Type 1270 determina la quantità di energia richiesta per fondere la massa rimasta solida ed attribuisce l'energia residua al cambiamento di temperatura secondo l'eq. (3.2). Analogamente, se lo strato di PCM rilascia verso l'ambiente una quantità maggiore dell'energia latente, il Type 1270 calcola l'energia richiesta per solidificare la massa rimasta liquida, attribuendo l'energia residua al cambiamento di temperatura secondo l'eq. (3.1). Nel caso in esame, nel modello dell'edificio con integrazione di PCM nelle partizioni interne verticali o orizzontali, le quantità  $q_1$  e  $q_2$  sono fornite dal Type 56 (Figura 3. 17), mentre nel caso di PCM integrato nelle pareti esterne, il flusso termico proveniente dall'esterno viene modellato in TRNSYS secondo lo schema riportato in Figura 3. 18.

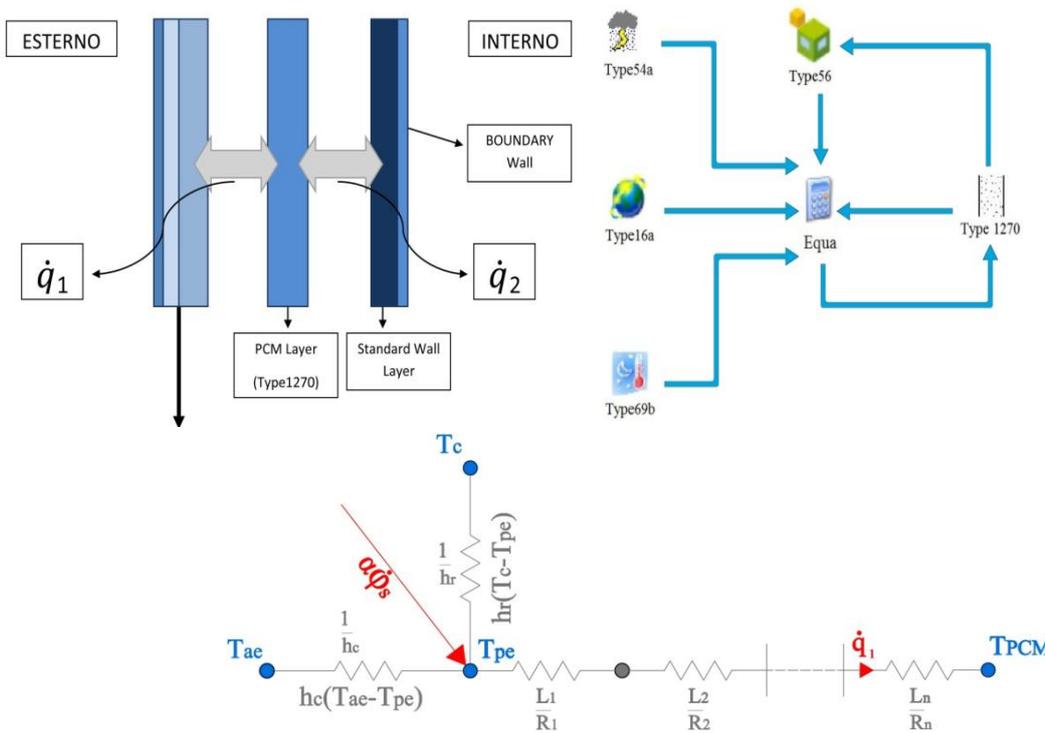


Figura 3. 18 - Modello descrittivo, schema di simulazione TRNSYS dello strato di PCM integrato nelle pareti esterne e schema elettrico equivalente

Vengono considerati tutti gli scambi termici esterni, convettivi e radiativi a bassa e ad alta lunghezza d'onda, che insistono sulla parete esterna, ed inviati al Type 1270 nel timestep corrispondente. L'energia  $q_1$  è determinata con le eq. (3.3) e (3.4):

$$T_{pe} = \frac{\alpha\phi_s + h_c T_{ae} + h_r T_c + \frac{T_{PCM}}{\sum_{k=1}^n R_k}}{h_c + h_r + \frac{1}{\sum_{k=1}^n R_k}} \quad (3.4)$$

$$\dot{q}_1 = A[\alpha\phi_s + h_c(T_{ae} - T_{pe}) + h_r(T_c - T_{pe})] \quad (3.3)$$

Si noti che le capacità termiche degli strati che precedono il PCM sul lato esterno vengono trascurate. Nei casi riguardanti l'utilizzo di PCM integrato nelle partizioni interne verticali o orizzontali, sono stati utilizzati tanti Types 1270 quante sono le partizioni interne; mentre nel caso degli elementi opachi esterni, il Type 1270 è stato usato solo nelle pareti provviste di PCM. L' input

per il Type è piuttosto semplice; è costituito da una serie di parametri fisici del materiale a cambiamento. Questi sono la densità, il calore specifico allo stato liquido, il calore specifico allo stato solido, la temperatura di fusione, la temperatura di solidificazione e l'energia latente di fusione. Si noti che con la versione iniziale del Type1270, la temperatura di fusione e quella di solidificazione devono essere uguali così come il calore specifico allo stato solido e allo stato liquido devono essere uguali. Se non lo sono, il modello genererà dati errati. Nelle versioni future si prevede che il modello sarà in grado di valutare le prestazioni dei materiali anche in fase non pura. L'utente ha due opzioni per l'immissione dei dati PCM; manualmente fornendo i valori sopra elencati o automaticamente selezionando il numero di modello di un PCM disponibile nelle PhaseChange Energy Solutions.

### **3.3 Caso Studio e soluzione proposte**

#### **3.3.1 Caratteristiche tecniche**

Per quanto riguarda la struttura oggetto di studio, si tratta di un appartamento duplex di un edificio in linea: l'organismo edilizio è scandito orizzontalmente in 6 piani e raggiunge 18 metri in altezza; dal punto di vista funzionale esso accoglie attività commerciali al piano terra e residenze nei superiori 5 piani (Figura 3. 19).

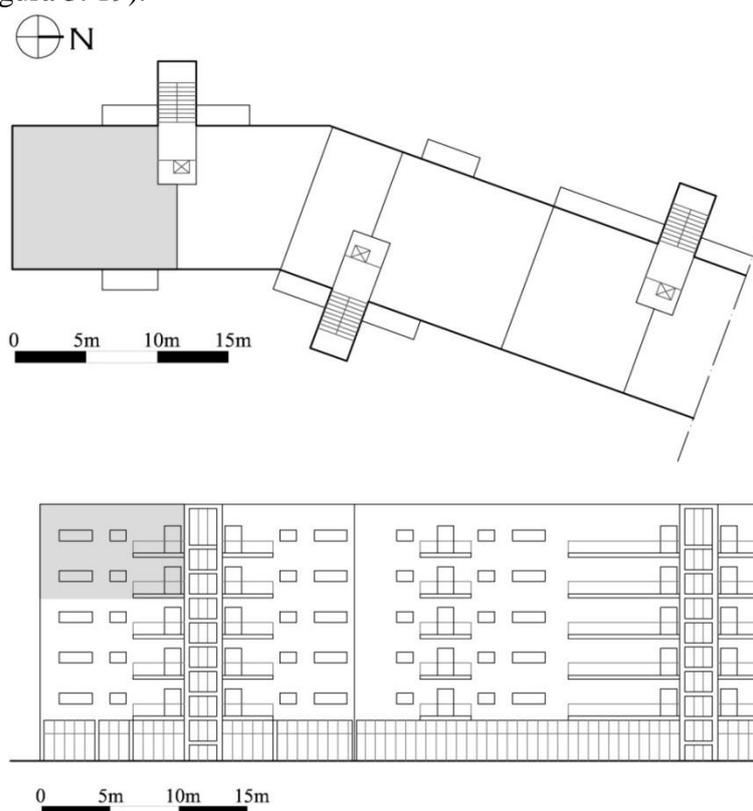


Figura 3. 19 Individuazione dell'alloggio oggetto di studio

L'alloggio, avente una superficie complessiva di 194 m<sup>2</sup>, presenta la stessa distribuzione in pianta sui due livelli e confina superiormente con il solaio di copertura. In Figura 3. 20 è riportata la pianta di un piano tipo.

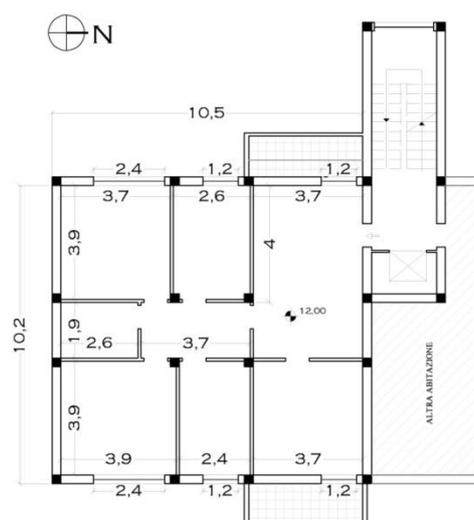


Figura 3.20 - pianta quotata dell'appartamento, misure in [m]

Gli elementi costruttivi che vanno a comporre l'abitazione, sono: pareti verticali esterne con isolamento a cappotto ( $H= 0.359 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ) indicate con "Parete esterna tipo 1"; pareti verticali confinanti con altre unità abitative ( $H= 0.896 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ) definite "Parete esterna tipo 2", pareti verticali interne che suddividono l'ambiente nelle varie stanze ( $H= 2.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ), solaio interpiano ( $H= 1.384 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ) e solaio di copertura ( $H= 0.237 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ) entrambi in laterocemento. Nella Figura 3.21 viene presentata la distribuzione dei suddetti componenti all'interno dell'alloggio.

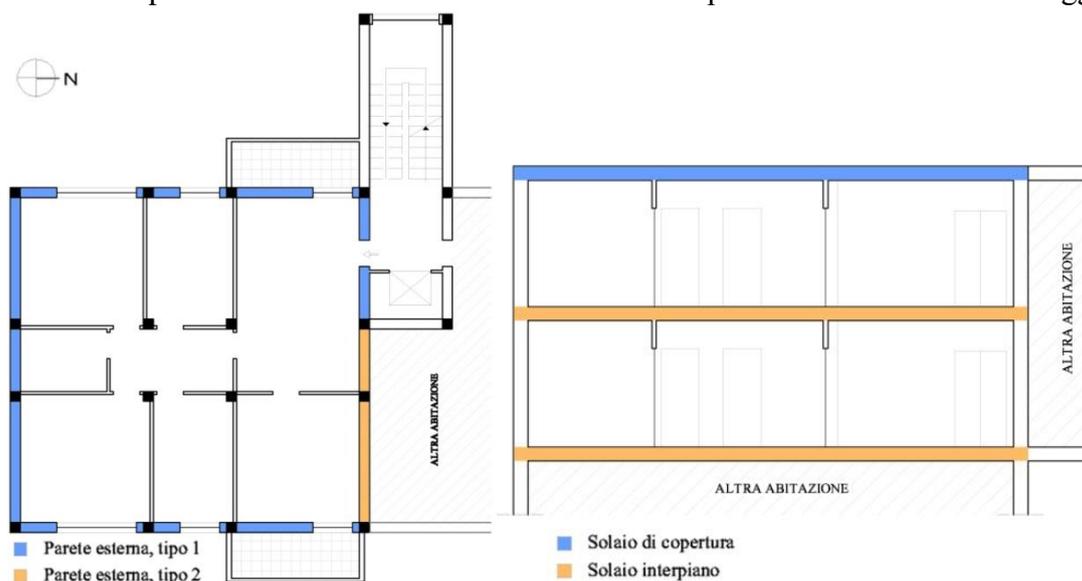


Figura 3.21 - distribuzione degli elementi opachi dell'involucro edilizio

Le Tabella 3.8 e Tabella 3.9 riportano le stratigrafie degli elementi opachi e vetrati e le proprietà termiche dei materiali costruttivi; per quanto riguarda le proprietà ottiche e radiative di ogni elemento scelto per la progettazione, si fa riferimento alla Tabella 3.10.

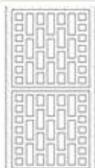
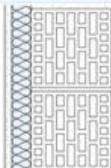
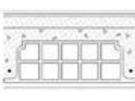
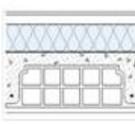
Partizioni verticali interne					
	<i>Materiale</i>	<i>Spessore [m]</i>	<i>Densità [kg/m³]</i>	<i>Conduttività [W/mK]</i>	<i>Capacità termica [J/kgK]</i>
	intonaco	0.02	1 400	0.7	1 000
	tavella	0.06	666.7	0.46	840
	intonaco	0.02	1 400	0.7	1 000
Parete esterna, tipo 1					
	<i>Materiale</i>	<i>Spessore [m]</i>	<i>Densità [kg/m³]</i>	<i>Conduttività [W/mK]</i>	<i>Capacità termica [J/kgK]</i>
	intonaco	0.02	1 400	0.7	1 000
	mattoni forati	0.30	686.7	0.35	840
	isolante	0.06	20	0.036	1 200
	intonaco	0.02	1 400	0.7	1 000
Parete esterna, tipo 2					
	<i>Materiale</i>	<i>Spessore [m]</i>	<i>Densità [kg/m³]</i>	<i>Conduttività [W/mK]</i>	<i>Capacità termica [J/kgK]</i>
	intonaco	0.02	1 400	0.7	1 000
	mattoni forati	0.30	686.7	0.35	840
	intonaco	0.02	1 400	0.7	1 000
Solaio interpiano					
	<i>Materiale</i>	<i>Spessore [m]</i>	<i>Densità [kg/m³]</i>	<i>Conduttività [W/mK]</i>	<i>Capacità termica [J/kgK]</i>
	piastrelle	0.01	2 300	1	840
	malta	0.05	2 000	1.4	1 000
	laterocemento	0.22	666.7	0.46	840
	intonaco	0.02	1 400	0.7	1 000
Solaio di copertura					
	<i>Materiale</i>	<i>Spessore [m]</i>	<i>Densità [kg/m³]</i>	<i>Conduttività [W/mK]</i>	<i>Capacità termica [J/kgK]</i>
	intonaco	0.02	1 400	0.7	1 000
	laterocemento	0.22	666.7	0.46	840
	bitume	0.004	1 200	0.7	1 000
	isolante	0.12	20	0.036	1 200
	aria	0.04	1.3	0.31	1 008
	tegole	0.01	600	0.13	840

Tabella 3. 8 - descrizione stratigrafica e proprietà termofisiche degli elementi costruttivi opachi

Finestra							
	<i>Materiale</i>	<i>Spessore [m]</i>	<i>Conduttività [W/mK]</i>	<i>Telaio</i>	<i>R<sub>telaio</sub> [m²K/W]</i>	<i>Fattore solare</i>	<i>U<sub>f</sub> [W/m²K]</i>
	Vetro	5.7	1				
	Argon	6.4	0.017	40% di A <sub>f</sub>	0.33	0.703	2.01
	Vetro	5.7	1				

Tabella 3. 9 - Descrizione stratigrafica e proprietà termo fisiche degli elementi costruttivi vetrati

Elemento		Coeff. di assorbimento d'onda lunga	Coeff. di assorbimento d'onda corta	Emissività di lungo
Pareti		0.9	0.35	0.9
Finestra	telaio	0.9	0.4	0.9
	vetro	0.837	0.04	0.837

Tabella 3. 10 - Coefficienti radiativi ed emissività degli elementi costruttivi

### Ambiente interno

Da un punto di vista termico, ogni stanza dell'alloggio viene definita come zona climatica o nodo aria, ognuna delle quali presenta esposizione e carichi diversi (Figura 3. 22). La costruzione di ogni zona avviene attraverso la definizione delle superfici che la compongono; ogni superficie presenta diverse condizioni al contorno, condizioni strettamente legate all'ambiente con cui esse si relazionano: se la superficie si trova a contatto con un ambiente non riscaldato o con l'esterno, allora a questa sarà data la condizione di "external" (pareti esterne tipo 1), se è a contatto con un altro ambiente riscaldato allora essa verrà definita come "boundary" (pareti esterne tipo 2), se invece funge da separatore tra due zone facenti parte dello stesso ambiente allora tale superficie prenderà il nome di "adjacent" (soffitto interpiano e pareti verticali interne).

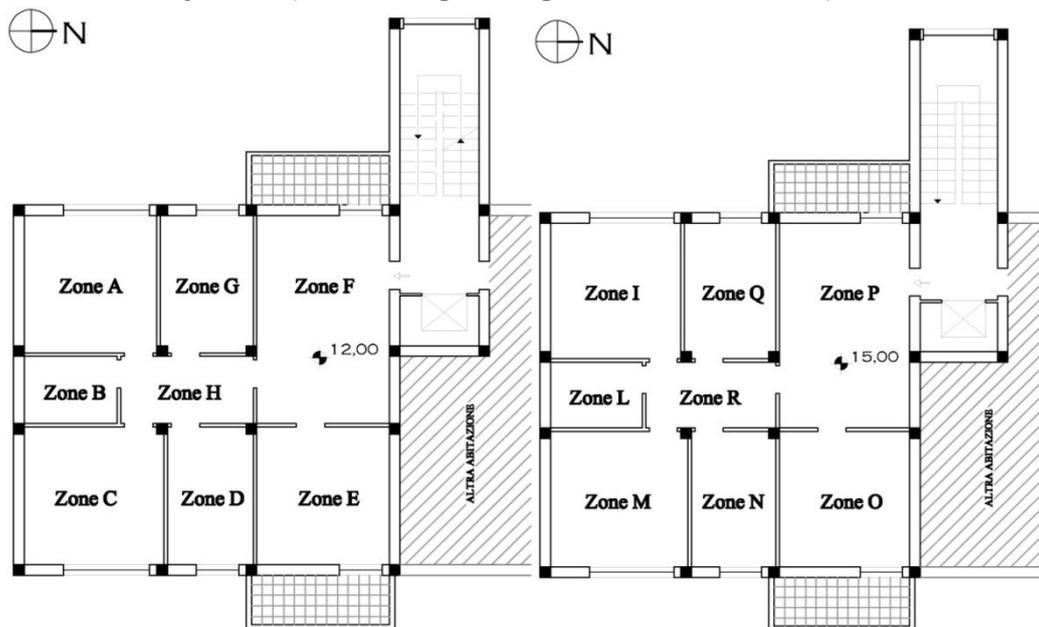


Figura 3. 22 - individuazione delle zone climatiche che compongono l'alloggio: piano primo in alto, piano secondo in basso

L'appartamento dispone di un impianto di condizionamento che assicura valori di temperatura dell'aria interna non inferiori a 20 °C in inverno, e non superiori a 26 °C in estate. Le temperature di set point sono state scelte in conformità alla UNI EN 15251 [78], la quale fornisce indicazioni sui range di temperatura interna in funzione della categoria di edificio e della stagione (inverno/estate). Inoltre per edifici ad uso residenziale la norma UNI TS 11300-1 [56] prevede di utilizzare un ricambio d'aria indotto da ventilazione naturale pari a 0.3 V/h, valore che tiene anche conto del fenomeno delle infiltrazioni. Per il calcolo dei fabbisogni è necessario tener conto di quelli che sono i carichi interni prodotti dalla presenza di persone, attrezzature e illuminazione, in base a ciò si è pensato di prevedere la presenza di questi apporti energetici nelle zone C,F,M e P. Il software

TRNBUILD permette l'inserimento di questi dati mediante l'uso di una discreta libreria dedicata. È stata prevista una schedule in modo tale che l'illuminazione artificiale sia funzionante solo dalle 20.00 alle 22.00, il cui apporto è  $5 \text{ W/m}^2$  di cui solo il 50 % è a trasmissione convettiva. Per quanto riguarda il dato relativo alla presenza di persone, l'interfaccia del programma permette di scegliere tra quelli che sono i dati forniti dalla ISO 7730 [79], che fornisce il carico prodotto dall'individuo in funzione dell'attività che si prevede esso svolga all'interno dell'ambiente e, trattandosi di una residenza, si è scelto di inserire quattro persone che praticano un'attività leggera a cui corrisponde un apporto termico di 120 W, di cui 65 W di tipo sensibile e 55 W di tipo latente. Quando si parla di comfort termico, si fa riferimento alla norma EN ISO 7730 [79] che specifica i metodi per la previsione della sensazione termica percepita da un essere umano all'interno degli ambienti. Nel caso oggetto di studio i fattori che caratterizzano il comfort termico, presenti nell'interfaccia del programma, sono: la resistenza termica unitaria dell'abbigliamento, l'aliquota metabolica (potenza che un individuo seduto che non svolge attività meccanica/fisica trasferisce all'ambiente) e la velocità dell'aria. A questi sono stati assegnati rispettivamente i seguenti valori: 0.5 clo (valore medio tra quello tipico di indumenti estivi e quello tipico di indumenti invernali), 1.15 met (met=unità di misura del dispendio energetico richiesto da un lavoro) e 0.1 m/s (valore che consente di rispettare limiti accettabili di rischio da correnti d'aria). Lo studio è stato compiuto per Cosenza, Roma e Milano; le tre città hanno latitudine, altitudine e zona climatica diverse tra loro [80] (Tabella 3. 11), e quindi dati climatici dissimili.

<i>Località</i>	<i>Latitudine</i>	<i>Altitudine</i>	<i>Zona Climatica</i>	<i>GG</i>
Cosenza	39.29 °	200 m	C	1317
Roma	41.88 °	21 m	D	1415
Milano	45.45 °	121 m	E	2404

Tabella 3. 11 - Latitudine, altitudine e zona climatica per le tre città oggetto di studio

I dati climatici si riferiscono alla norma UNI 10349 [80] che ne fornisce i valori medi mensili, che vengono acquisiti da TRNSYS, attraverso un file txt processato dal Type 54a, per poi di generare dei valori orari per tutto l'anno.

### 3.3.2 Soluzioni integrate in pareti interne

Si vuole indagare l'effetto che il PCM ha in termini di riduzione del fabbisogno energetico annuale, nel caso in cui venga integrato nelle partizioni interne di un appartamento: solaio e pareti verticali interne. L'obiettivo di tale analisi è quello di effettuare uno studio parametrico per ottimizzare il risparmio energetico annuale considerando come variabili la temperatura di melting (PMT), la quantità di PCM e la località. Lo studio è stato condotto per tre città, Cosenza, Roma e Milano, rappresentative di tre differenti climi italiani, per tre diverse quantità di PCM ( $10, 15, 20 \text{ m}^3$ ) e per una PMT variabile tra 20 e 26 °C. Al fine di valutare l'efficacia del PCM, i risultati delle simulazioni sono stati comparati con il caso senza PCM che rappresenta quindi il caso di riferimento. Inoltre, si sono effettuate delle valutazioni a livello mensile, per individuare la durata e i periodi dell'anno in cui si ha l'effetto benefico dell'accumulo/rilascio di calore latente, e

giornaliero per fare una valutazione in termini di inerzia termica ossia la capacità della parete di attenuare le fluttuazioni della temperatura e, quindi, il picco del carico che deve essere asportato o fornito da un opportuno impianto di climatizzazione. Di seguito, nelle Figura 3. 23 e Figura 3. 24, vengono descritte le nuove stratigrafie del solaio e delle pareti interne: nel solaio lo strato di PCM viene interposto tra lo strato in latero-cemento e la soletta in calcestruzzo, mentre nelle pareti verticali interne lo strato di PCM viene collocato nella zona centrale tra i due strati composti da tavelle.

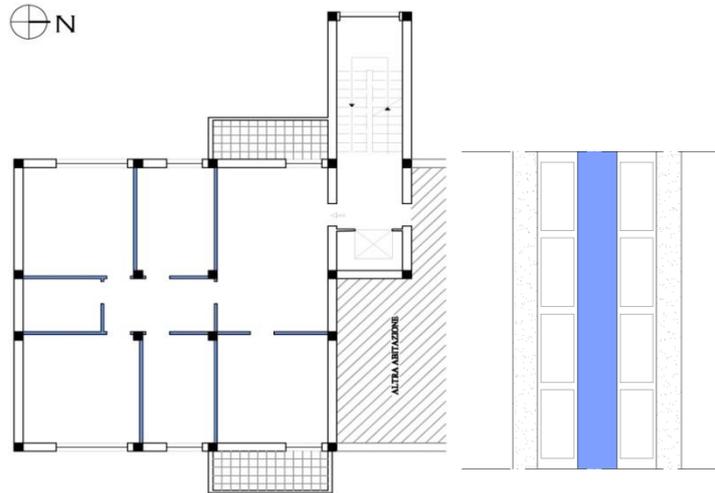


Figura 3. 23 - Partizioni verticali interne con PCM e relativa stratigrafia

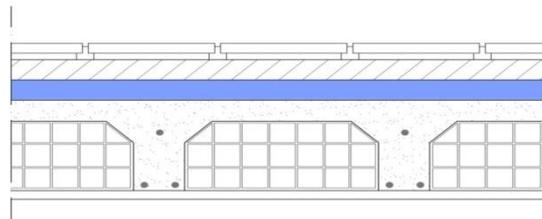


Figura 3. 24 - Stratigrafia partizioni orizzontali con PCM

L'integrazione del materiale implica non solo l'alterazione di quelle che sono le caratteristiche fisiche e termiche dell'elemento costruttivo, ma anche una variazione volumetrica degli ambienti e la conseguente diminuzione del volume soggetto a condizionamento. Quindi, nelle simulazioni, si è prestato attenzione a ridurre il volume di ogni zona in funzione della quantità presente di PCM: il solaio interpiano ha una superficie totale di  $97 \text{ m}^2$  per cui lo spessore equivalente dello strato aggiunto, corrispondente a  $10$ ,  $15$  e  $20 \text{ m}^3$  di PCM, è pari a  $0.102$ ,  $0.154$  e  $0.205 \text{ m}$  rispettivamente, mentre le pareti verticali interne hanno una superficie pari a circa  $193 \text{ m}^2$  per cui lo spessore equivalente corrisponde a  $0.052$ ,  $0.078$  e  $0.104 \text{ m}$ .

### 3.3.3 Soluzioni integrate in pareti verticali esterne

L'analisi riguarda la valutazione del comportamento termico dell'involucro edilizio quando il PCM viene integrato nelle pareti esterne, considerando le città di Cosenza, Roma e Milano. Parola chiave di tale analisi rimane sempre "ottimizzare", mantenendo come variabili la temperatura di melting (PMT), la località e la quantità di PCM. Le soluzioni proposte prevedono l'integrazione del PCM nelle parete secondo due configurazioni, inclusi tra lo strato di isolante e l'intonaco esterno "configurazione 1", o tra l'isolante e il laterizio, "configurazione 2". Lo studio è stato condotto

utilizzando queste due differenti stratigrafie, illustrate in Figura 3. 25, le quali sono state scelte per poter indagare, come e in quale misura, la posizione del PCM rispetto all'isolante incida sul comportamento termico della parete. In entrambi i casi lo strato di PCM è applicato sul lato esterno della parete e non comporta, quindi, variazioni del volume interno. C'è da premettere che, nel caso della configurazione 1, la presenza dell'isolante, interposto tra PCM e ambiente interno, fa sì che il trasferimento del calore latente accumulato dal PCM venga rilasciato preferenzialmente verso l'esterno, mentre, la configurazione 2 garantisce il trasferimento del calore latente immagazzinato in maggior quantità verso l'interno.

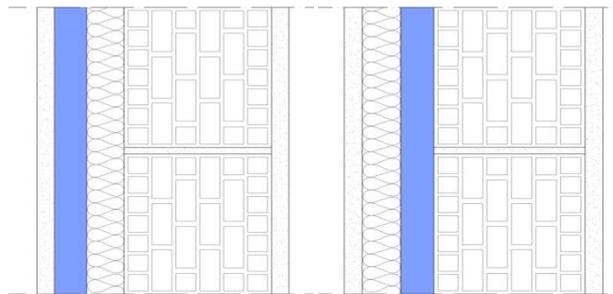


Figura 3. 25 - Stratigrafie della parete esterna contenente PCM: configurazione 1 (sinistra), configurazione 2 (destra)

Figura 3. 25. Per questa soluzione si è svolta un'ulteriore analisi energetica in funzione dell'esposizione della parete contenente PCM. Infatti, in questo caso, le prestazioni del materiale a cambiamento di fase sono fortemente influenzate da quelle che sono le condizioni climatiche esterne, quindi dalla temperatura dell'aria esterna ma soprattutto dalla radiazione solare globale che incide direttamente sulla superficie. Per tali ragioni ogni procedura di ottimizzazione è stata effettuata non solo variando di volta in volta la stratigrafia, ma anche l'esposizione. In particolare si riporta nelle Figura 3. 26a e b e Figura 3. 27 le configurazioni dell'involucro dell'unità abitativa con PCM integrato nelle pareti rispettivamente a Sud, Est ed Ovest. La superficie totale di queste pareti è pari a  $52.38 \text{ m}^2$  per cui lo spessore equivalente dello strato aggiunto, corrispondente a  $10\text{-}15\text{-}20 \text{ m}^3$  di PCM, è pari a  $0.191\text{-}0.286\text{-}0.382 \text{ m}$  rispettivamente.

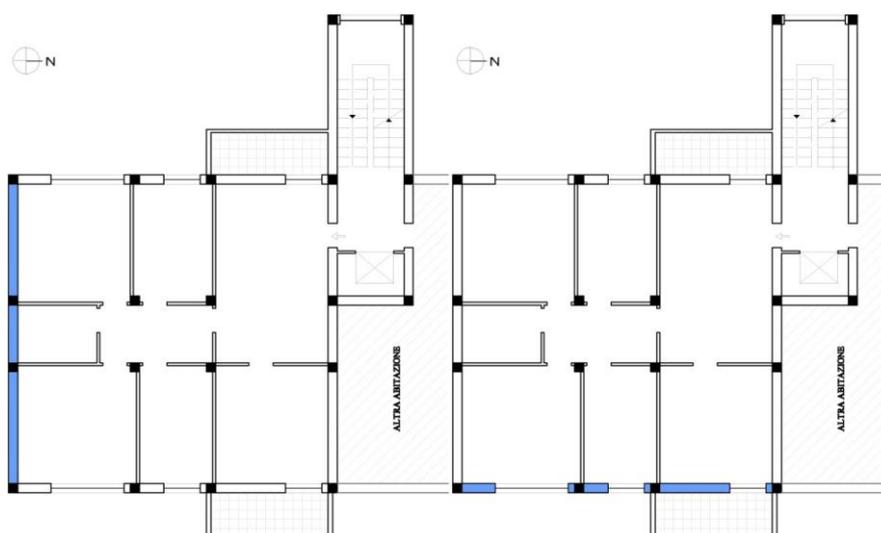


Figura 3. 26 - Individuazione delle pareti esterne esposte a Sud (a) ed Est (b) contenenti PCM

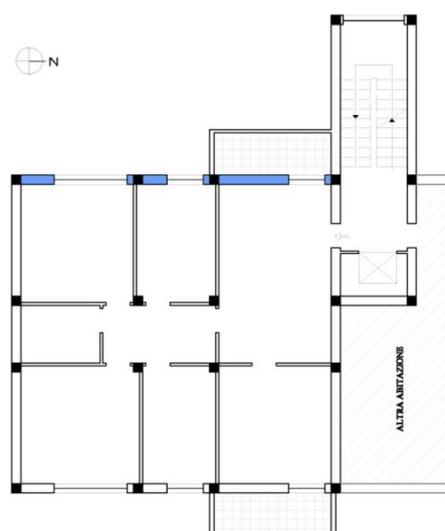


Figura 3. 27 - Individuazione delle pareti esterne esposte a Ovest contenenti PCM

### **3.4 Risultati**

L'analisi prevede la valutazione delle performances termiche delle pareti opache quando all'interno di esse viene posizionato uno strato di materiale composto da sale di Glauber. È stato, quindi, necessario ridefinire le stratigrafie degli elementi che devono accogliere il materiale a cambiamento di fase. Il materiale PCM utilizzato nel seguente lavoro è un sale idrato, più precisamente il Sale di Glauber ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ). Le principali proprietà del materiale sono riassunte in Tabella 3. 12.

Densità [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	<b>1458</b>
Calore Specifico [ $\text{kJ}/(\text{kg K})$ ]	<b>2.535</b>
Calore Latente [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]	<b>113</b>
Conducibilità [ $\text{W}/(\text{mK})$ ]	<b>0.554</b>

Tabella 3. 12 - Principali proprietà termiche del PCM utilizzato [65]

#### **3.4.1 Caso di riferimento**

Per poter meglio comprendere i benefici indotti dalla presenza di PCM, è stato necessario confrontare i risultati ottenuti con quelli della configurazione che è stata precedentemente definita "caso di riferimento", caratterizzata quindi dalla completa assenza di materiale a cambiamento di fase. Nella Tabella 3. 13 vengono riassunti i risultati relativi al fabbisogno energetico mensile delle tre città considerate nel caso di riferimento.

Mese	Fabbisogno energetico [kWh]		
	Cosenza	Roma	Milano
Gennaio	-1117.03	-1277.72	-2227.60
Febbraio	-771.54	-876.24	-1600.60
Marzo	-289.49	-393.76	-756.36
Aprile	8.05	-48.25	-139.69
Maggio	460.15	413.12	267.90
Giugno	1299.31	1091.24	862.06
Luglio	1780.47	1613.90	1388.29
Agosto	1594.90	1388.64	1026.85
Settembre	823.74	661.03	282.89
Ottobre	30.89	16.24	-183.68
Novembre	-240.56	-425.01	-1281.18
Dicembre	-946.24	-1147.20	-2084.02
<b>Fabbisogno invernale</b>	<b>-3364.86</b>	<b>-4168.19</b>	<b>-8273.14</b>
<b>Fabbisogno estivo</b>	<b>5997.52</b>	<b>5184.18</b>	<b>3827.99</b>

Tabella 3. 13 - Risultati relativi al fabbisogno energetico mensile delle tre città considerate nel caso di riferimento.

In tutte le città la maggior richiesta di energia in estate si ha nel mese di Luglio, mentre in inverno a Gennaio. È evidente che la richiesta energetica per il condizionamento estivo è maggiore a Cosenza, a seguire ci sono Roma e Milano; la situazione è completamente opposta per la stagione invernale. In particolare Roma appare essere la città che si frappone tra i due casi estremi rappresentati da Cosenza e Milano. Inoltre, si possono individuare le due stagioni di climatizzazione per le tre città attraverso il segno del fabbisogno termico mensile:

DURATA STAGIONI DI CLIMATIZZAZIONE	INVERNO	ESTATE
COSENZA	NOVEMBRE-MARZO	APRILE-OTTOBRE
ROMA	NOVEMBRE-APRILE	MAGGIO-OTTOBRE
MILANO	OTTOBRE-APRILE	MAGGIO-SETTEMBRE

Tabella 3. 14

### 3.4.2 Ottimizzazione delle performance termiche in funzione della PMT della soluzione con PCM integrato nelle partizioni interne

Una prima serie di simulazioni sono stati condotti per ricercare quella che è la temperatura di melting ottimale, ossia quella grazie alla quale è possibile sfruttare al meglio le proprietà dello stesso PCM, e quindi massimizzare la riduzione del fabbisogno di energia per la climatizzazione estiva o invernale. Lo studio è stato impostato variando sia la PMT, in un range di temperature tra 20 e 26 °C con uno step di 1 °C, sia la quantità di PCM (10, 15, 20 m<sup>3</sup>), ed è stato effettuato per tutte e tre le città e per entrambe le soluzioni di montaggio. Per una maggior comprensione dei risultati è stato opportuno distinguere il caso estivo da quello invernale, poiché esistono due diverse PMT: PMT ottima estiva e PMT ottima invernale.

### PMT Estiva

Di seguito vengono illustrati i grafici relativi alla riduzione percentuale della richiesta energetica nel caso estivo. Le Figura 3. 1 a e b si riferiscono alla città di Cosenza, le Figura 3. 29 a e b a quella di Roma ed infine le Figura 3. 30 a e b alla città di Milano.

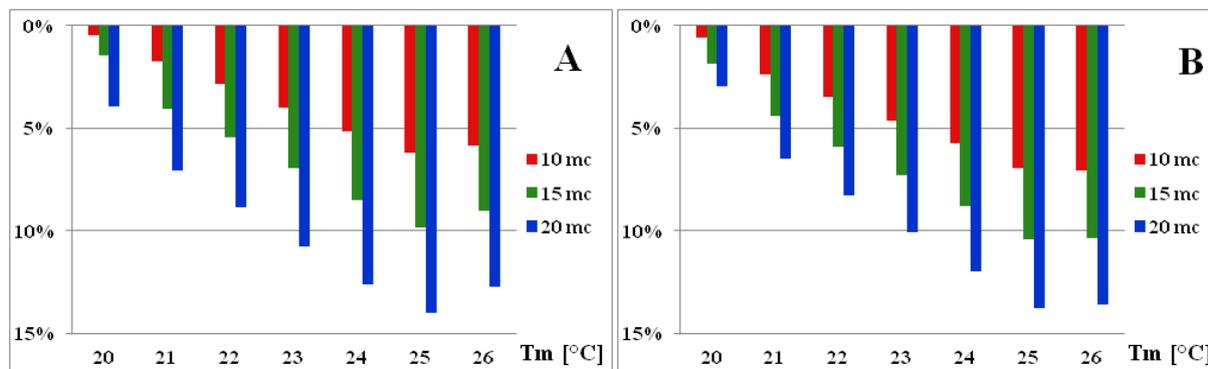


Figura 3. 28 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della PMT e della quantità di PCM: Caso studio Cosenza. A) montaggio nel solaio; B) montaggio nelle pareti interne.

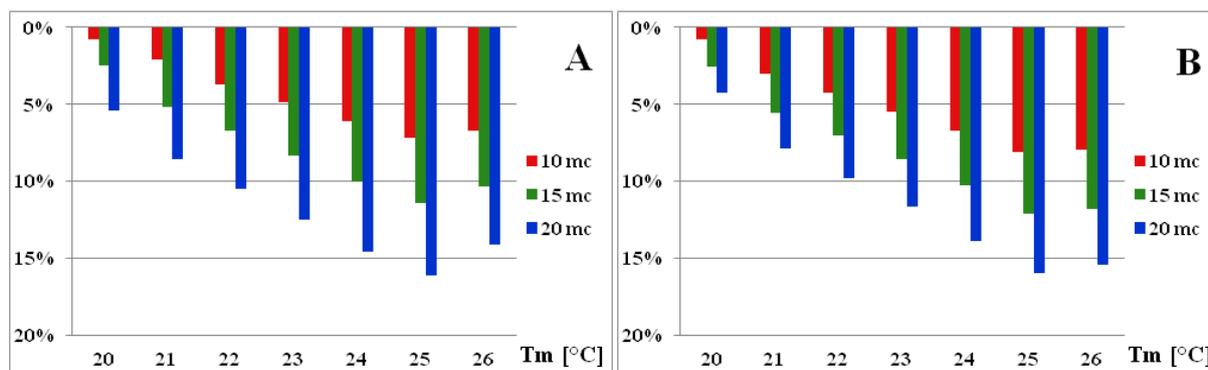


Figura 3. 29 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della PMT e della quantità di PCM: Caso studio Roma. A) montaggio nel solaio; B) montaggio nelle pareti interne.

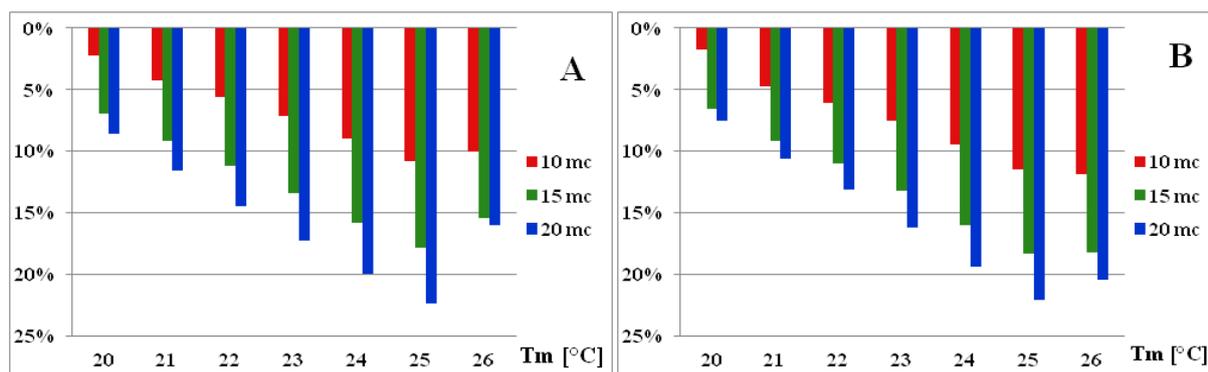


Figura 3. 30 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della PMT e della quantità di PCM: Caso studio Milano. A) montaggio nel solaio; B) montaggio nelle pareti interne.

Per tutte le città e quantità di PCM considerate, e per entrambe le soluzioni di montaggio, la PMT che consente di minimizzare i fabbisogni energetici per il condizionamento estivo corrisponde a 25 °C. Nei due casi in cui la PMT ottima è 26 °C, ossia quando si usano 10 m<sup>3</sup> di PCM integrati nelle partizioni verticali interne a Cosenza e a Milano, la differenza percentuale del fabbisogno termico, rispetto al caso che prevede una PMT di 25 °C, è pari allo 0.4 %. È importante osservare come i valori delle riduzioni seguano un andamento a campana: essi assumono i valori più alti intorno alla

temperatura di comfort ( $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), con picco in corrispondenza della PMT ottima, e si riducono man mano che si allontanano da questo valore. Per i casi analizzati, le riduzioni ottenute risultano quasi uguali per le due configurazioni considerate. La soluzione ottima, considerando  $20\text{ m}^3$  di PCM, comporta una riduzione del 14 % a Cosenza, del 16.1 % a Roma e del 22.4 % a Milano. Nella Tabella 3. 15 viene presentato un riepilogo delle PMT ottime estive al variare del montaggio e della quantità di PCM per tutte e tre le città, nella Tabella 3. 16 vengono, invece, riportati le riduzioni percentuali del fabbisogno energetico connesse conseguenti ad ogni PMT. Come già detto, la PMT ottima estiva risulta  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  quasi in tutti i casi, mentre la riduzione percentuale del fabbisogno è fortemente dipendente dalla quantità di PCM utilizzata e dalla località e meno dalla soluzione di montaggio.

	Cosenza		Roma		Milano	
	solaio	pvi	solaio	pvi	solaio	pvi
10	25	26	25	25	25	26
15	25	25	25	25	25	25
20	25	25	25	25	25	25

Tabella 3. 15 - Valori della PMT ottima estiva al variare del montaggio e della quantità di PCM

	Cosenza		Roma		Milano	
	solaio	pvi	solaio	pvi	solaio	pvi
10	6.2%	7.1%	7.2%	8.1%	10.8%	11.9%
15	9.8%	10.4%	11.4%	12.1%	17.9%	18.3%
20	14.0%	13.8%	16.1%	16.0%	22.4%	22.1%

Tabella 3. 16 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare del montaggio e della quantità di PCM

### PMT invernale

Di seguito vengono illustrati i grafici relativi alla riduzione percentuale della richiesta energetica nel caso invernale. Le Figura 3. 31 a e b si riferiscono alla città di Cosenza, le Figura 3. 32 a e b a quella di Roma ed infine le Figura 3. 33 a e b alla città di Milano.

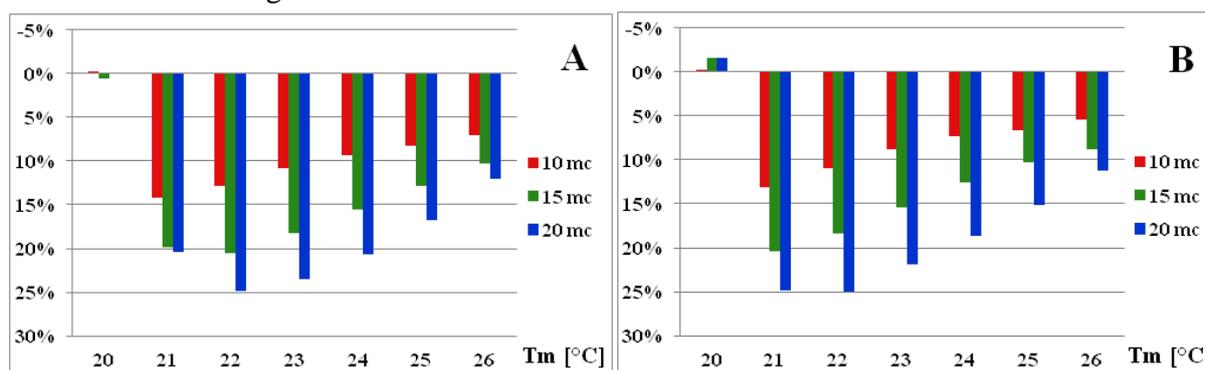


Figura 3. 31 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della PMT e della quantità di PCM: Caso studio Cosenza. A) montaggio nel solaio; B) montaggio nelle pareti interne.

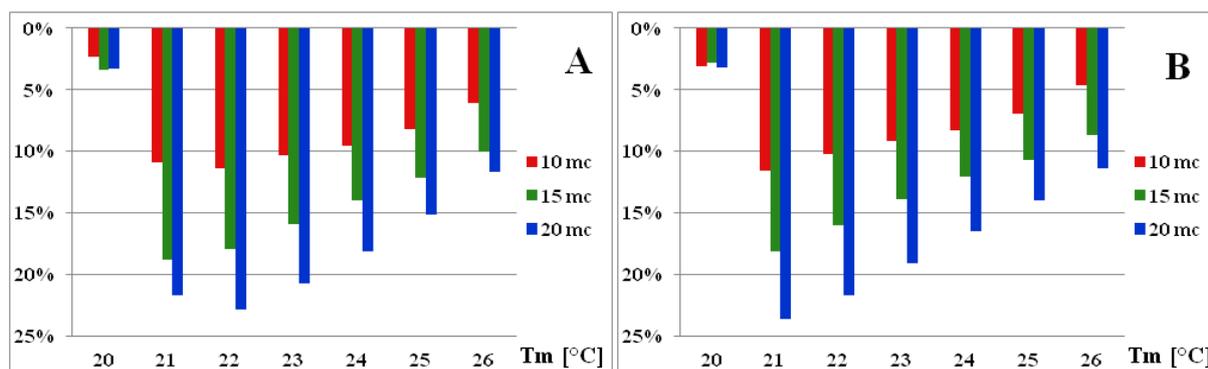


Figura 3.32 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della PMT e della quantità di PCM: Caso studio Roma. A) montaggio nel solaio; B) montaggio nelle pareti interne.

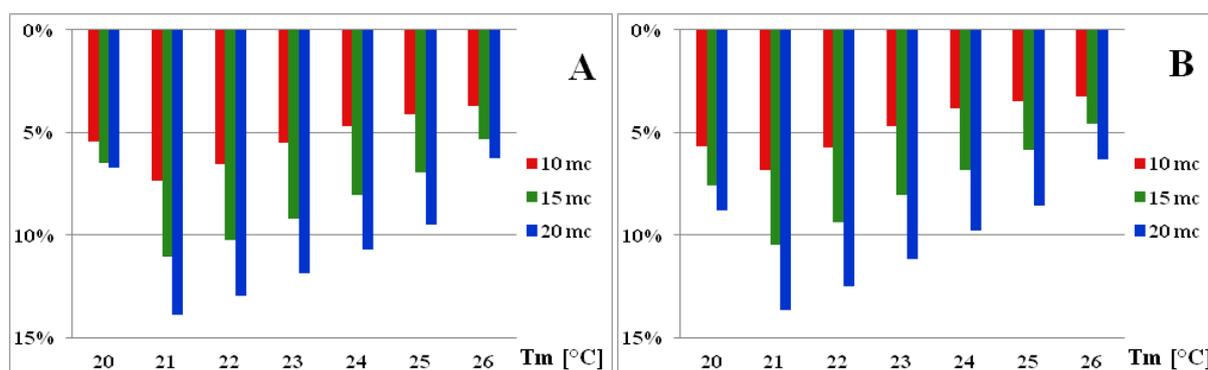


Figura 3.33 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della PMT e della quantità di PCM: Caso studio Milano. A) montaggio nel solaio; B) montaggio nelle pareti interne.

Nella maggior parte dei casi la PMT ottima, che riduce la richiesta di energia per il riscaldamento, assume i valori di 21 °C e 22 °C, come si vede pure nella Tabella 3. 17; la non univocità del risultato dipende sia dalla quantità di PCM integrato, sia dalla tipologia di integrazione del PCM e sia dalla località. I risultati seguono un andamento simile al caso estivo, ma in questo caso il miglior risultato ottenibile comporta una riduzione di fabbisogno di energia del 25 % a Cosenza, 23.6 % a Roma e 13.9 % a Milano. Le riduzioni percentuali della richiesta energetica ottenute nei diversi casi sono riassunti nella Tabella 3. 18.

	Cosenza		Roma		Milano	
	solaio	pvi	solaio	pvi	solaio	pvi
<b>10</b>	21	21	22	21	21	21
<b>15</b>	22	21	21	21	21	21
<b>20</b>	22	22	22	21	21	21

Tabella 3.17 - Valori della PMT ottima invernale al variare del montaggio e della quantità di PCM

	Cosenza		Roma		Milano	
	solaio	pvi	solaio	pvi	solaio	pvi
<b>10</b>	14.3%	13.1%	11.4%	11.6%	7.4%	6.9%
<b>15</b>	20.6%	20.3%	18.8%	18.1%	11.1%	10.5%
<b>20</b>	24.8%	25.0%	22.9%	23.6%	13.9%	13.7%

Tabella 3.18 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare del montaggio e della quantità di PCM

### Comportamento annuale

Durante l'arco annuale il PCM è soggetto in funzione delle proprie caratteristiche termofisiche a differenti cicli di fusione e solidificazione. È possibile identificare tre differenti periodi:

- Uncharged Period (UP), durante il quale l'andamento della temperatura superficiale del solaio è sempre al di sotto della PMT e si suddivide in tre sottoperiodi:
  - Increasing Mean Value UP (IMV UP), durante il quale il valor medio delle oscillazioni tende a crescere avvicinandosi alla T di melting del PCM;
  - Constant Mean Value UP (CMV UP), durante il quale il valor medio delle oscillazioni rimane costante;
  - Decreasing Mean Value UP (DMV UP), durante il quale il valor medio delle oscillazioni tende a crescere allontanandosi dalla T di melting del PCM;
- Charged Period (CP), caratterizzato da fluttuazioni di temperatura superficiale della parete contenente il PCM che sono sempre al di sopra della PMT e quindi il materiale si mantiene sempre in fase liquida; esso si compone di 3 sottoperiodi:
  - Increasing Mean Value CP (IMV CP), durante il quale il valor medio delle oscillazioni tende a crescere allontanandosi dalla T di melting del PCM;
  - Constant Mean Value CP (CMV CP), durante il quale il valor medio delle oscillazioni rimane costante;
  - Decreasing Mean Value CP (DMV CP), durante il quale il valor medio delle oscillazioni tende a crescere tendendo alla T di melting del PCM;
- Charge-Discharge Period (CDP), caratterizzato da un andamento che oscilla intorno alla PMT e che, quindi, consente al PCM di assorbire e cedere il calore latente in modo periodico.

Per quanto riguarda il contributo di calore latente del PCM questo si ha solo nel Charge-Discharge Period, durante il quale si registrano le riduzioni di richiesta energetica.

Nella Figura 3. 34 sono individuati i periodi sopra descritti attraverso la simulazione annuale della temperatura superficiale interna del solaio della zona P (linea rossa) e la temperatura superficiale dello strato di PCM (linea blu) per una quantità di 15 m<sup>3</sup> per la città di Roma quando la PMT è pari a quella ottima estiva.



Figura 3. 34 - simulazione annuale della temperatura superficiale del PCM (linea blu) e del solaio (linea rossa)

Come precedentemente osservato, la temperatura di melting è un parametro che influenza in maniera rilevante le performance termiche del PCM quando viene usato in ambito residenziale. Per poter capire il motivo per il quale variando la PMT si predilige una stagione piuttosto che l'altra, si è condotto uno studio parametrico, in funzione della PMT, del comportamento termico annuale del PCM (Figura 3. 35) e, quindi, dei periodi prima definiti (Tabella 3. 19) per il caso in cui vengono posizionati 15 m<sup>3</sup> di PCM nel solaio, scegliendo Roma come città di riferimento.

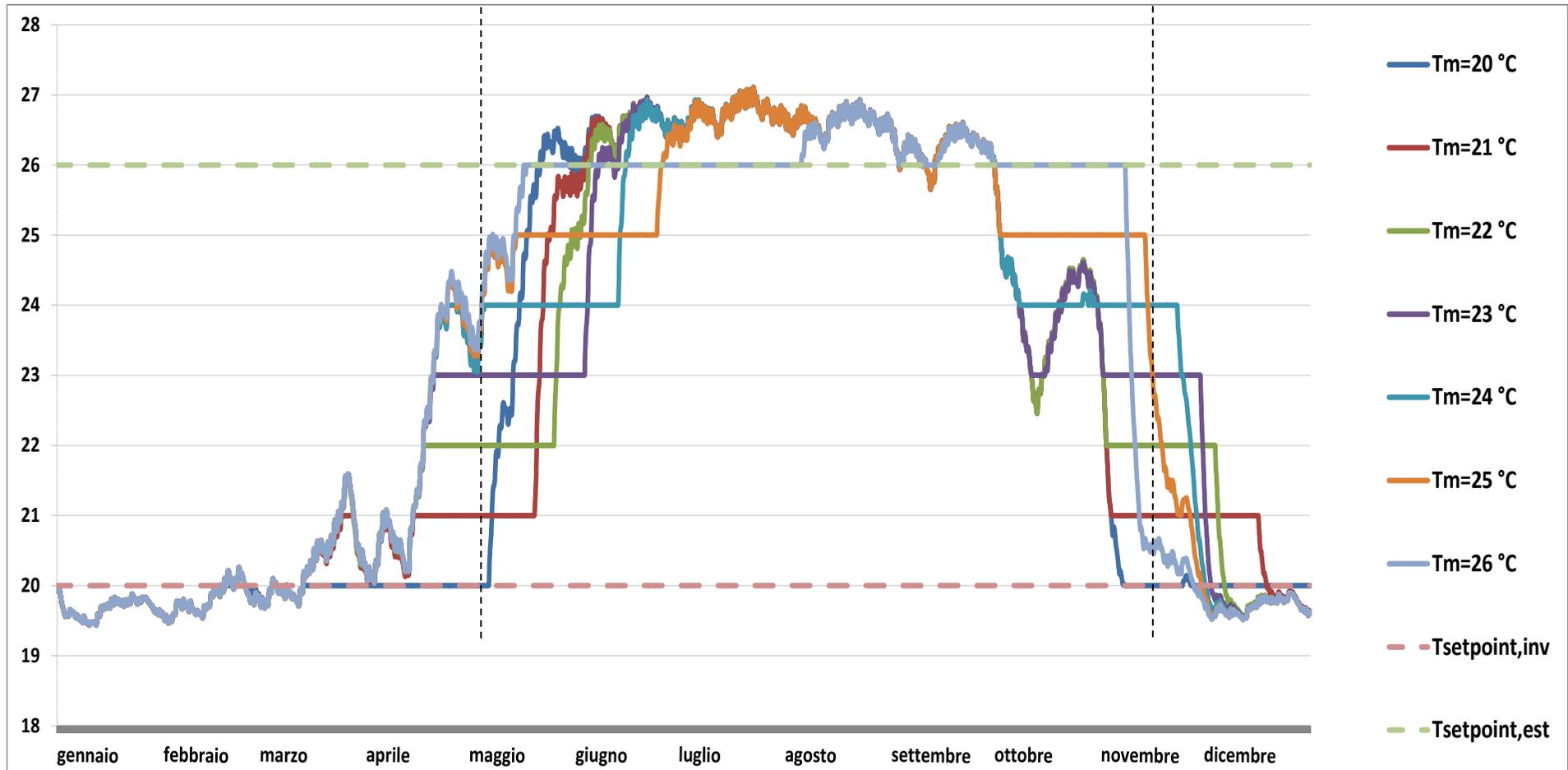


Figura 3. 35 - Simulazione annuale su base oraria della temperatura superficiale del PCM al variare della PMT

PERIODI		DURATA [h]													
		$T_m=20\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_m=21\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_m=22\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_m=23\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_m=24\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_m=25\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_m=26\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Uncharged Period	IMV	0		118		127		191		549		747		834	
	CMV	1515	<b>1515</b>	2569	<b>2882</b>	2898	<b>3236</b>	3129	<b>3543</b>	3124	<b>3911</b>	3134	<b>4414</b>	3187	<b>4576</b>
	DMV	0		195		211		223		238		533		555	
Charge-Discharge Period		2802	<b>2802</b>	1912	<b>1912</b>	1656	<b>1656</b>	1927	<b>1927</b>	2030	<b>2030</b>	2122	<b>2122</b>	2907	<b>2907</b>
Charged Period	IMV	422		655		306		253		201		114		344	
	CMV	3087	<b>4443</b>	2803	<b>3966</b>	2750	<b>3868</b>	2570	<b>3290</b>	2422	<b>2819</b>	2050	<b>2224</b>	520	<b>1277</b>
	DMV	934		508		812		467		196		60		413	

Tabella 3. 19 - durata periodi al variare della temperatura di melting

La Figura 3. 35 mostra:

- gli andamenti della temperatura dello strato di PCM al variare della PMT;
- la banda, delimitata inferiormente dalla temperatura di set point invernale e superiormente dalla temperatura di set point estiva, entro la quale la temperatura è nel range di comfort e quindi non si necessita dell'azione dell'impianto di climatizzazione;
- delle linee verticali che consentono di delimitare le due stagioni di climatizzazione, che per la città di Roma sono rappresentate dal periodo Novembre-Aprile per l'inverno e dal periodo Maggio-Ottobre per l'estate.

Questi andamenti possono essere utilizzati per individuare le PMT ottime per ogni stagione di climatizzazione. In effetti basta valutare, per ogni stagione di climatizzazione, per quale PMT il CDP dura di più. Per quanto concerne la stagione invernale una PMT di 21 °C, andamento in rosso nella Figura 3. 35 consente di avere la maggiore durata della linea orizzontale (CDP); seguono la linea orizzontale verde (PMT= 22 °C), viola (PMT= 23 °C) e poi l'azzurra (PMT= 24 °C). Invece la PMT che consente di massimizzare la durata del CDP nella stagione estiva è pari a 25 °C (linea arancione). In queste considerazioni il comportamento termico del PCM per una PMT pari alle temperature di set point non è stato considerato poiché in questi due casi limite, 20 e 26 °C, il CDP non è sempre indice di un effetto benefico. In realtà è proprio per una PMT pari alla relativa temperatura di set point della stagione considerata che si hanno più cicli di carica e scarica, ma questo non è sufficiente per poter concludere che per questi valori si raggiunge l'ottimo per le due stagioni di climatizzazione. Infatti il carico termico da asportare o da fornire relativamente alla parete in questione è quantificabile attraverso la differenza di temperatura tra quella della superficie più interna dello strato e quella dell'aria interna. Quindi, se il CDP ha la durata maggiore per una PMT pari a quella di set point, per più tempo la temperatura della superficie più interna potrebbe uscire dalla banda di comfort dato che questa è di tipo fluttuante. Dalla Tabella 3. 19 in cui vengono riportate le durate % in un anno di tutti i periodi caratterizzanti il comportamento annuale del PCM, si nota come, aumentando la temperatura di melting, si ha un incremento dell'UP dal 17.3 % al 52.2 % (Figura 3. 36) mentre il CP diminuisce dal 50.7 % al 14.6 % (Figura 3. 37), passando da 20 °C a 26 °C.

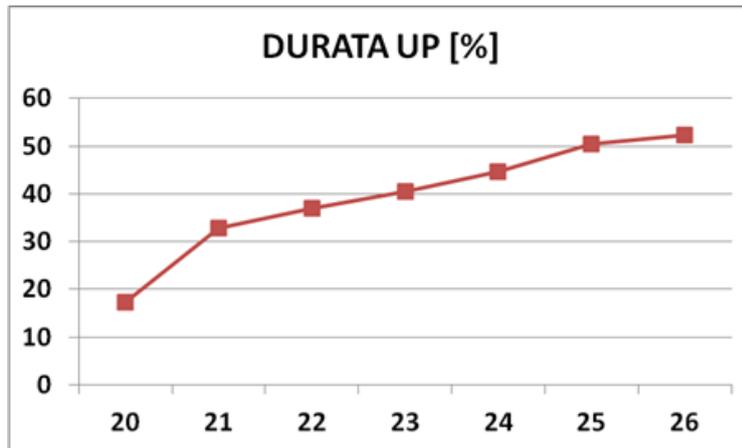


Figura 3. 36 - andamento della durata dell'UP in funzione della PMT

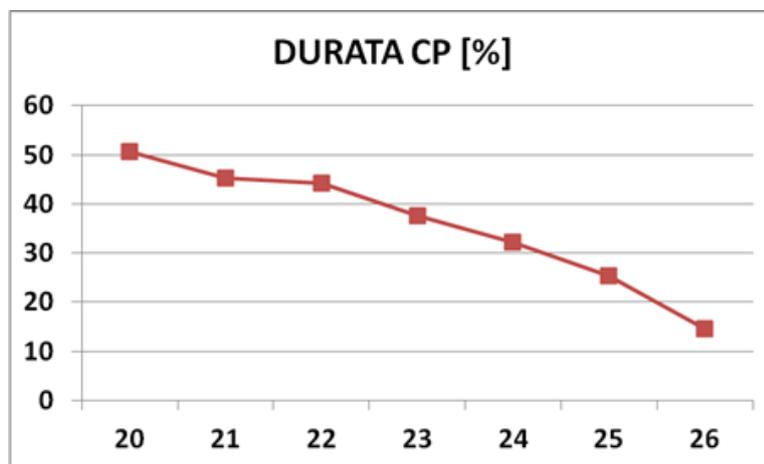


Figura 3. 37 - andamento della durata del CP in funzione della PMT

Da questo si deduce come il periodo in cui il PCM si trova nello stato solido, cresca a discapito di quello in cui il materiale è nella fase liquida. Il CDP (Figura 3. 38) invece non ha un andamento monotono, infatti presenta una durata minima per una PMT di 22 °C, costituisce solo il 19 % circa dell'intera durata di un anno (Tabella 3. 20), e aumenta variando di qualche grado la PMT fino a valori massimi di 32 % e 33.2 % per una PMT pari alla temperatura di set point invernale ed estiva rispettivamente.

PERIODI		DURATA [%]													
		$T_m=20\text{ °C}$		$T_m=21\text{ °C}$		$T_m=22\text{ °C}$		$T_m=23\text{ °C}$		$T_m=24\text{ °C}$		$T_m=25\text{ °C}$		$T_m=26\text{ °C}$	
Uncharged Period	IMV	0.0		1.3		1.4		2.2		6.3		8.5		9.5	
	CMV	17.3	<b>17.3</b>	29.3	<b>32.9</b>	33.1	<b>36.9</b>	35.7	<b>40.4</b>	35.7	<b>44.6</b>	35.8	<b>50.4</b>	36.4	<b>52.2</b>
	DMV	0.0		2.2		2.4		2.5		2.7		6.1		6.3	
Charge-Discharge Period		32.0	<b>32.0</b>	21.8	<b>21.8</b>	18.9	<b>18.9</b>	22.0	<b>22.0</b>	23.2	<b>23.2</b>	24.2	<b>24.2</b>	33.2	<b>33.2</b>
Charged Period	IMV	4.8		7.5		3.5		2.9		2.3		1.3		3.9	
	CMV	35.2	<b>50.7</b>	32.0	<b>45.3</b>	31.4	<b>44.2</b>	29.3	<b>37.6</b>	27.6	<b>32.2</b>	23.4	<b>25.4</b>	5.9	<b>14.6</b>
	DMV	10.7		5.8		9.3		5.3		2.2		0.7		4.7	

Tabella 3. 20 - durata in percentuale dei periodi al variare della temperatura di melting

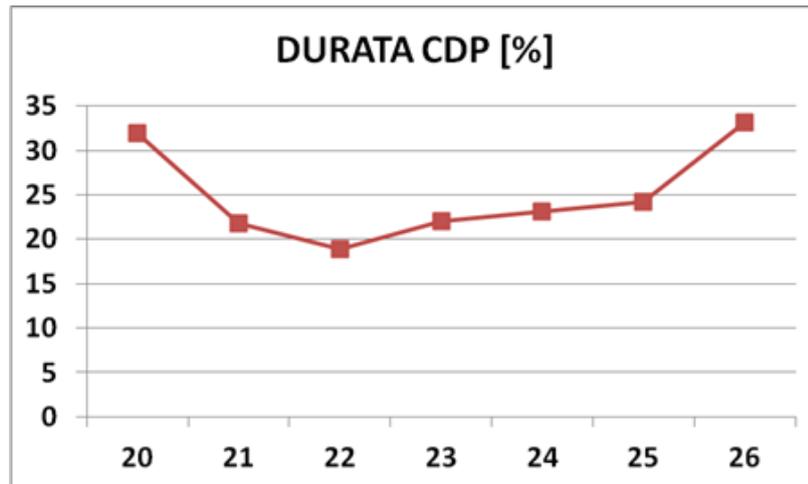


Figura 3.38 - andamento della durata del CDP in funzione della PMT

### 3.4.3 PCM integrato in partizioni interne

La prima analisi riguarda la valutazione della riduzione dei fabbisogni mensili indotta dall'utilizzo di materiale a cambiamento di fase al variare della quantità. L'analisi è stata effettuata per tutte e tre le città mantenendo fisse sia la soluzione di montaggio (PCM integrato nel solaio), dato che le performance termiche sono le stesse, che la temperatura di melting (PMT ottima estiva: 25 °C). Per poter cogliere l'influenza della presenza del PCM, i risultati, riassunti nei grafici nelle Figura 3.39, Figura 3.40 e Figura 3.41, sono messi a confronto con la soluzione del caso di riferimento.

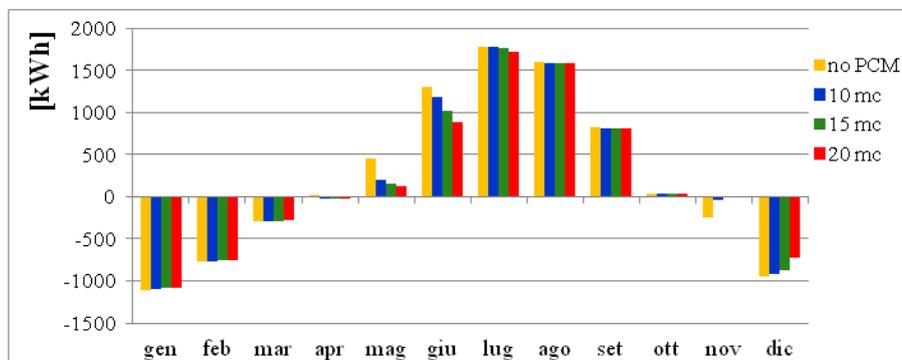


Figura 3.39 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare della quantità di PCM. Caso studio Cosenza

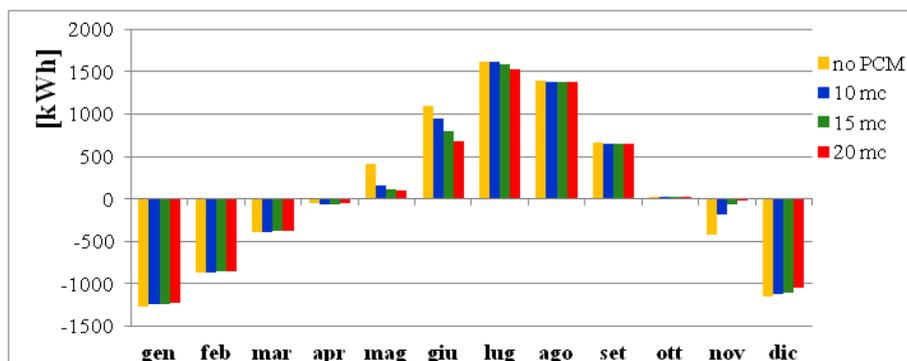


Figura 3.40 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare della quantità di PCM. Caso studio Roma

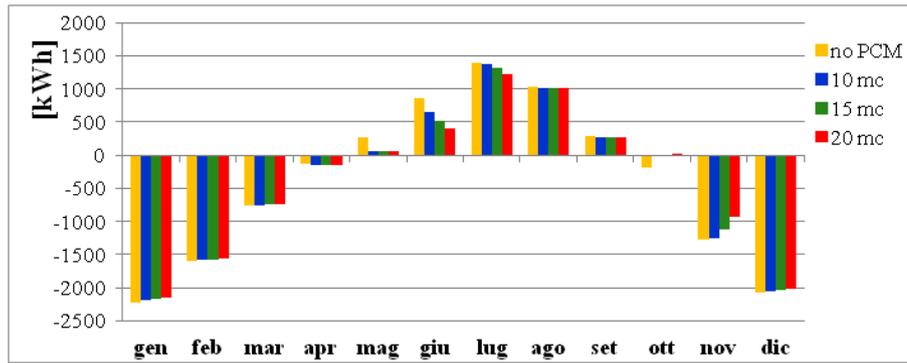


Figura 3. 41 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare della quantità di PCM. Caso studio Milano

Come ci si aspettava, la PMT ottima scelta massimizza le performance nella stagione estiva, riducendo così la necessità di raffrescare l'ambiente, rispetto alle performance delle stesse nella stagione invernale; questo perché in inverno il contributo latente del PCM non si attiva. Le riduzioni maggiori si hanno nei mesi intermedi (Maggio, Giugno, Luglio, Ottobre e Novembre), poiché in questi periodi le temperature superficiali interne oscillano intorno alla PMT ottima e quindi il PCM si carica e si scarica. Nei restanti mesi dell'anno il PCM non riesce a cambiare fase poiché si trova sempre in fase liquida (Agosto, Settembre) o in fase solida (Dicembre-Aprile) e le piccole riduzioni del fabbisogno sono dovuti essenzialmente all'accumulo di tipo sensibile da parte del PCM. In particolare si nota che nei mesi di Maggio e Ottobre, per tutte e tre le città, sia sufficiente la minima quantità di PCM per abbattere quasi del tutto la necessità di raffrescare l'ambiente. In generale, comunque, l'aumento della quantità di PCM induce una riduzione della richiesta energetica.

#### 3.4.4 Performance annuali del PCM integrato nelle partizioni interne e attenuazione-sfasamento dei carichi

La seconda analisi è stata effettuata per valutare l'incidenza dell'aumento della quantità di PCM sul comportamento annuale dello stesso. Il caso esaminato, di cui vengono riportati i risultati nella Tabella 3. 21 che riporta la durata dei periodi definiti in precedenza, è quello per cui il PCM viene integrato nel solaio con una PMT di 25 °C nella città di Roma incrementando di volta in volta il volume. È immediato constatare, anche attraverso l'aiuto le Figura 3. 42, Figura 3. 43 e Figura 3. 44, che aumentando la quantità cresce anche la durata del CDP, a discapito degli altri periodi, tra i quali il CP si riduce proporzionalmente di più; a questo corrisponde un miglioramento delle performance termiche estive. Raddoppiando il volume di PCM, la durata del CDP aumenta del 50 %.

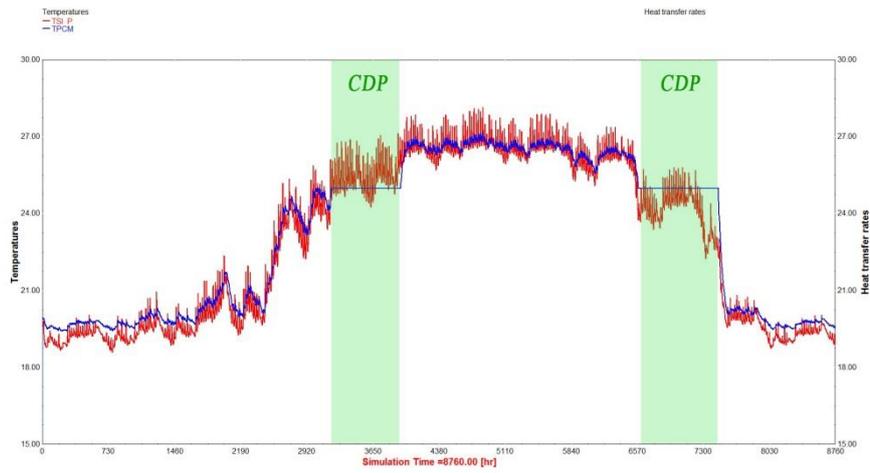


Figura 3. 42 - simulazione annuale della temperatura superficiale del PCM: 10 m3 di PCM integrati nel solaio

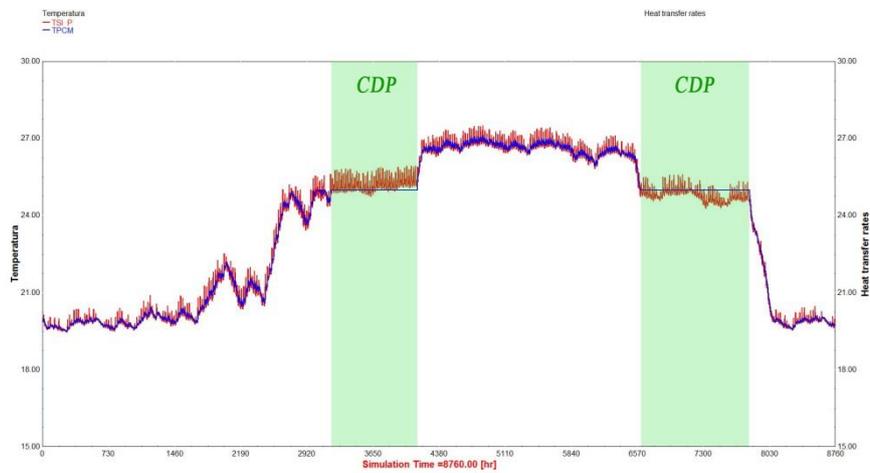


Figura 3. 43 - simulazione annuale della temperatura superficiale del PCM: 15 m3 di PCM integrati nel solaio



Figura 3. 44 - simulazione annuale della temperatura superficiale del PCM: 20 m3 di PCM integrati nel solaio

Roma, $T_m=25^\circ\text{C}$ , PCM nel solaio							
PERIODI		DURATA [h]					
		$10\text{ m}^3$		$15\text{ m}^3$		$20\text{ m}^3$	
uncharged period	IMV	755		760		765	
	CMV	3630	4502	3147	4354	3129	4147
	DMV	117		447		253	
charge-discharge period	CDP	1643	1643	2026	2026	2476	2476
charged period	IMV	100		85		163	
	CMV	2430	2615	2258	2380	1911	2137
	DMV	85		37		63	

Tabella 3. 21 - durata dei periodi al variare della quantità di PCM

Confrontando le figure precedenti, si osserva una piccolissima differenza tra i benefici ottenuti con una soluzione piuttosto che con l'altra in quanto la quantità di PCM utilizzato rimane invariata nei due casi. L'unica variazione risiede nello spessore dello strato aggiunto; ad esempio, integrando  $10\text{ m}^3$  di PCM nel solaio, lo spessore che se ne ricava è pari a 10.2 cm mentre per le pareti interne risulta essere 5.2 cm, e questo è dovuto al fatto che la superficie utile delle pareti verticali è quasi il doppio di quella del solaio. Anche lo studio della durata dei periodi finora descritti conferma che tra le due soluzioni di montaggio non esistono particolari differenze, in quanto si tratta in ogni caso di pareti interne e che quindi non direttamente influenzate dalle variazioni delle condizioni climatiche esterne, in particolare dalla radiazione solare. Come si vede in Tabella 3. 22 la durata dei periodi (a Roma con  $15\text{ m}^3$  di PCM con una  $T_m=15^\circ\text{C}$ ) sono pressoché paragonabili; le differenze sono dovute alla diversa adiacenza con altre zone, esposte diversamente e, quindi, con carichi termici diversi.

Roma, $15\text{ m}^3$ , $T_m=25^\circ\text{C}$					
PERIODI		DURATA [h]			
		solaio		pareti verticali	
uncharged period	IMV	760		744	
	CMV	3147	4354	3177	4554
	DMV	447		633	
charge-discharge period		2026	2026	1489	1489
charged period	IMV	85		158	
	CMV	2258	2380	2496	2717
	DMV	37		63	

Tabella 3. 22 - durata dei periodi al variare della soluzione di montaggio

### Attenuazione e sfasamento

Per esplicitare meglio i vantaggi che questi materiali consentono di ottenere si è simulata una giornata tipica di una stagione intermedia, proprio nel periodo in cui il PCM in questa configurazione fornisce le maggiori performance termiche. In particolare, per capire come il PCM integrato nelle partizioni interne (in questo caso nel solaio) interviene anche sull'inerzia termica delle pareti esterne per abbattere i carichi, si è condotto un confronto giornaliero (16 Giugno a Roma) tra le variabili climatiche esterne e interne, scegliendo come grandezza rappresentativa dell'ambiente interno la temperatura superficiale interna della parete esterna esposta a Ovest della zona climatica P al variare della quantità di PCM. In Figura 3. 45 vengono mostrati gli andamenti della radiazione solare globale che incide sulla parete esterna in esame  $Q_s$ ,

della temperatura dell'aria esterna  $T_{ae}$  e della temperatura aria-Sole  $T_{a,s}$ , che è una grandezza rappresentativa di entrambe le variabili termiche esterne ed è definita come:

$$T_{a,s} = T_{a,e} + \frac{Q_s}{h_{se}}$$

Dove  $h_{se}$  è l'adduttanza superficiale esterna posta pari a  $25.35 \frac{W}{m^2 K}$ .

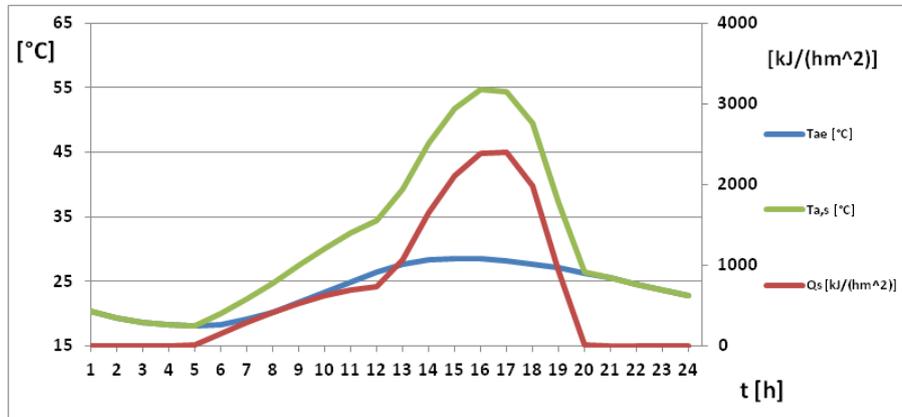


Figura 3. 45 - Andamento della radiazione solare globale  $Q_s$ , della temperatura dell'aria esterna  $T_{ae}$  e della temperatura aria-Sole  $T_{a,s}$  caratteristiche della città di Roma per la parete esposta a Ovest della zona P.

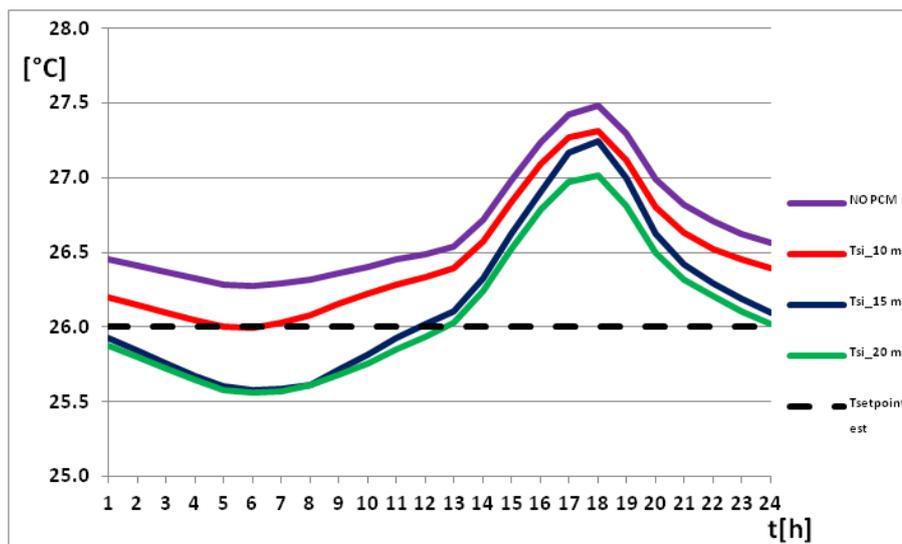


Figura 3. 46 - Confronto tra gli andamenti della temperatura superficiale interna del muro esterno esposto a Ovest, della zona P, nella città di Roma il 16 Giugno nel caso in cui il PCM è montato nel solaio al variare della quantità di PCM integrato

Come si può vedere in Figura 3. 46, il picco della temperatura superficiale della parete esterna viene sempre più attenuato all'aumentare della quantità di PCM. In particolare si ha un'attenuazione del picco massimo e minimo rispettivamente di circa  $0.5^\circ\text{C}$  e  $0.7^\circ\text{C}$ , integrando  $20 \text{ m}^3$  di PCM, rispetto al caso di riferimento. Un altro importante effetto è la riduzione del numero di ore in cui la temperatura della parete è maggiore di  $26^\circ\text{C}$ : sono sufficienti  $15 \text{ m}^3$  di materiale a cambiamento di fase per far sì che la temperatura di superficie scenda al di sotto della temperatura di set point per una durata di circa 12 ore, a questo corrisponde una riduzione dell'area sottesa alle curve e quindi una riduzione del fabbisogno giornaliero.

### 3.4.5 Ottimizzazione delle performance termiche in funzione della PMT della soluzione con PCM integrato nelle pareti esterne

#### Pareti Sud

In questo paragrafo verrà illustrata l'analisi di ottimizzazione della temperatura di melting (PMT) nel caso in cui il PCM viene integrato nelle pareti esposte a Sud (vedi Figura 3. 47). Lo studio è stato impostato variando sia la PMT, in un range di temperature tra 15-25 °C con uno step di 1 °C, sia la quantità di PCM (10, 15, 20 m<sup>3</sup>), ed è stato effettuato per tutte e tre le città e per entrambe le configurazioni.

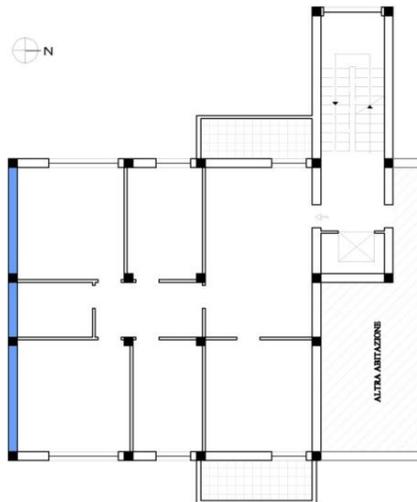


Figura 3. 47 - Individuazione delle pareti esterne esposte a Sud contenenti PCM

#### PMT estiva

Di seguito vengono illustrati i grafici relativi alla riduzione percentuale della richiesta energetica nel caso estivo (Figura 3. 48, Figura 3. 49, Figura 3. 50 ) per le località considerate: la graduazione di rosso si riferisce alla configurazione 1, mentre quella blu alla configurazione 2.

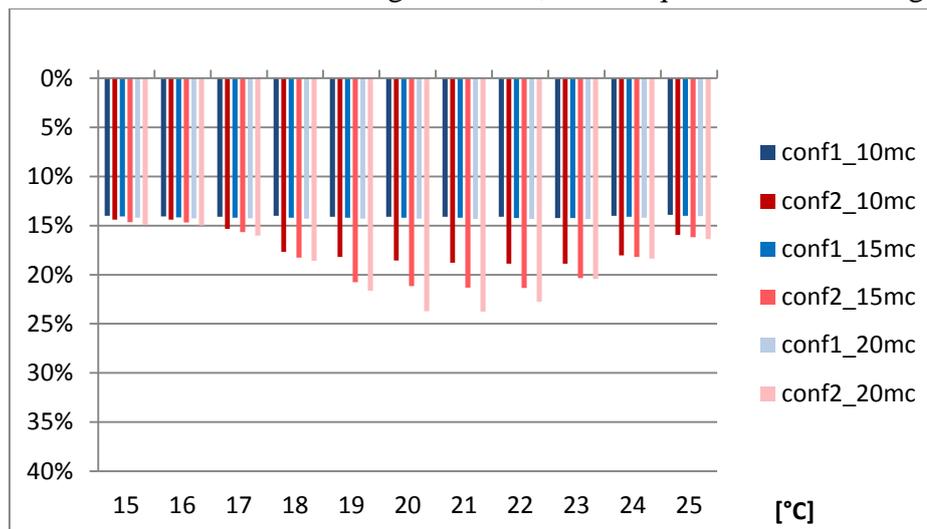


Figura 3. 48 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Cosenza.

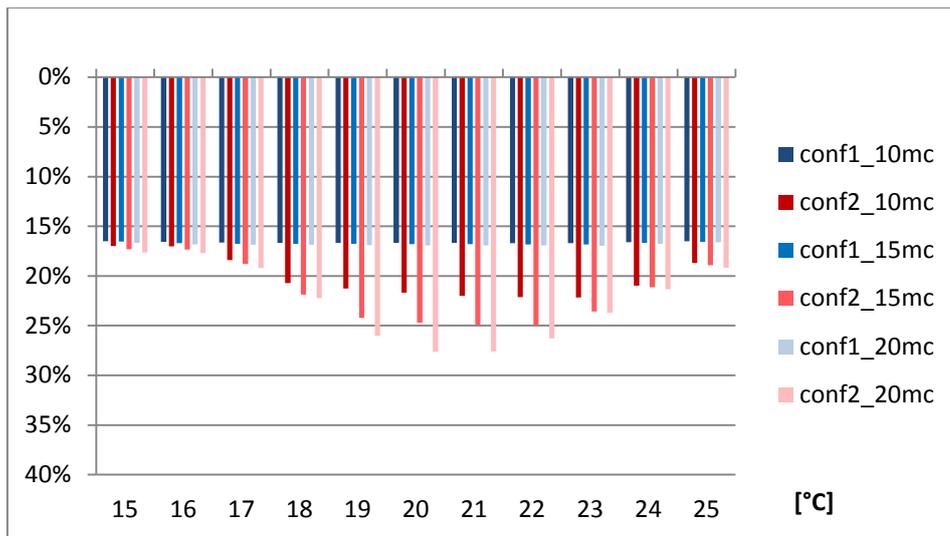


Figura 3. 49 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Roma.

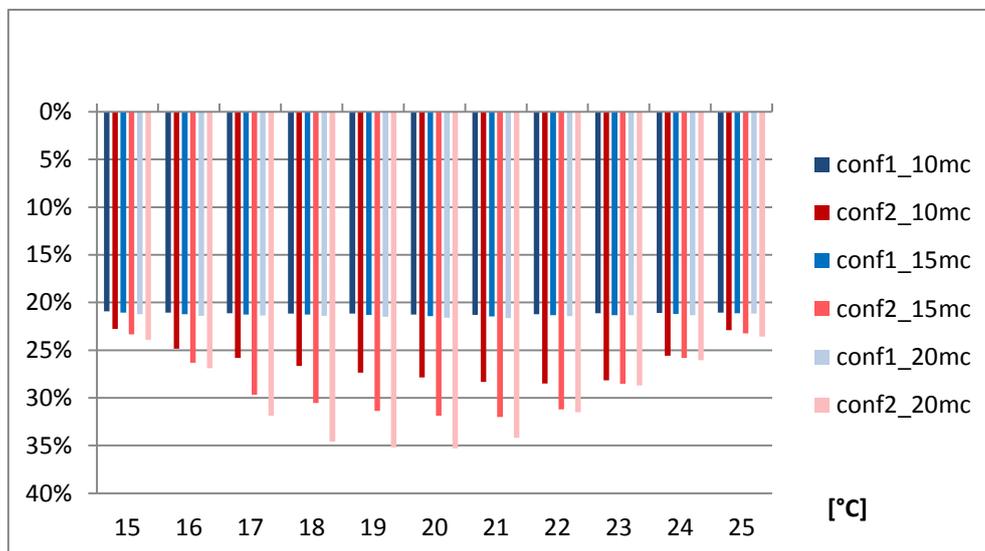


Figura 3. 50 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Milano.

Se focalizziamo l'attenzione sui risultati concernenti la configurazione 1, si nota che sono indipendenti dalla temperatura di melting e dalla quantità di PCM. Tale andamento è indice del fatto che le riduzioni che comunque si registrano (14 % a Cosenza, 16 % a Roma e 21 % a Milano) siano da imputare esclusivamente all'aumento dell'inerzia termica della parete stessa. Infatti, lo strato di intonaco esterno non è in grado di smorzare le fluttuazioni esterne in modo da poter innescare un numero apprezzabile di cicli di carica-scarica nello strato di PCM, che è posto immediatamente a valle. Così succede che le brusche variazioni del flusso termico conduttivo complessivo che si trasferisce dallo strato di intonaco esterno allo strato di PCM, consentono, sì, di far avvenire il passaggio di fase, ma per un limitatissimo periodo di tempo. In merito alla seconda configurazione, quella in cui lo strato di PCM è collocato a ridosso dell'isolante sul lato interno, i risultati seguono un andamento a campana, al variare della PMT, che si accentua man mano che aumenta la quantità di PCM. Infatti, con 20 m<sup>3</sup> di PCM, una piccola variazione dalla PMT ottima comporta una più elevata variazione della riduzione del fabbisogno. Le due

configurazioni portano quasi allo stesso risultato se la PMT scelta è distante da quella ottima per la configurazione 2; avvicinandosi alla PMT ottima, la configurazione 2 consente di raggiungere guadagni energetici molto più consistenti. A differenza del caso in cui il PCM viene integrato nelle partizioni interne qui, non è possibile individuare un unico valore di PMT ottima estiva bensì, l'ottimo comprende un range di temperature per le quali si ottengono pressoché gli stessi risultati. Per le città di Cosenza e Roma si ha una riduzione circa del 23 % e 27 % rispettivamente per temperature di 20, 21 e 22 °C, mentre a Milano i risultati mostrano un risparmio intorno al 35 % per PMT comprese tra 18 e 21 °C. I migliori risultati qui espressi si riferiscono al caso di 20 m<sup>3</sup> di PCM.

### PMT invernale

Di seguito vengono illustrati i grafici relativi alla riduzione percentuale della richiesta energetica nel caso invernale per ogni città oggetto di studio (Figura 3. 51, Figura 3. 52, Figura 3. 53)

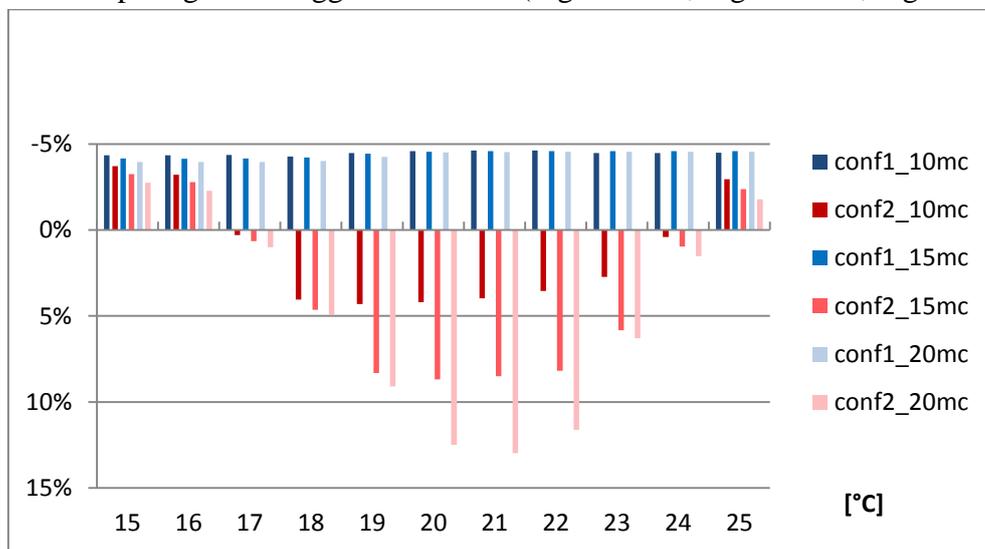


Figura 3. 51 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Cosenza.

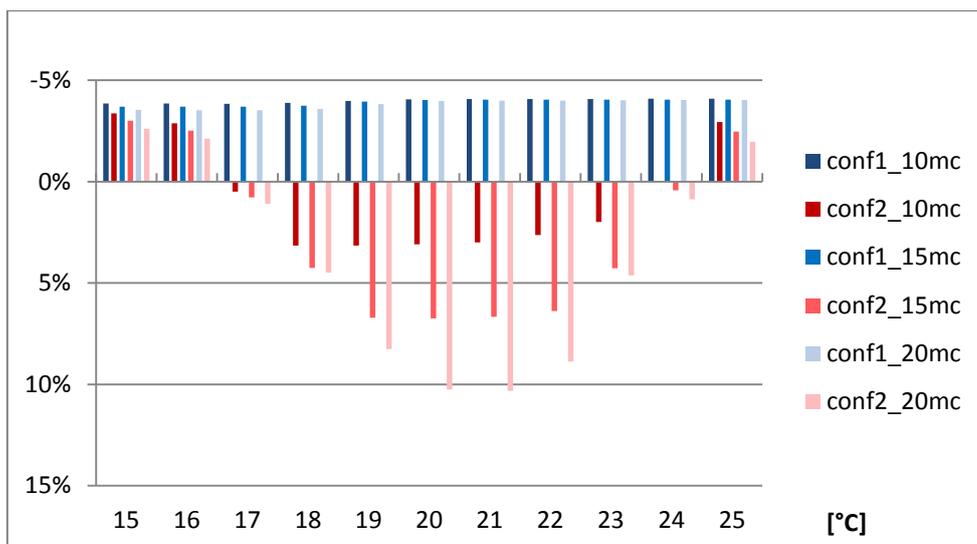


Figura 3. 52 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Roma.

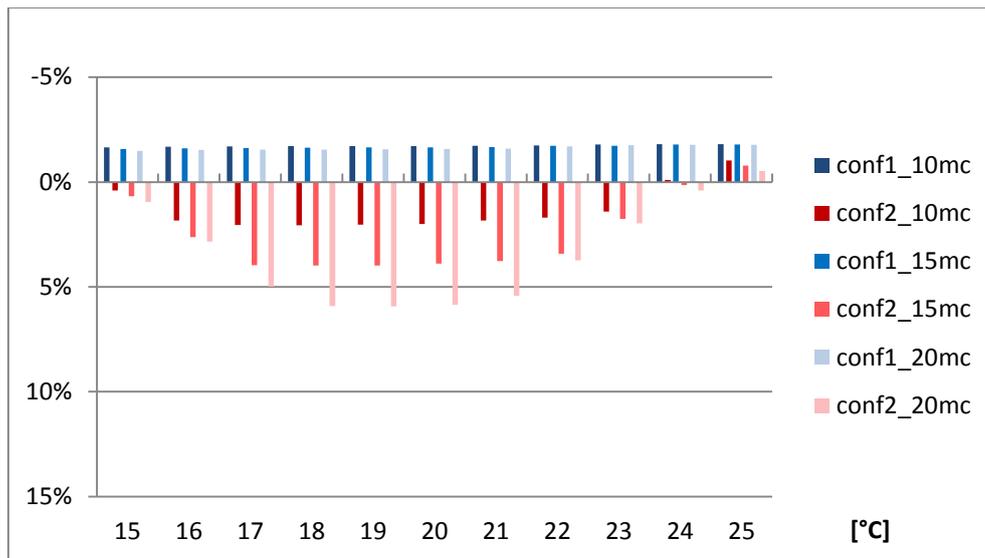


Figura 3. 53 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Milano.

Dai grafici emerge che la configurazione 1, a differenza del caso estivo in cui si registrano comunque dei benefici, comporta un lieve aumento dei fabbisogni (circa il 5 % massimo). Dal punto di vista fisico ciò è giustificato dal fatto che il PCM cattura il calore proveniente dall'esterno fino a raggiungere il passaggio di stato, quando però il PCM torna in fase solida il calore che cede non riesce a penetrare all'interno dell'ambiente a causa della presenza interposta dell'isolante, che ostacola il passaggio di tale flusso. Per quanto riguarda invece la seconda configurazione, l'andamento è simile al caso estivo e quindi, se per Cosenza la PMT ottima è 21 °C, a cui corrisponde una riduzione massima della richiesta energetica del 13 %, per le città di Roma e Milano si parla ancora di range di temperature ottime: per Roma scegliere una PMT pari a 20 °C o 21 °C comporta pressoché uguale beneficio (10 %) invece, per Milano il range di temperature è compreso tra 18 e 21 °C, il quale permette un risparmio del 5.5 % circa. I migliori risultati qui espressi si riferiscono al caso di 20 m<sup>3</sup> di PCM. Anche in questo caso la configurazione 2 nell'intorno della sua PMT ottima è migliore della configurazione 1.

### Pareti Est

In questo paragrafo verrà illustrata l'analisi di ottimizzazione della temperatura di melting (PMT) nel caso in cui il PCM viene integrato nelle pareti esposte a Est (vedi Figura 3. 54). La superficie totale di queste pareti è pari a 42.86 m<sup>2</sup> per cui lo spessore equivalente dello strato aggiunto, corrispondente a 10-15-20 m<sup>3</sup> di PCM, è pari a 0.233-0.35-0.467 m rispettivamente. Lo studio è stato impostato variando sia la PMT, in un range di temperature tra 15 e 25 °C con uno step di 1 °C, sia la quantità di PCM (10, 15, 20 m<sup>3</sup>), ed è stato effettuato per tutte e tre le città e per entrambe le configurazioni. Di quest'ultime solo della configurazione 2 saranno argomentati le riduzioni dei fabbisogni ottenute nei vari casi dato che risulta migliore della configurazione 1, della quale in ogni caso è possibile visualizzarne gli andamenti nei grafici.

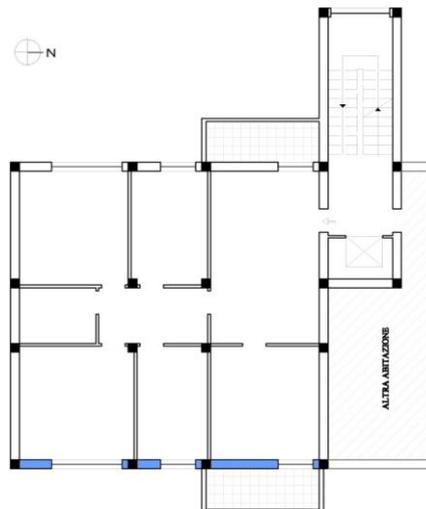


Figura 3. 54 - Individuazione delle pareti esterne esposte a Est contenenti PCM

### 5.3.2.1 PMT ottima estiva

Di seguito vengono illustrati i grafici relativi alla riduzione percentuale della richiesta energetica nel caso estivo per ogni città oggetto di studio (Figura 3. 55, Figura 3. 56 e Figura 3. 57 ): la graduazione di rosso si riferisce alla configurazione 1, mentre quella blu alla configurazione 2.

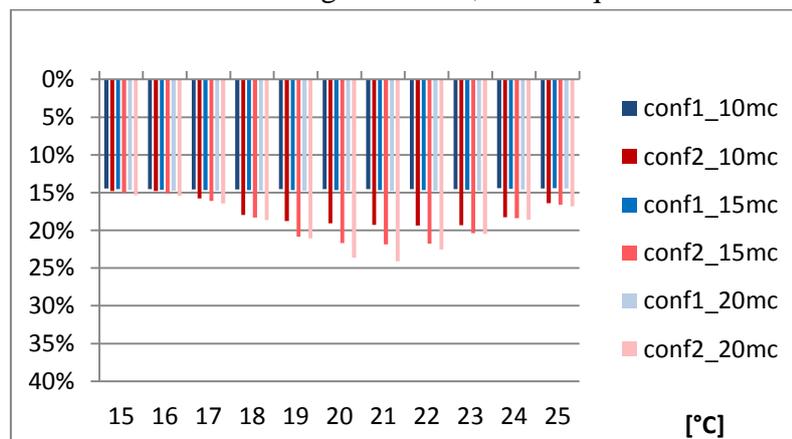


Figura 3. 55 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Cosenza.

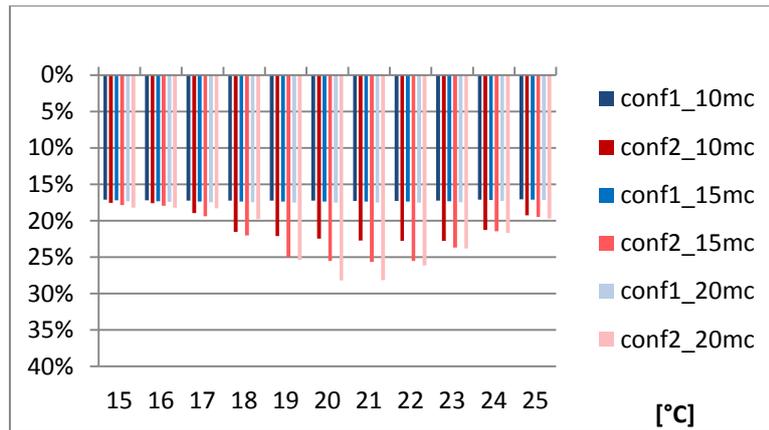


Figura 3. 56 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Roma.

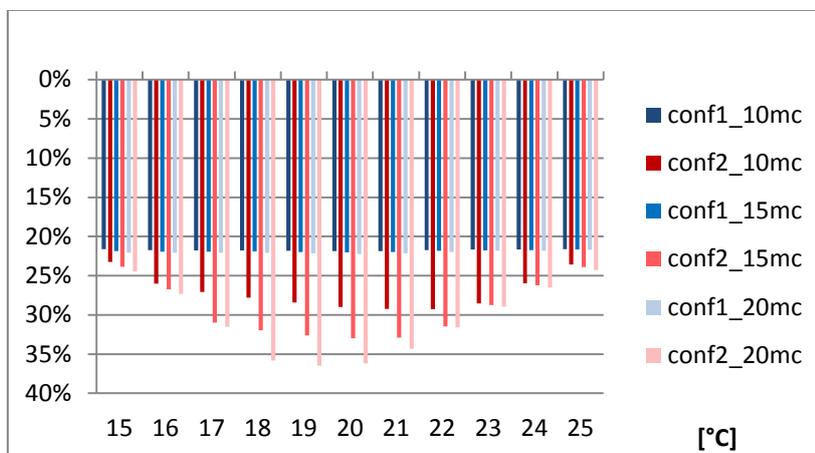


Figura 3. 57 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Milano.

Per le città di Cosenza e Roma si ha una riduzione circa del 24 % e 28 % rispettivamente per temperature di 20 e 21 °C, mentre a Milano i risultati mostrano un risparmio di circa il 36 % per PMT comprese tra 18 e 20 °C. I migliori risultati qui espressi si riferiscono al caso di 20 m<sup>3</sup> di PCM. Per la stagione estiva valgono le stesse considerazioni fatte per l'esposizione Sud concernenti il confronto tra le due configurazioni e le prestazioni termiche all'aumentare del volume di PCM integrato; considerazioni che resteranno valide anche nelle analisi estive condotte per il caso di PCM posizionato in tutte le pareti esterne esposte a Ovest.

### PMT invernale

Di seguito vengono illustrati i grafici relativi alla riduzione percentuale della richiesta energetica nel caso invernale per ogni città e quantità di PCM oggetto di studio (Figura 3. 58, Figura 3. 59 e Figura 3. 60 ).

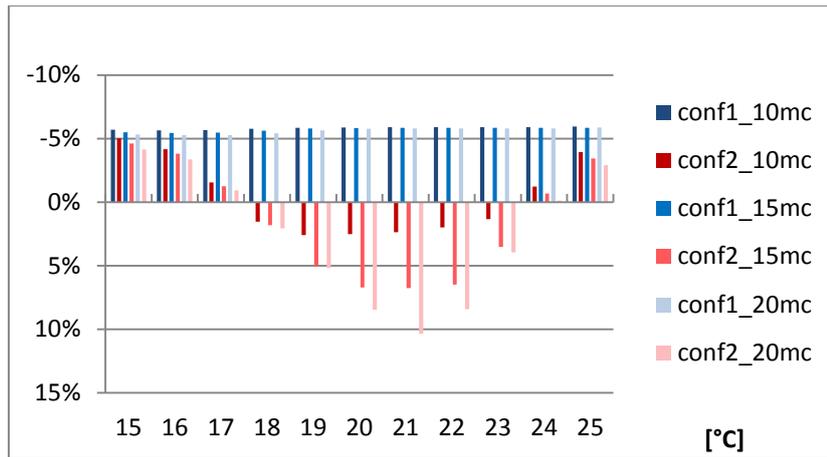


Figura 3. 58 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Cosenza.

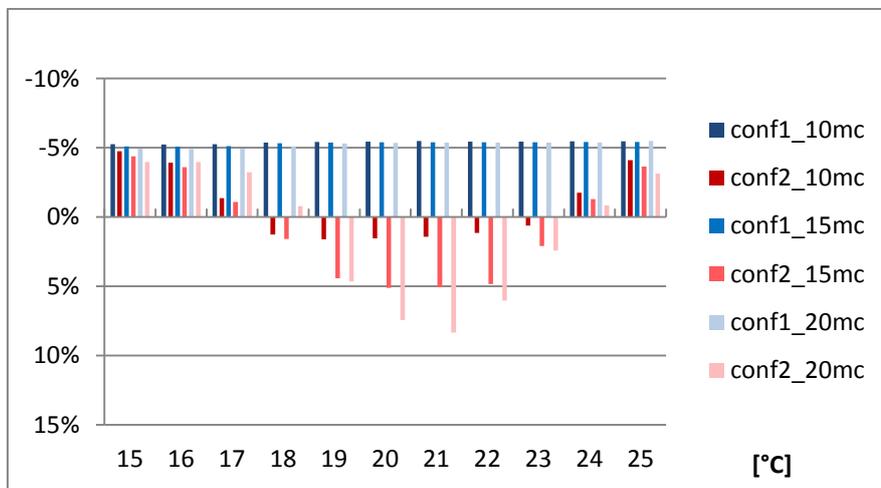


Figura 3. 59 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Roma.

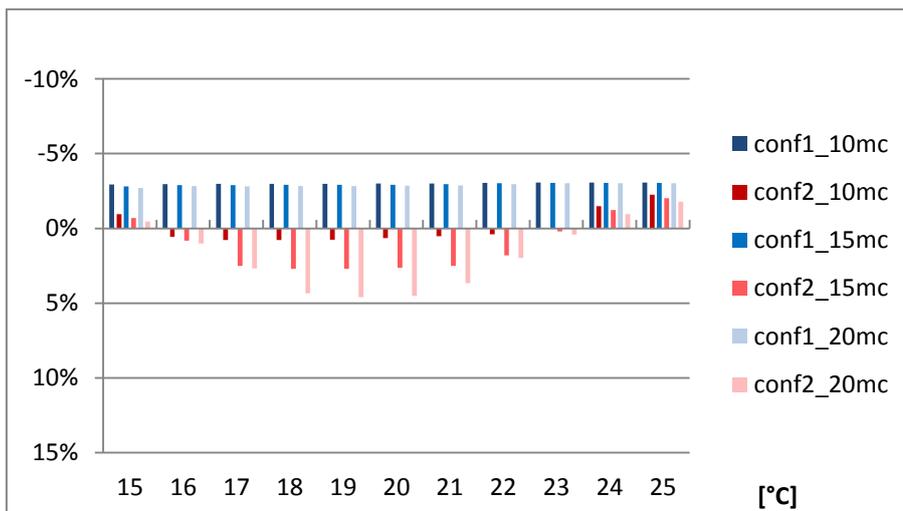


Figura 3. 60 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Milano.

Il comportamento della parete nella configurazione 1 è simile al caso “Sud”; infatti, non si registra alcun beneficio né al variare della temperatura di melting né variando la quantità.

Mentre, per la configurazione 2, i risultati mostrano una riduzione del 10 % a Cosenza e dell'8 % a Roma con una PMT pari a 21 °C, mentre a Milano il 4 % con PMT comprese tra 18 e 20 °C. Anche nella stagione invernale valgono le stesse considerazioni fatte per l'esposizione Sud e resteranno valide anche nelle analisi invernali condotte per il caso di PCM posizionato in tutte le pareti esterne esposte a Ovest.

### Pareti Ovest

In questo paragrafo verrà illustrata l'analisi di ottimizzazione della temperatura di melting (PMT) nel caso in cui il PCM viene integrato nelle pareti esposte a Ovest (vedi Figura 3. 61). La superficie totale di queste pareti è pari a 42.86 m<sup>2</sup> per cui lo spessore equivalente dello strato aggiunto, corrispondente a 10-15-20 m<sup>3</sup> di PCM, è pari a 0.233-0.35-0.467 m rispettivamente. Lo studio è stato impostato variando sia la PMT, in un range di temperature tra 15-25 °C con uno step di 1 °C, sia la quantità di PCM (10, 15, 20 m<sup>3</sup>), ed è stato effettuato per tutte e tre le città e per entrambe le configurazioni. Anche per l'esposizione Ovest saranno argomentati solo le riduzioni dei fabbisogni ottenute con la configurazione 2.

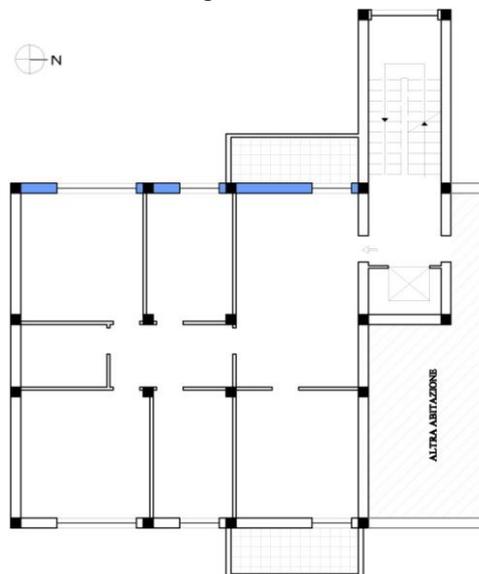


Figura 3. 61 - Individuazione delle pareti esterne esposte a Ovest contenenti PCM

### PMT Estiva

Di seguito vengono illustrati i grafici relativi alla riduzione percentuale della richiesta energetica nel caso estivo per ogni città oggetto di studio (Figura 3. 62, Figura 3. 63 e Figura 3. 64 ): la graduazione di rosso si riferisce alla configurazione 1, mentre quella blu alla configurazione 2.

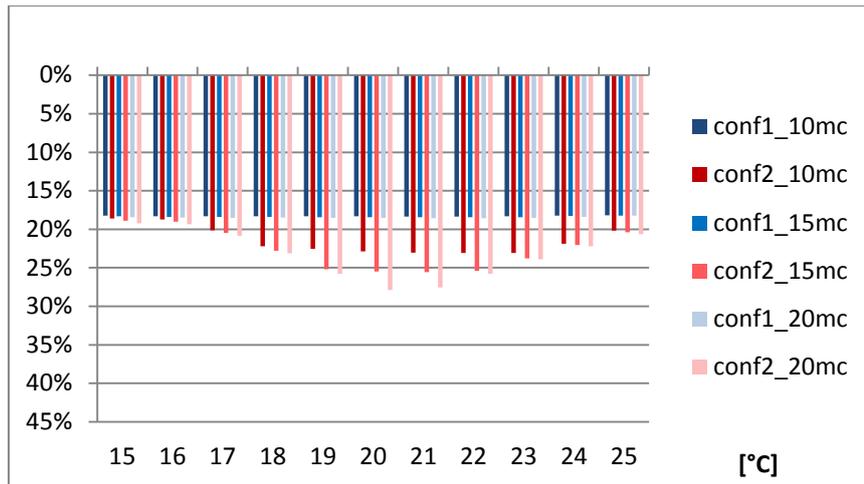


Figura 3. 62 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Cosenza.

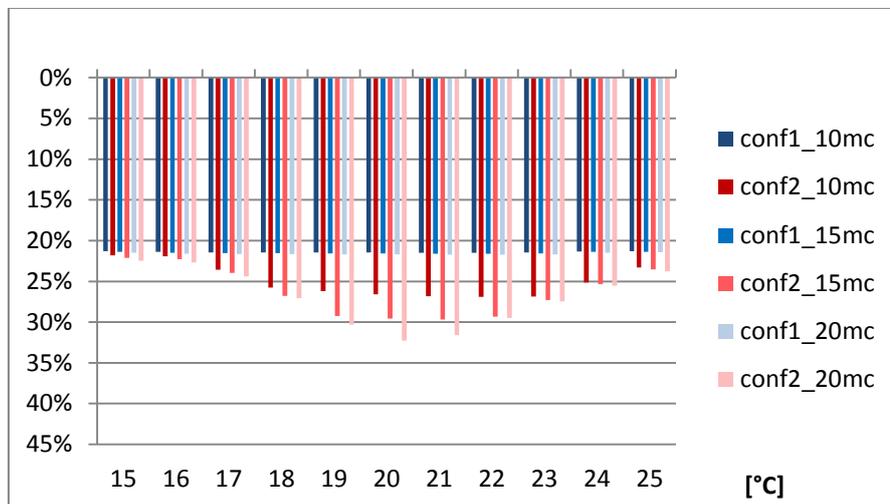


Figura 3. 63 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Roma.

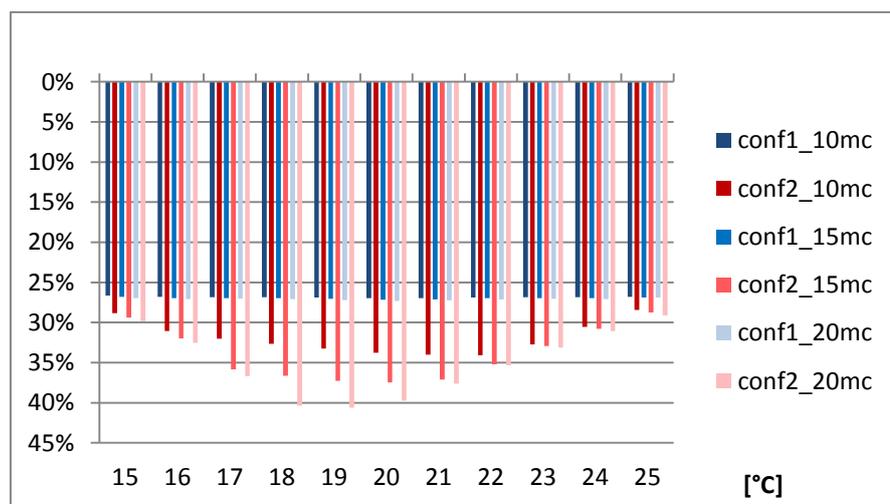


Figura 3. 64 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Milano.

L'andamento dei risultati è simile a quello per le pareti con PCM esposte ad Est: per Cosenza e Roma si ottiene una riduzione pari al 27 % e 32 %, rispettivamente, con temperature di melting di 20 e 21 °C; Milano rimane sempre la città con la più alta percentuale di riduzione del fabbisogno energetico estivo; infatti, dal grafico si legge una riduzione pari a circa il 40 % con PMT comprese tra 18 e 20 °C.

### PMT INVERNALE

Di seguito vengono illustrati i grafici relativi alla riduzione percentuale della richiesta energetica nel caso invernale per ogni città oggetto di studio (Figura 3. 65, Figura 3. 66 e Figura 3. 67 ).

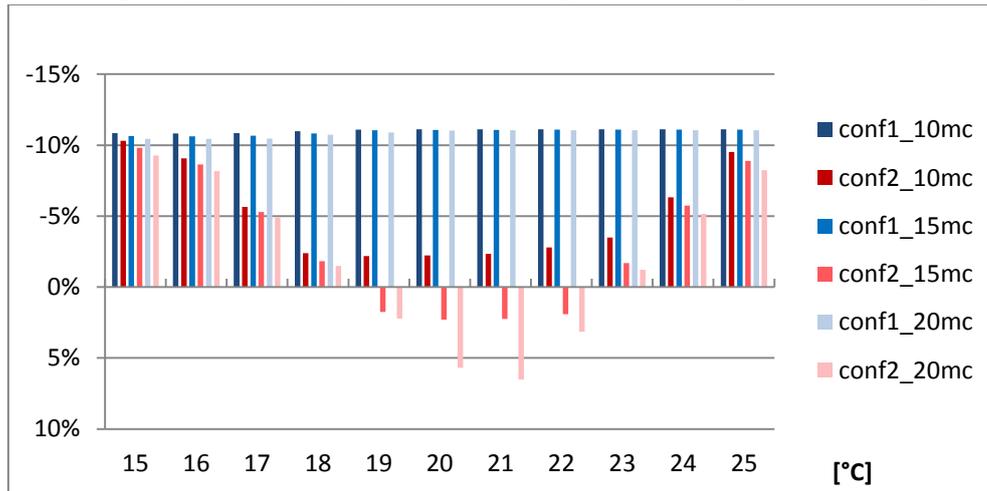


Figura 3. 65 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Cosenza.

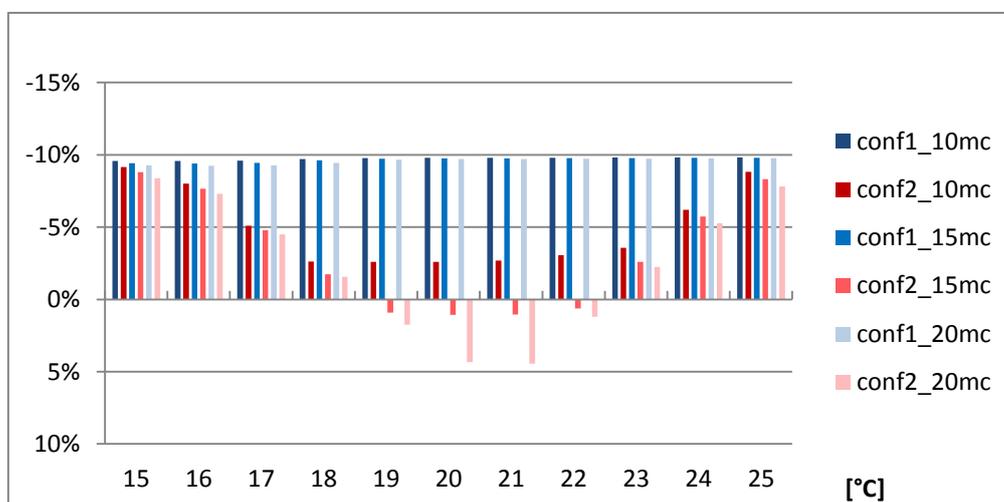


Figura 3. 66 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Roma.

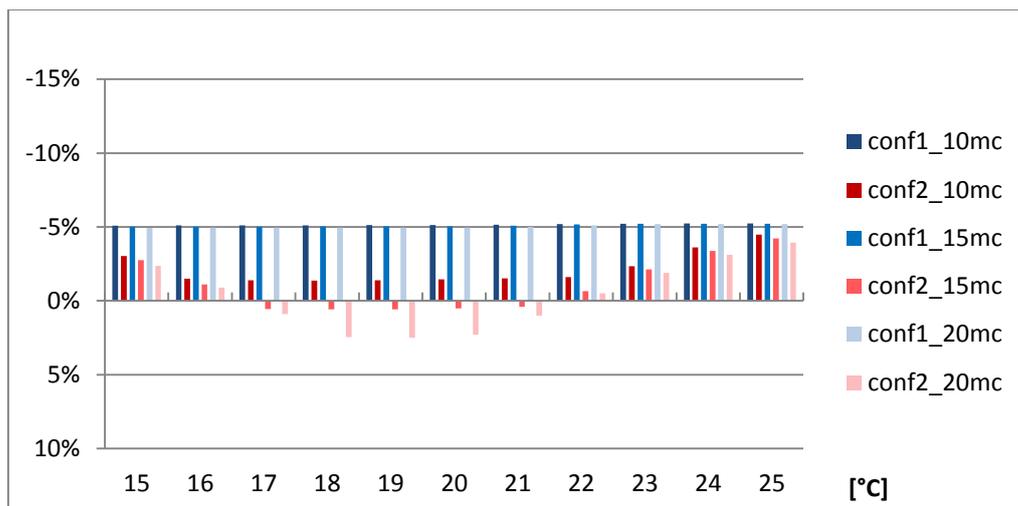


Figura 3. 67 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della PMT, della quantità di PCM e della configurazione di parete: Caso studio Milano.

Se per il caso estivo l'esposizione ad Ovest risulta quella migliore, per la stagione di riscaldamento appare quella con minor riduzione percentuale. Infatti, a Cosenza si ottiene una riduzione del 6 % con una PMT pari a 21 °C, a Roma del 4 % con 20 e 21 °C ed infine a Milano si registra una riduzione di solo il 2 % con PMT comprese tra 18 e 21 °C.

### Confronto tra le varie esposizioni

A conclusione di quanto esposto finora, in merito alla PMT ottima estiva, nella Tabella 3. 23 vengono raccolte le temperature ottime per le diverse località, esposizioni e quantità. Infatti, fissando una qualsiasi località ed esposizione, si nota che aumentando la quantità di PCM la PMT ottima diminuisce: a Cosenza per l'esposizione Sud si passa da 23 °C a 21 °C raddoppiando la quantità di PCM; stesso comportamento si ha a Roma e Milano dove addirittura si ha un calo della PMT di 3 °C.

	COSENZA			ROMA			MILANO		
	SUD	EST	OVEST	SUD	EST	OVEST	SUD	EST	OVEST
10	23	22	22	23	22	22	22	22	22
15	22	21	21	22	21	21	21	20	20
20	21	21	20	20	20	20	20	19	19

Tabella 3. 23 - Valori della PMT ottima estiva al variare dell'esposizione e della quantità di PCM

Per quanto riguarda invece il caso invernale, le PMT ottime vengono riassunte nella Tabella 3. 24. Analogamente al caso estivo, la PMT ottima varia in relazione alla quantità di PCM, alla località e all'esposizione, in particolare però la PMT cresce all'aumentare del volume di PCM integrato: a Cosenza e a Roma passa da 19 °C a 21 °C raddoppiando la quantità di PCM, mentre a Milano si ha un aumento di un 1 °C, da 18 a 19°C. A parità di quantità, in particolare nel caso di 20 m<sup>3</sup>, la PMT rimane costante per tutte e tre le esposizioni. Inoltre, confrontando questi valori di PMT con quelle del caso estivo, e in particolare per 20 m<sup>3</sup> di PCM, si nota che la PMT rimane invariata a Cosenza e a Milano, mentre a Roma le due PMT differiscono di 1 °C, differenza che però non incide in modo rilevante sulla riduzione percentuale del fabbisogno energetico ad esse connesse, in quanto abbiamo detto che la PMT ottima non è più un unico valore bensì corrisponde ad un range di temperature. A tal proposito si può parlare dunque di PMT ottima

annuale, ossia quella grazie alla quale si registrerà la maggior diminuzione del fabbisogno energetico annuale.

	COSENZA			ROMA			MILANO		
	SUD	EST	OVEST	SUD	EST	OVEST	SUD	EST	OVEST
10	19	19	19	19	19	19	18	18	18
15	20	21	20	20	20	20	18	19	18
20	21	21	21	21	21	21	19	19	19

Tabella 3. 24 - Valori della PMT ottima invernale al variare dell'esposizione e della quantità di PCM

### Comportamento annuale

In riferimento a quanto scritto precedentemente circa i diversi periodi che caratterizzano il comportamento del PCM, nelle Figura 3. 68 e Figura 3. 69 vengono presentati i profili di temperatura superficiale del PCM ottenuti attraverso la simulazione annuale per la città di Roma, quando 15 m<sup>3</sup> di materiale a cambiamento di fase viene inserito nelle pareti esterne esposte a Sud con la PMT pari a quella ottima estiva.

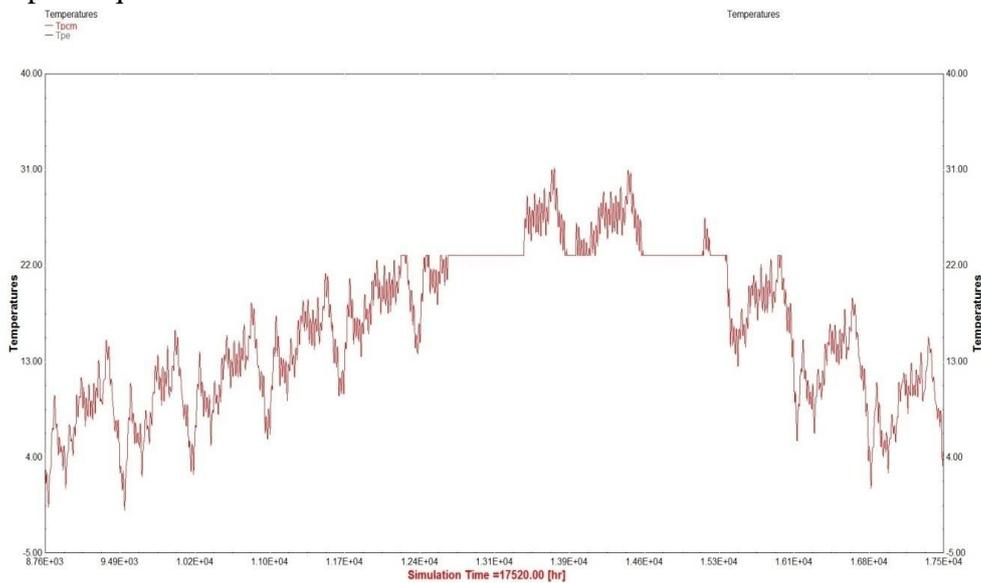


Figura 3. 68 - temperatura superficiale dello strato di PCM inserito nella parete esterna esposta a Sud della zona C: configurazione 1

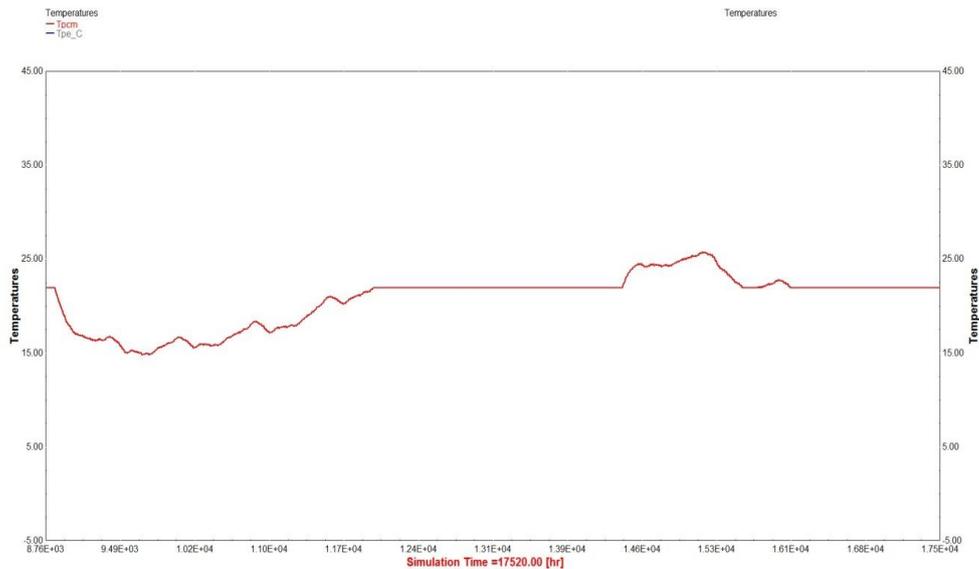


Figura 3. 69 - temperatura superficiale dello strato di PCM inserito nella parete esterna esposta a Sud della zona C: configurazione 2

In questo caso l'andamento della temperatura è ben differente da quella analizzata per le superfici interne, infatti è possibile individuare solo in parte i periodi UP, CDP e CP. Nel caso della configurazione 1, Figura 3. 68 l'andamento della temperatura è altamente variabile, data la "ravvicinata" influenza delle condizioni esterne e, quindi, il PCM si attiva per brevi periodi di tempo tra Giugno e Settembre durante il quale al CDP si alterna al CP. Da Gennaio a Giugno la temperatura del PCM è al di sotto della PMT ma con tendenza di aumentare in valore medio e quindi è possibile identificare solo l'IMV UP; da Settembre a Dicembre la temperatura è ancora al di sotto a quella di melting prefissata e tende a diminuire in valore medio all'aumentare del tempo e quindi questo periodo è classificabile come DMV UP. In riferimento alla Figura 3. 69 ossia quella corrispondente alla configurazione 2, la temperatura presenta un andamento molto meno variabile rispetto al caso precedente; infatti la presenza dell'isolante subito dopo l'intonaco esterno fa sì che le fluttuazioni di temperatura vengano attenuate/smorzate tanto da far mantenere la temperatura del PCM in un range di fluttuazione meno ampio. A questo consegue che il CDP dura di più e il PCM si attiva da metà Maggio fino ad Agosto per poi riprendere a Novembre e Dicembre; nei mesi di Settembre e Ottobre il materiale è sempre al di sopra della temperatura di melting (CP), mentre il periodo che va da Gennaio fino a metà Maggio è classificabile come UP.

### 3.4.6 PCM integrato nelle pareti esterne

In questo paragrafo è stata stimata la riduzione dei fabbisogni mensili indotta dall'utilizzo di materiale a cambiamento di fase nelle pareti esterne. L'analisi è stata effettuata per le tre città e per le due configurazioni di stratigrafia delle pareti esterne, mantenendo fissa sia la temperatura di melting (PMT ottima estiva) che la quantità ( $15 \text{ m}^3$ ). Per poter cogliere l'influenza della presenza del PCM, i risultati, riassunti nei grafici nelle Figura 3. 70, Figura 3. 71, Figura 3. 72, Figura 3. 73, Figura 3. 74, Figura 3. 75, Figura 3. 76, Figura 3. 77, Figura 3. 78, sono messi a confronto con la soluzione del caso di riferimento.

Pareti Sud

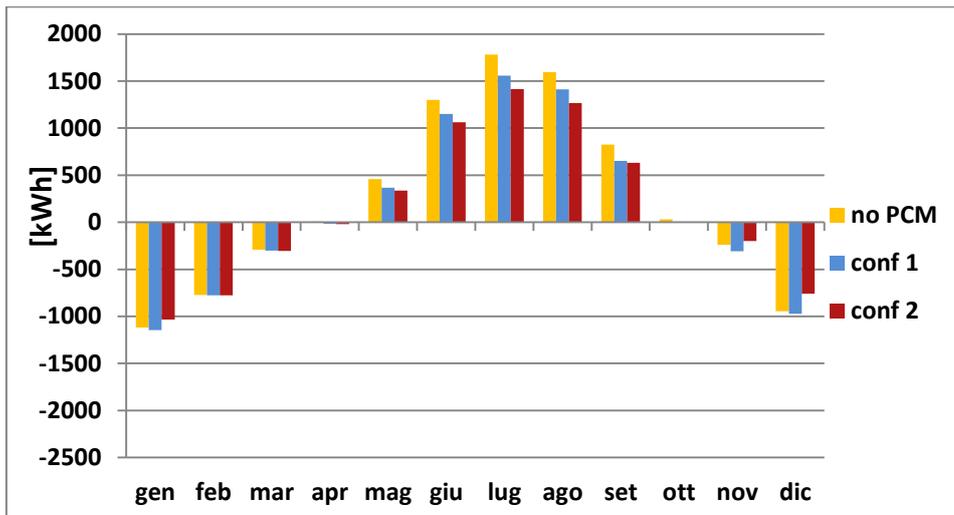


Figura 3. 70 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare della configurazione: caso studio Cosenza

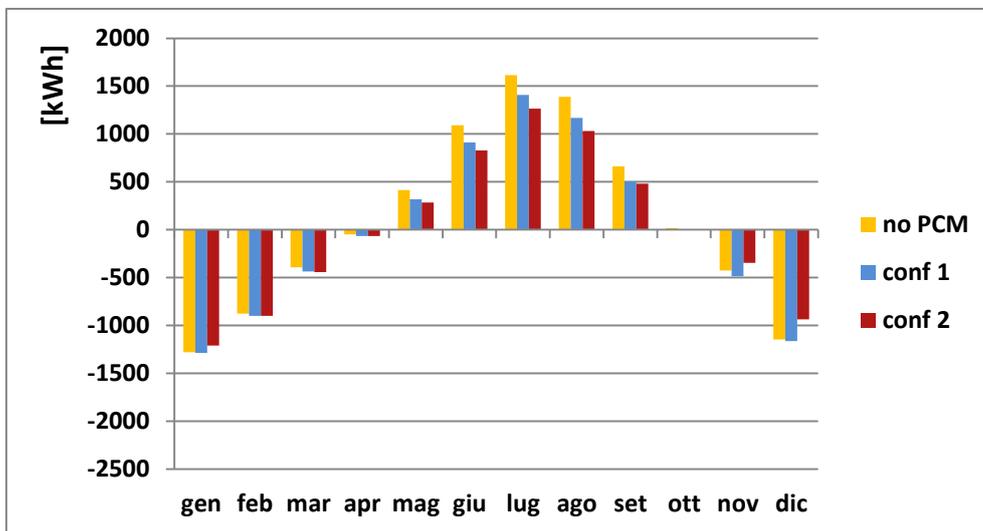


Figura 3. 71 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare della configurazione: caso studio Roma

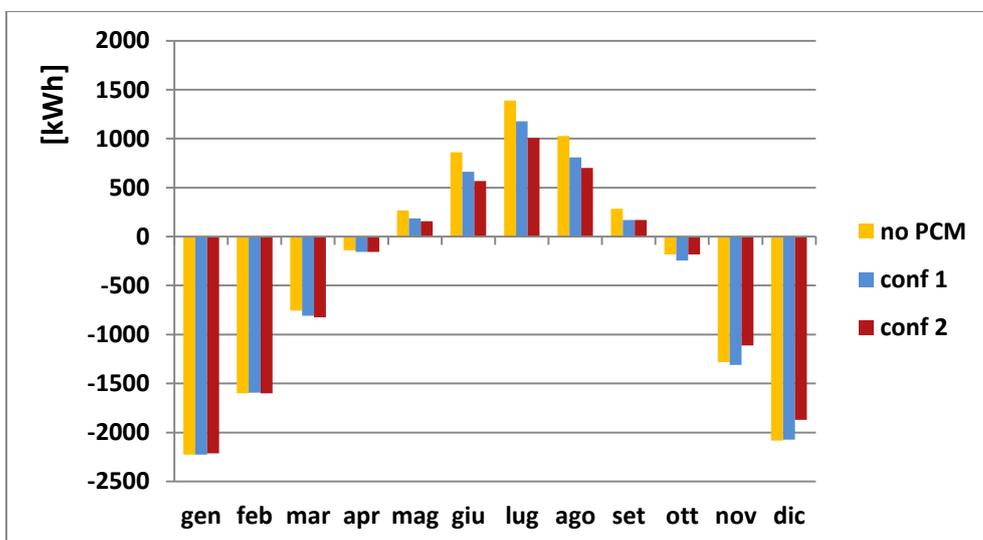


Figura 3. 72 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare della configurazione: caso studio Milano

La PMT ottima massimizza le performance quasi in tutto l'arco dell'anno, questo è dovuto sia al contributo latente del PCM sia all'aumento dell'inerzia termica dell'involucro indotto dalla presenza dello strato aggiunto. A Cosenza e a Roma, ad esempio, la necessità di raffrescare/riscaldare l'ambiente si riduce a partire dal mese di Maggio fino a Gennaio, mentre, a Milano va da Maggio a Dicembre; nei restanti mesi, non si registra alcuna riduzione. Come già detto in precedenza, i maggiori benefici sono ottenuti con la configurazione 2.

### Pareti Est

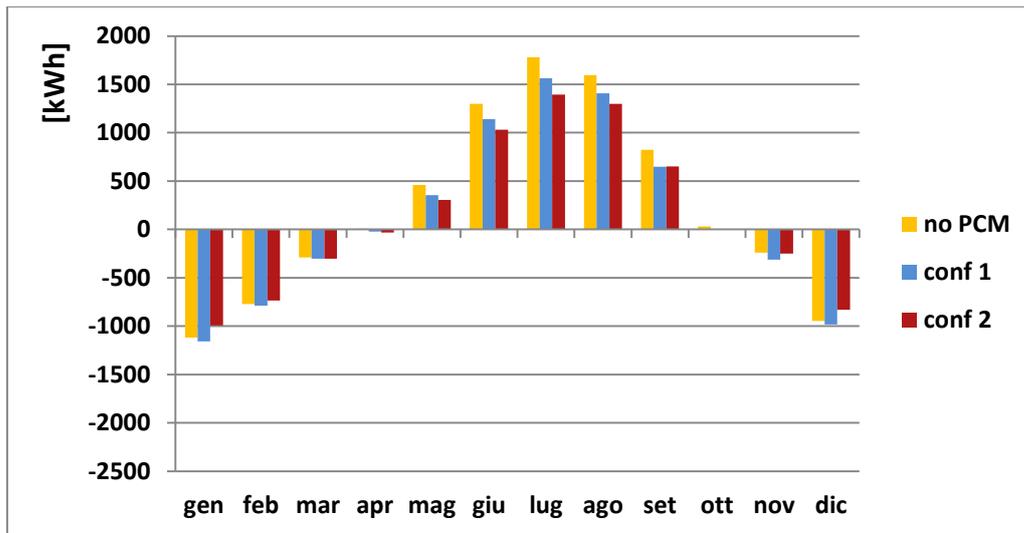


Figura 3. 73 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare della configurazione: caso studio Cosenza

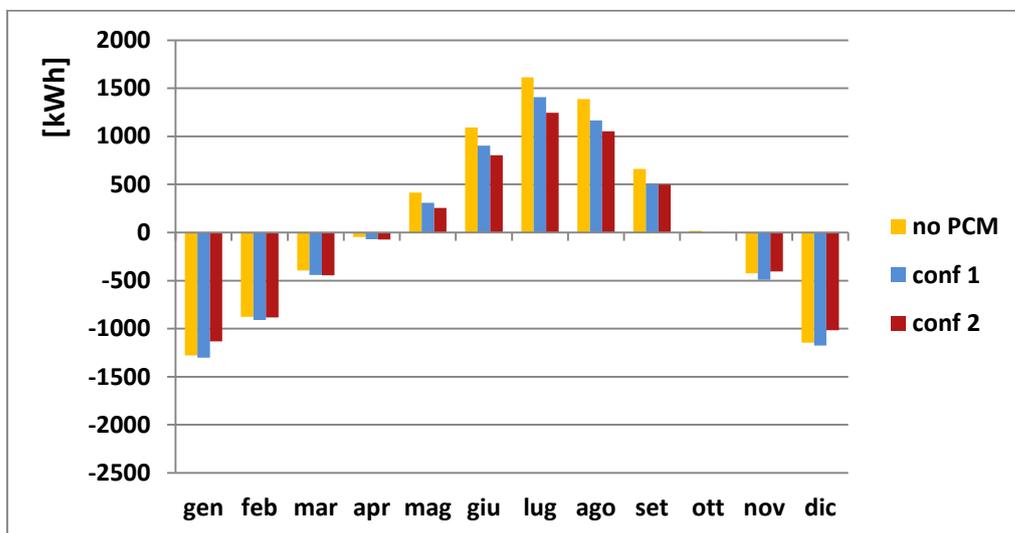


Figura 3. 74 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare della configurazione: caso studio Roma

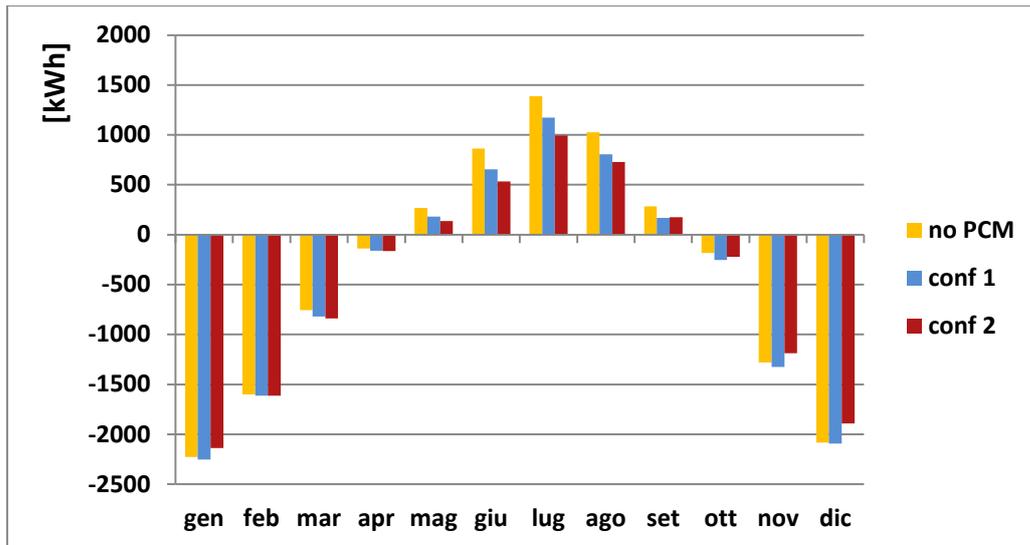


Figura 3. 75- Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare della configurazione: caso studio Milano

Qui l'andamento dei risultati è simile a quello per il caso di PCM integrato nelle pareti esposte a Sud, con le sole eccezioni che per la città di Cosenza il periodo in cui si registrano riduzioni del fabbisogno va da Maggio a Febbraio mentre a Milano va da Maggio a Gennaio. Nei restanti mesi la riduzione è pressoché nulla.

#### Pareti Ovest

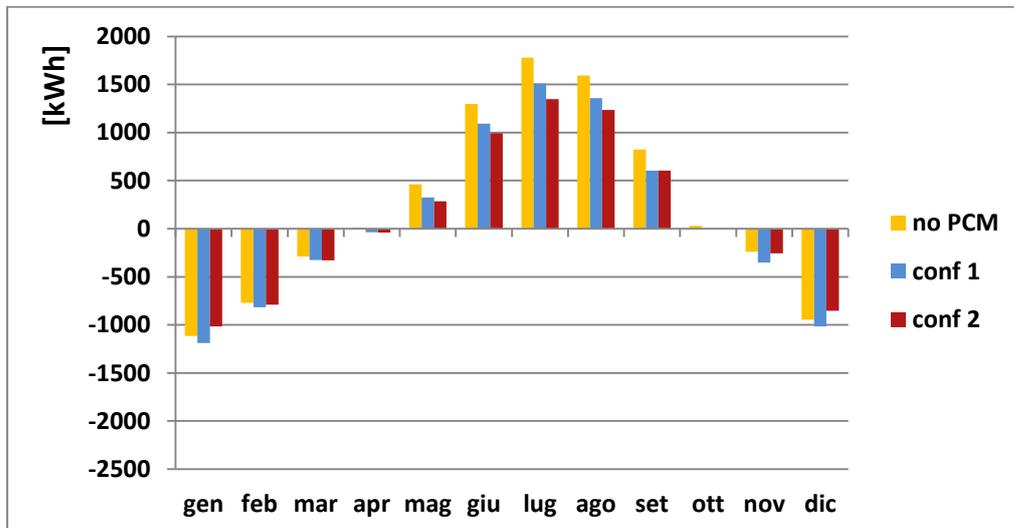


Figura 3. 76 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare della configurazione: caso studio Cosenza

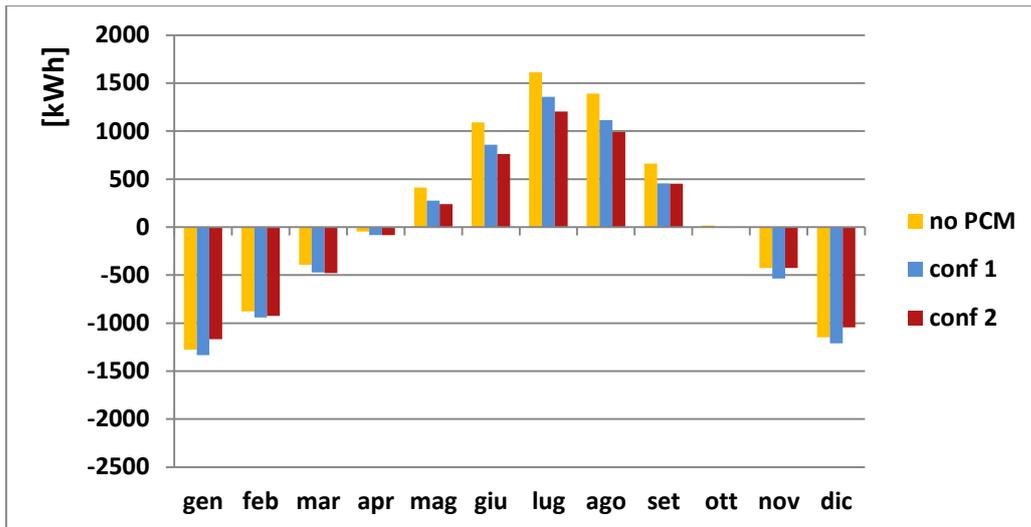


Figura 3. 77 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare della configurazione: caso studio Roma

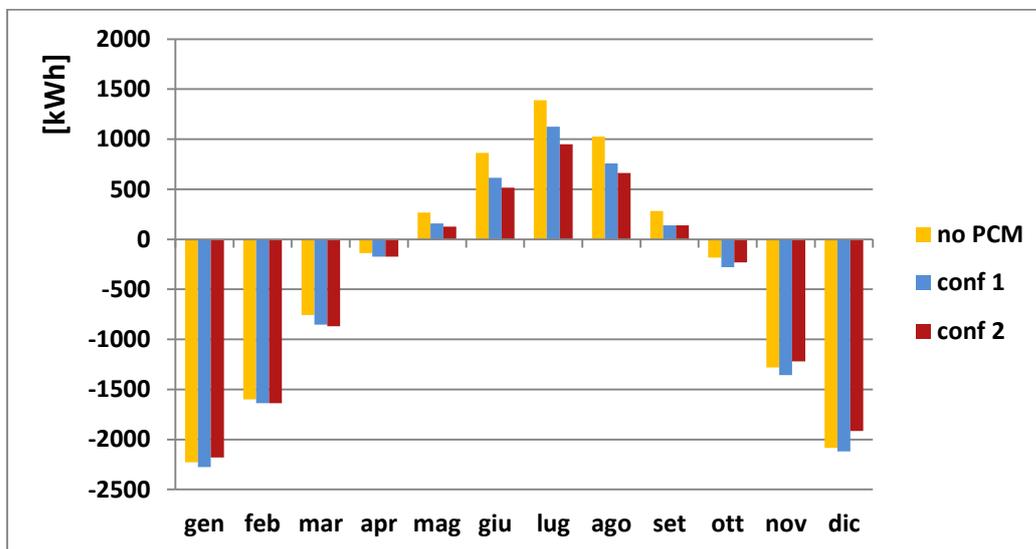


Figura 3. 78 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare della configurazione: caso studio Milano

I risultati sono all'incirca uguali a quelli ottenuti nel caso di PCM integrato in pareti esposte ad Est se non fosse che per le città di Roma e Milano nel mese di Marzo si registra un chiaro aumento della necessità di riscaldare l'ambiente.

### 3.4.7 Performance annuali del PCM integrato nelle pareti esterne e attenuazione-sfasamento dei carichi

#### Performance Estive

Per meglio comprendere le differenze che intercorrono posizionando il PCM nelle pareti esterne diversamente esposte, ci riferiamo ai grafici delle Figura 3. 79, Figura 3. 80, Figura 3. 81 in cui sono riassunti i risultati in termini di variazione del fabbisogno energetico estivo rispetto al caso di riferimento, inerenti alla configurazione 2 ottenuti con la PMT ottima estiva di ogni caso al variare rispettivamente della quantità di PCM 10 m<sup>3</sup>, 15 m<sup>3</sup> e 20 m<sup>3</sup>, inoltre sono stati riassunti in Tabella 3. 25 per maggior chiarezza.

QUANTITÀ	ESPOSIZIONE	COSENZA	ROMA	MILANO
10	SUD	18.9%	22.2%	28.5%
	EST	19.3%	22.8%	29.3%
	OVEST	23.1%	26.9%	34.1%
15	SUD	21.3%	24.9%	32.0 %
	EST	21.9%	25.7%	33.0 %
	OVEST	25.6%	29.7%	37.5%
20	SUD	23.7%	27.6%	35.3%
	EST	24.1%	28.2%	36.5%
	OVEST	27.9%	32.3%	40.6%

Tabella 3. 25 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo al variare della quantità di PCM e dell'esposizione.

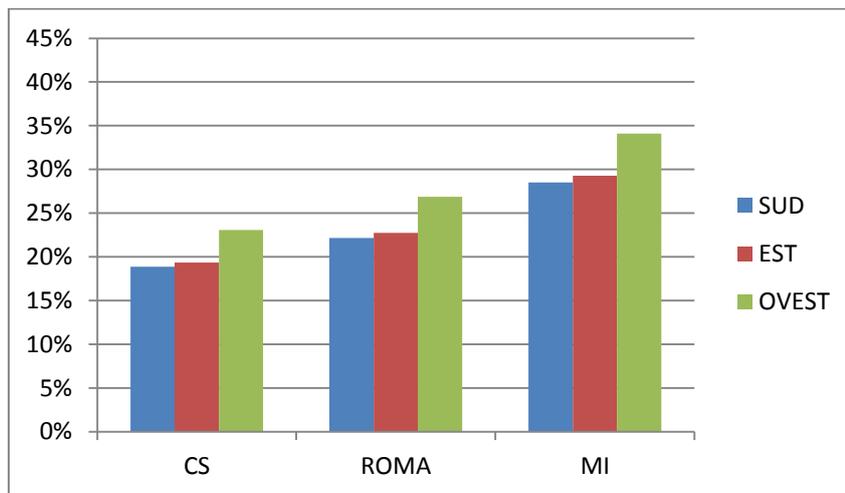


Figura 3. 79 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo per le tre città al variare dell'esposizione: caso studio 10 m<sup>3</sup> di PCM integrato nell'involucro

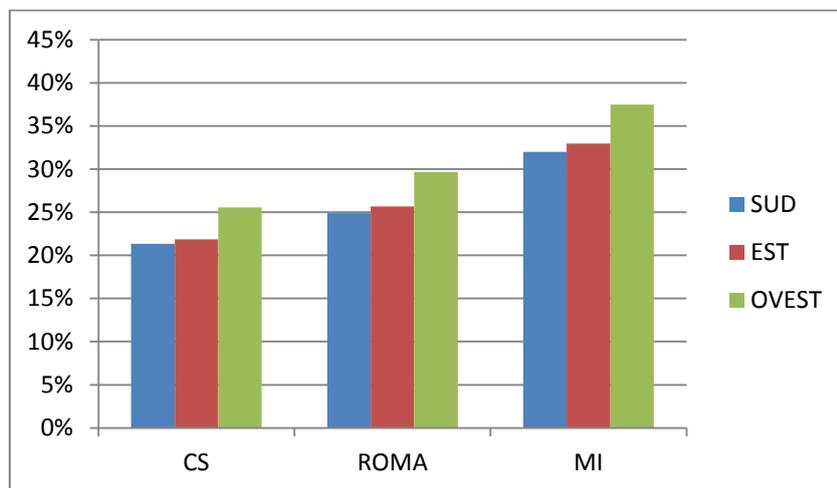


Figura 3. 80 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo per le tre città al variare dell'esposizione: caso studio 15 m<sup>3</sup> di PCM integrato nell'involucro

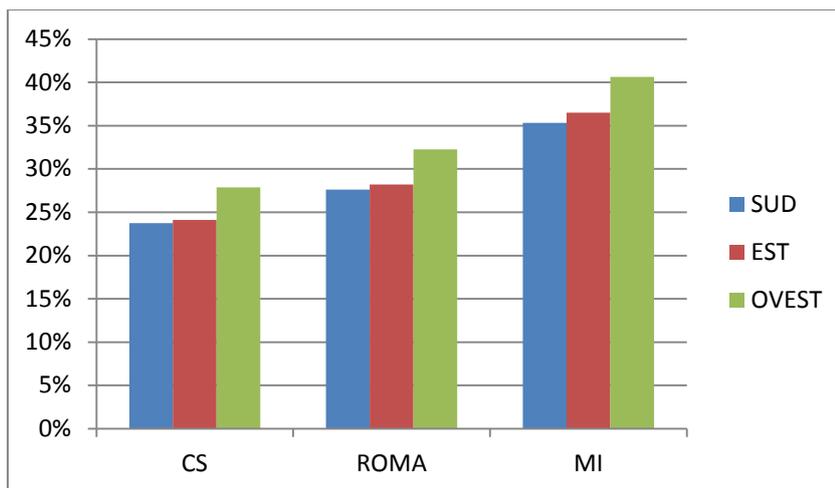


Figura 3. 81 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico estivo per le tre città al variare dell'esposizione: caso studio 20 m<sup>3</sup> di PCM integrato nell'involucro

A parità di quantità, l'esposizione a cui corrisponde la più alta percentuale di riduzione del fabbisogno energetico è quella Ovest, proprio dove si registrano le condizioni più gravose di carico termico esterno, come accennato precedentemente. Ad esempio, per la città di Roma per una quantità pari a 15 m<sup>3</sup> di PCM, si registra una riduzione pari a 24.9 % a Sud, 25.7 % a Est e 29.7 % a Ovest. Un'altra importante osservazione che emerge dal grafico è che i maggiori benefici si hanno nella città di Milano e riferendosi ai grafici dei fabbisogni prima discussi, si può affermare che gran parte di queste riduzioni avvengono nella stagione estiva, stagione che a Milano è caratterizzata da un clima sicuramente più mite e che quindi richiede già di per sé minor dispendio di energia per il raffrescamento rispetto, invece, alla città di Cosenza, tab. 4.13. Ad ogni modo si ottiene una riduzione massima del 27.9 % a Cosenza, 32.3 % a Roma e ben il 40.6 % a Milano per una quantità di PCM pari a 20 m<sup>3</sup>. Se invece ci riferiamo alla variabile quantità, è stato già espresso più volte che l'aumento di volume di PCM comporta un conseguente aumento delle prestazioni del PCM.

### Performance Invernali

Lo stesso studio è stato condotto considerando la PMT ottima invernale; i dati relativi ai grafici nelle Figura 3. 82, Figura 3. 83 e Figura 3. 84 vengono riassunti nella Tabella 3. 26. A parità di quantità, l'esposizione a cui corrisponde la più alta percentuale di riduzione del fabbisogno energetico è quella Sud. Ad esempio, per la città di Roma per una quantità pari a 15 m<sup>3</sup> di PCM, si registra una riduzione pari a 1.1 % a Ovest, 5.1 % a Est e 6.7 % a Sud. In particolare, 10 m<sup>3</sup> di PCM integrato nelle pareti esterne esposte ad Ovest per tutte e tre le città, non comporta alcun beneficio, anzi si registra un lieve aumento dei fabbisogni. riferito Risulta sempre valido che il risparmio energetico aumenta in relazione all'incremento quantità del volume di PCM. Per quanto riguarda invece la variabile "località", quella a cui sono connesse le maggior riduzioni del fabbisogno energetico invernale corrisponde alla città di Cosenza, la quale è caratterizzata da temperature invernali meno rigide rispetto alle altre due e che, come già detto, presenta il minor carico termico invernale.

QUANTITÀ	ESPOSIZIONE	COSENZA	ROMA	MILANO
10	SUD	4.3 %	3.2 %	2.1 %
	EST	2.6 %	1.6 %	0.8 %
	OVEST	-2.2 %	-2.6 %	-1.4 %
15	SUD	8.7 %	6.7 %	4%
	EST	6.7 %	5.1 %	2.7 %
	OVEST	2.3 %	1.1 %	0.6 %
20	SUD	13.0 %	10.3 %	5.9 %
	EST	10.4 %	8.3 %	4.6 %
	OVEST	6.5 %	4.5 %	2.5 %

Tabella 3. 26 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale al variare della quantità di PCM e dell'esposizione.

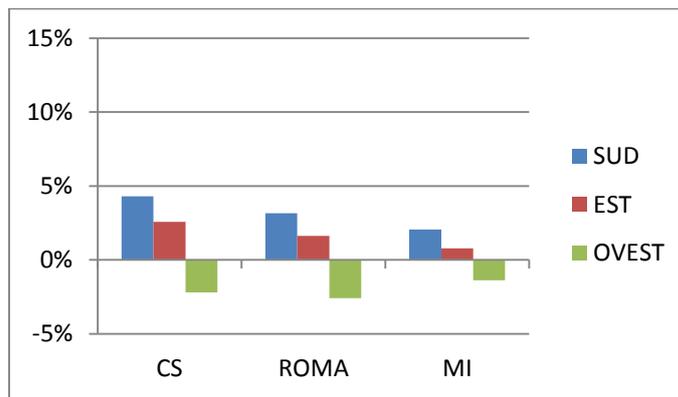


Figura 3. 82 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale per le tre città al variare dell'esposizione: caso studio 10 m3 di PCM integrato nell'involucro

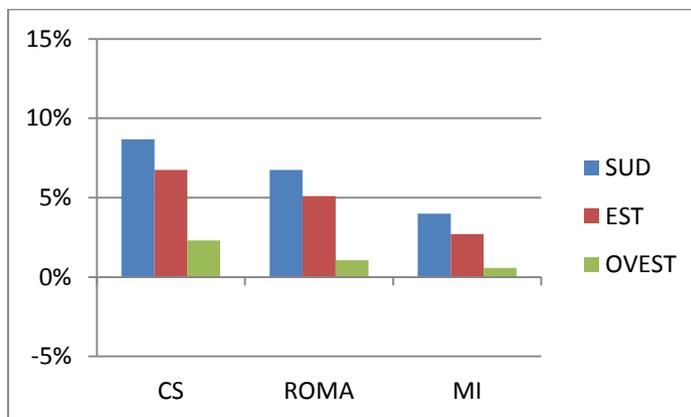


Figura 3. 83 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale per le tre città al variare dell'esposizione: caso studio 15 m3 di PCM integrato nell'involucro

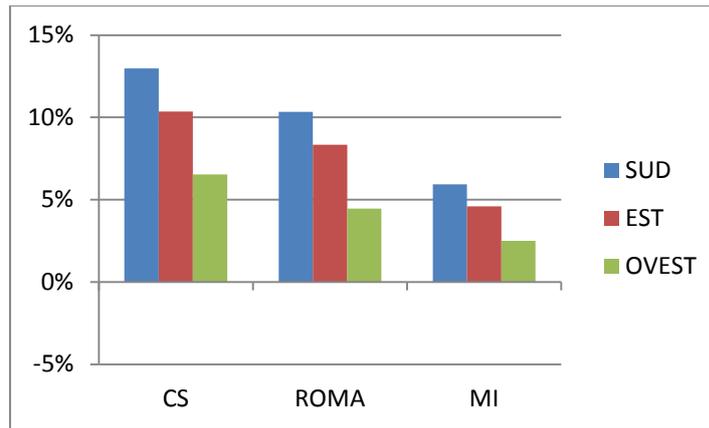


Figura 3. 84 - Riduzione percentuale del fabbisogno energetico invernale per le tre città al variare dell'esposizione: caso studio 20 m<sup>3</sup> di PCM integrato nell'involucro

Per completare lo studio delle performance termiche in funzione delle diverse esposizioni, sono state fatte valutazioni concernenti la temperatura superficiale dello strato di PCM al variare dell'esposizione delle pareti in cui esso è stato inserito. Il caso esaminato è quello per cui 15 m<sup>3</sup> di PCM vengono integrati nelle pareti esterne, secondo la configurazione 2, nella città di Roma. I risultati vengono presentati nelle Figura 3. 85, Figura 3. 86 e Figura 3. 87.

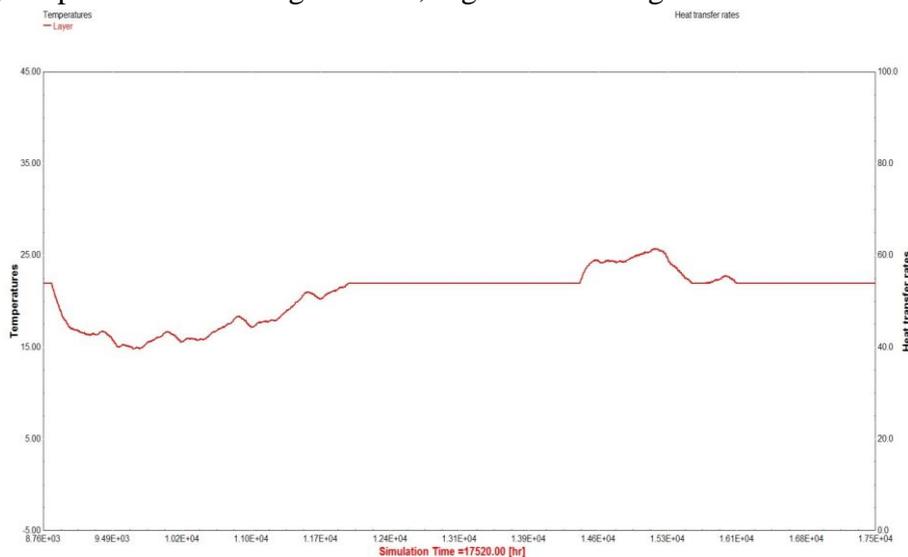


Figura 3. 85 - Temperatura superficiale dello strato di PCM inserito nella parete esterna esposta a Sud della zona C: Roma, 15 m<sup>3</sup> di PCM, PMT= 22°C

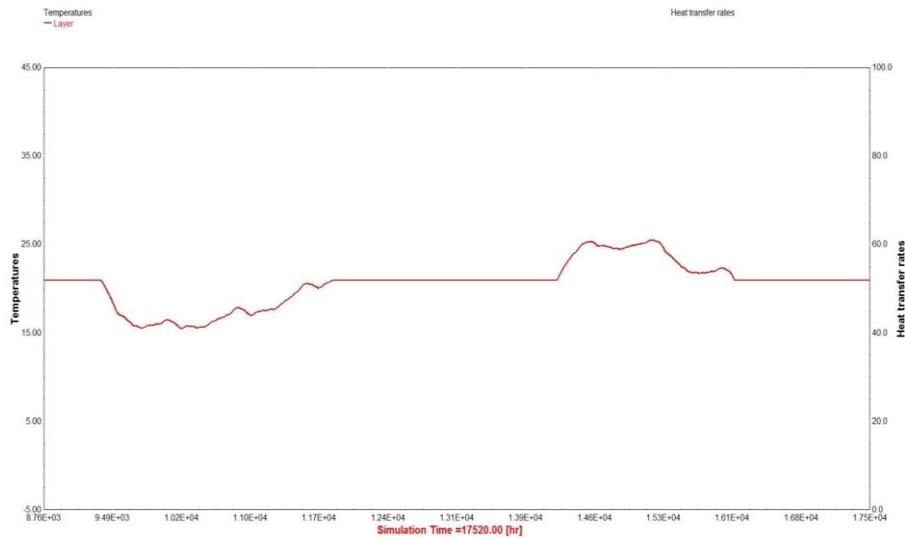


Figura 3. 86 - Temperatura superficiale dello strato di PCM inserito nella parete esterna esposta a Est della zona C: Roma, 15 m3 di PCM, PMT= 21°C

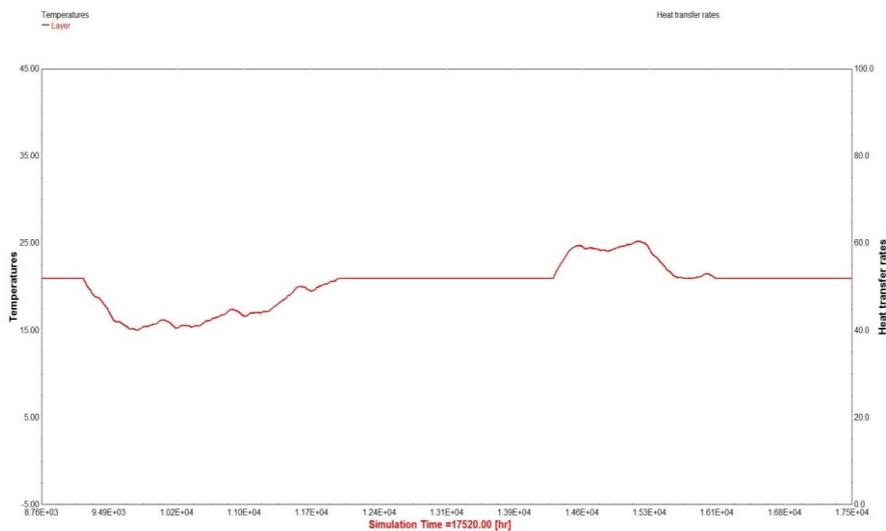


Figura 3. 87 - Temperatura superficiale dello strato di PCM inserito nella parete esterna esposta a Ovest della zona P: Roma, 15 m3 di PCM, PMT= 21°C

Dai grafici emerge che il comportamento del PCM, al variare dell'esposizione, è pressoché uguale; l'unica differenza risiede nella durata del CDP: per la parete esposta a Sud il CDP ha una durata totale di 3715 ore, per quella esposta a Est di 4084 ore e per quella esposta a Ovest di 4143 ore. Il PCM nella parete esposta ad Ovest permette una riduzione dei fabbisogni del 4 % maggiore rispetto all'esposizione Est nonostante la durata del CDP sia di poco inferiore. La risposta risiede sicuramente nelle condizioni al contorno che caratterizzano le due zone climatiche prese in esame: entrambe le zone climatiche C e P presentano due superfici disperdenti verso l'esterno però la zona C è costituita da una esposta a Est e una esposta a Sud mentre la zona P è composta da una parete verticale esposta a Ovest e il tetto. Quindi le due zone saranno soggette a diversi carichi termici, in particolare ciò è dovuto alla diversa radiazione solare incidente nelle varie esposizioni e alle diverse dimensioni delle superfici interessate; inoltre ogni zona è adiacente a zone climatiche differenti. Questo spiega il motivo per il quale varia il CDP, in quanto in funzione del carico termico il PCM si carica/scarica oppure non avviene il cambiamento di fase.

### Attenuazione e sfasamento

Per dimostrare i vantaggi che questi materiali consentono di ottenere in termini di attenuazione dei carichi, si è simulata una giornata tipica di una stagione intermedia (16 Giugno a Roma). In particolare si è condotto uno studio giornaliero per valutare come varia la temperatura superficiale interna di una parete esterna di una zona climatica dell'edificio al variare della configurazione stratigrafica. Inoltre, sono stati computati i profili di temperatura della stessa parete in assenza di PCM e viene riportata la temperatura di set point della stagione estiva (26 °C). Di seguito vengono riportati i risultati per tutte e tre le esposizioni prese in esame.

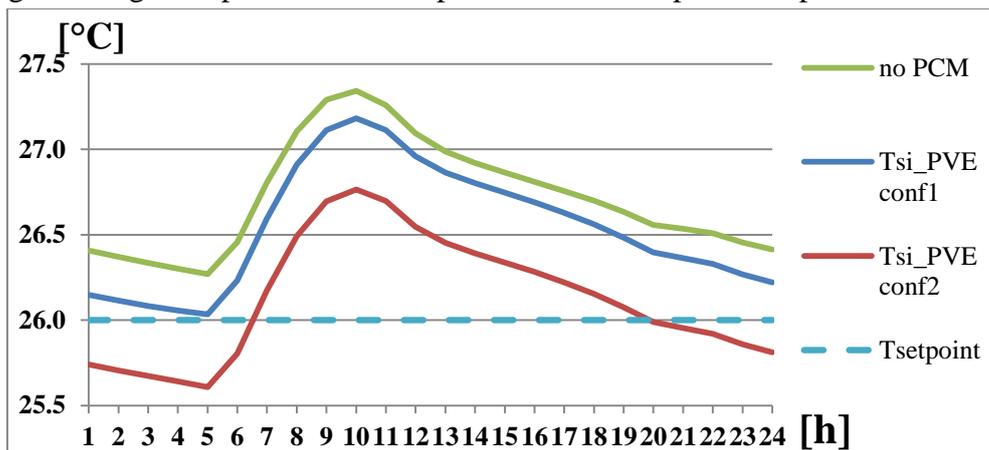


Figura 3. 88 - Andamento della temperatura superficiale interna della parete esposta a Sud della zona C al variare della configurazione

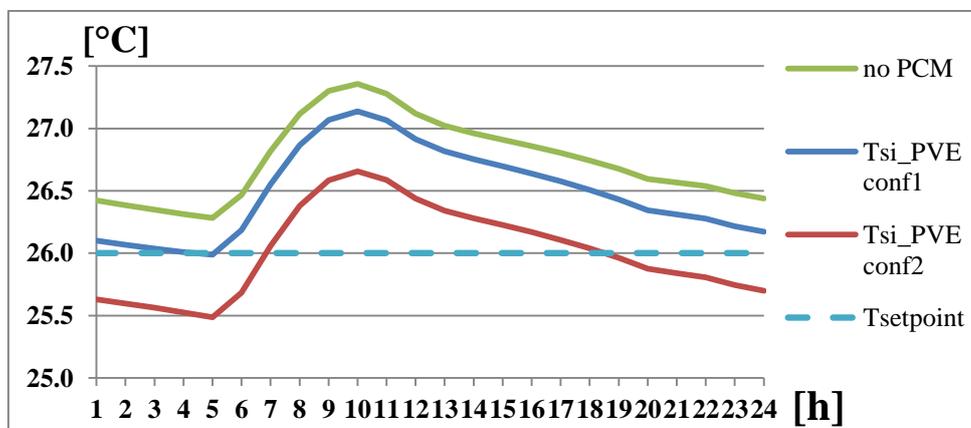


Figura 3. 89 - Andamento della temperatura superficiale interna della parete esposta a Est della zona C al variare della configurazione

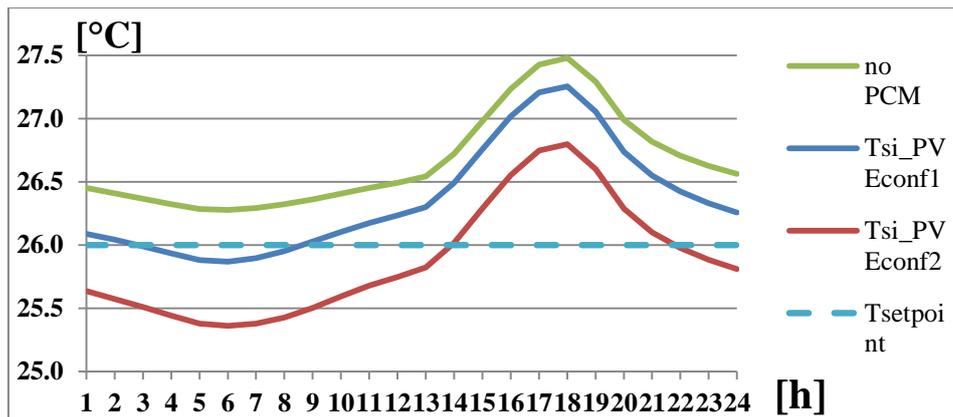


Figura 3.90 - Andamento della temperatura superficiale interna della parete esposta a Ovest della zona P al variare della configurazione

Si può constatare in Figura 3.88 quella riferita alla parete esterna esposta a Sud della zona C, come la presenza del PCM fa sì che il picco giornaliero della temperatura superficiale interna della parete esterna venga attenuato e che si riducano le ore in cui la stessa temperatura è maggiore di 26 °C ( $T_{setpoint}$ ). In particolare, la soluzione che produce maggior beneficio è quella corrispondente all'integrazione del PCM nella parete esterna secondo la configurazione 2: si ottiene una riduzione del picco pari a circa 0.5 °C, e le ore in cui la temperatura è al di sopra di quella di set point passano da 24 a 13. In Figura 3.89 viene invece raffigurato il profilo giornaliero di temperatura della parete esposta a Est della zona C: si riesce ad ottenere una riduzione del picco massimo di 0.5 °C e le ore in cui è necessaria l'attivazione dell'impianto di raffrescamento si riducono da 24 a 12. Anche qui la miglior soluzione risulta essere quella per la quale il PCM è inserito tra l'isolante e lo strato in laterizio. Per ultimi, in Figura 3.90 vengono presentati i risultati concernenti la temperatura superficiale interna della parete esterna esposta ad Ovest della zona climatica P. La miglior soluzione continua ad essere quella corrispondente alla configurazione 2: il picco si riduce di 0.7 °C, ma il risultato più vantaggioso è sicuramente quello relativo alla diminuzione del periodo in cui la temperatura è al di sopra di quella di set point, infatti tale periodo dura solo 8 ore. È stata condotta un'ulteriore analisi giornaliera considerando l'andamento della temperatura sulla superficie interna di pareti esterne diversamente esposte al variare dell'esposizione della parete in cui è collocato il PCM. La stratigrafia scelta per questo studio è quella corrispondente alla configurazione 2 poiché, in riferimento ai risultati finora esposti, è quella che comporta maggior benefici.

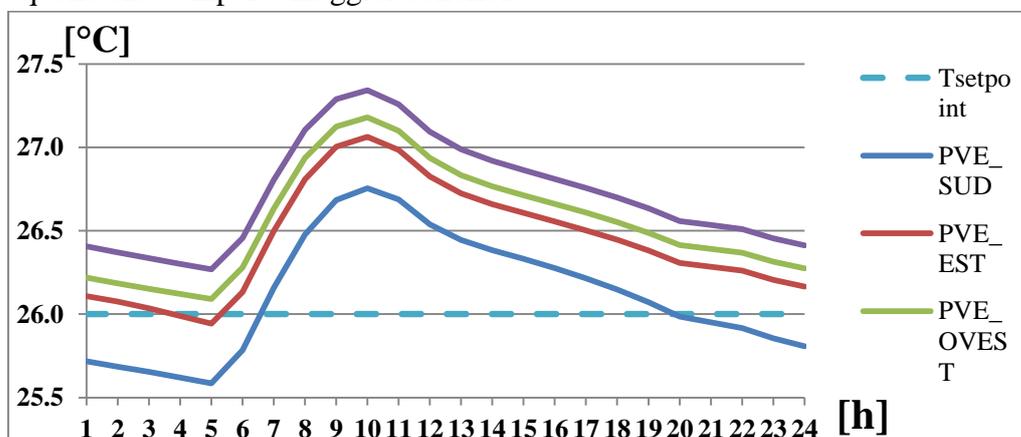


Figura 3.91 - Andamento della temperatura superficiale interna della parete esposta a Sud della zona C al variare dell'esposizione della parete in cui è collocato il PCM

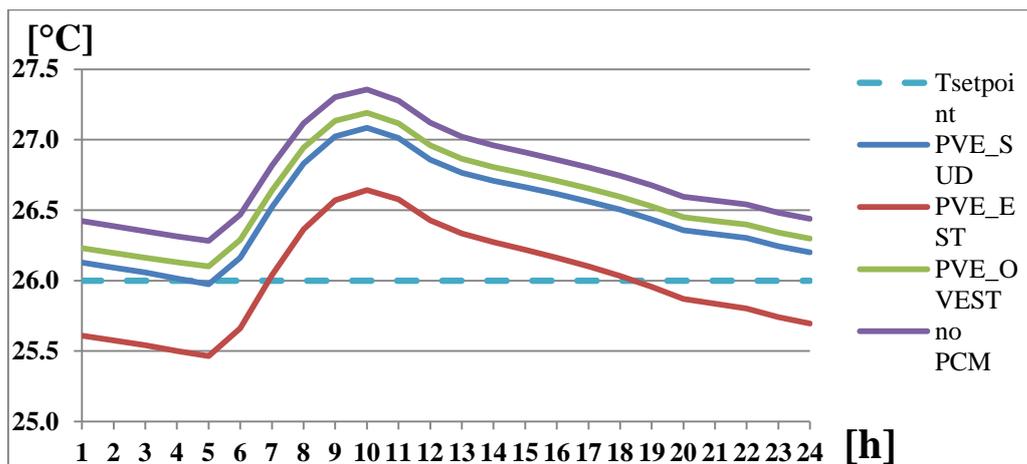


Figura 3. 92 - Andamento della temperatura superficiale interna della parete esposta a Est della zona C al variare della configurazione

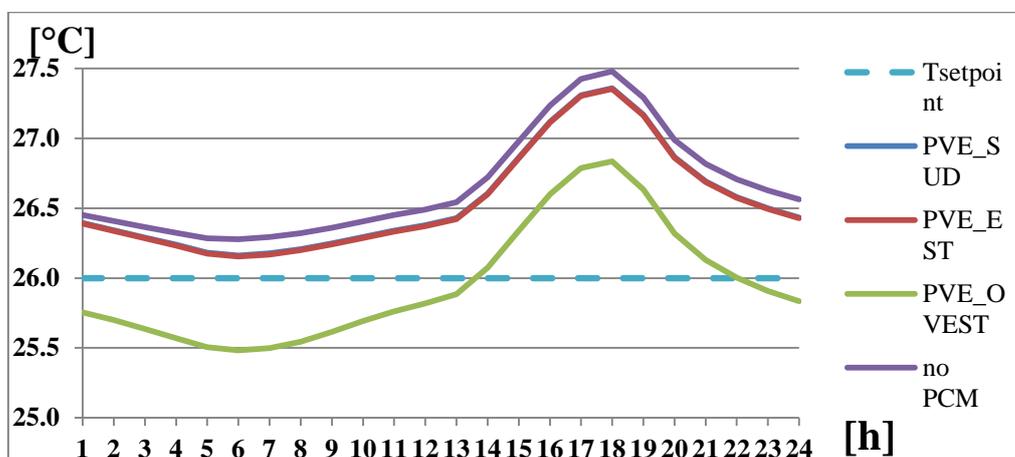


Figura 3. 93 - Andamento della temperatura superficiale interna della parete esposta a Ovest della zona P al variare dell'esposizione

In Figura 3. 91, vengono presentati i profili giornalieri della temperatura superficiale interna della parete esposta a Sud della zona climatica C, quando il PCM viene inserito nella parete esterna dell'edificio esposta a Sud, a Est e a Ovest. Ovviamente, i miglior benefici si riscontrano quando il PCM è direttamente inserito nella parete di cui si sta calcolando la temperatura superficiale; infatti, si ottiene una riduzione del picco pari a 0.6 °C e le ore in cui la temperatura è superiore a quella di set point passa da 24 a 13. Anche quando si posiziona il PCM nella parete esposta a Est della stessa zona C e nella parete esposta a Ovest della zona P si ottengono delle attenuazioni della temperatura superficiale interna della parete esposta a Sud; nel primo caso l'abbassamento del picco è circa di 0.3 °C, mentre nel secondo è di appena 0.16 °C. Quindi, nonostante il PCM venga inserito in un'altra parete, che potrebbe anche far parte di un altro nodo aria, questo riesce comunque a influenzare la temperatura superficiale di una parete in cui non è presente materiale a cambiamento di fase. Questo perché la presenza di PCM modifica lo scambio termico tra la parete in cui è collocato e il nodo aria della zona climatica interessata influenzando così il bilancio energetico del nodo aria stesso in cui confluiscono gli scambi termici di tutte le pareti che ne costituiscono la cavità. Queste ultime nel caso in cui siano pareti interne adiacenti ad altre zone climatiche contribuirebbero alla modifica del bilancio energetico

di altri nodi aria. Risulta così chiaro il motivo per il quale si modifica la temperatura superficiale di una parete in cui non c'è PCM. In Figura 3. 92 sono raffigurati i profili di temperatura superficiale interna della parete esposta a Est della zona climatica C. Anche qui i miglior benefici vengono ottenuti quando il PCM è direttamente inserito nella parete di cui si sta calcolando la temperatura: la riduzione del picco è pari a 0.7 °C e le ore in cui la temperatura è superiore a quella di set point passa da 24 a 12. Le riduzioni del picco riferite alla presenza di PCM nella parete esposta a Sud della stessa zona C e nella parete esposta a Ovest della zona P sono rispettivamente: 0.3 °C e 0.18 °C, mentre rimangono pressoché invariate le ore in cui l'impianto è acceso. Per ultimo, in Figura 3. 93 sono illustrati i profili di temperatura superficiale interna della parete esposta a Ovest della zona climatica P. In termini di riduzione del picco massimo, il miglior risultato è quello riferito all'inserimento del PCM nella parete esposta Ovest, infatti si ottiene un abbassamento pari a 0.7 °C e le ore in cui l'impianto si aziona passa addirittura da 24 a 9. Le riduzioni del picco riferite all'inserimento di PCM nella parete esposta a Est e nella parete esposta a Sud della zona C sono uguali e pari a 0.12 °C.

### **3.4.8 Confronto delle diverse soluzioni**

Effettuate tutte le analisi inerenti alle due tipologie di montaggio, partizioni interne e pareti esterne, siamo in grado ora di confrontare i risultati per poter avere un quadro generale da cui trarre le opportune conclusioni. I risultati oggetto di paragone sono: riduzione percentuale del fabbisogno energetico, fabbisogni mensili e attenuazione dei carichi.. Per quanto riguarda le partizioni interne ci si riferirà solo al caso in cui il PCM è integrato nel solaio (poiché è risultato che i benefici ottenuti con montaggio nel solaio o nelle pareti interne verticali sono pressoché uguali), mentre nel caso di PCM integrato nelle pareti esterne si è scelto di riportare i risultati attinenti alla sola tipologia di stratigrafia identificata come configurazione 2 di cui se ne ricavano i miglior vantaggi. Per esigenze di sintesi, i dati saranno tutti relativi a 15 m<sup>3</sup> di PCM.

#### **Fabbisogni Mensili**

I risultati connessi allo studio dei fabbisogni mensili al variare della tipologia di montaggio riferiti alle diverse località sono riportati nelle Figura 3. 94, Figura 3. 95 e Figura 3. 96. Lo studio è stato condotto per tutte le località, considerando la PMT ottima estiva relativa a ciascun caso.

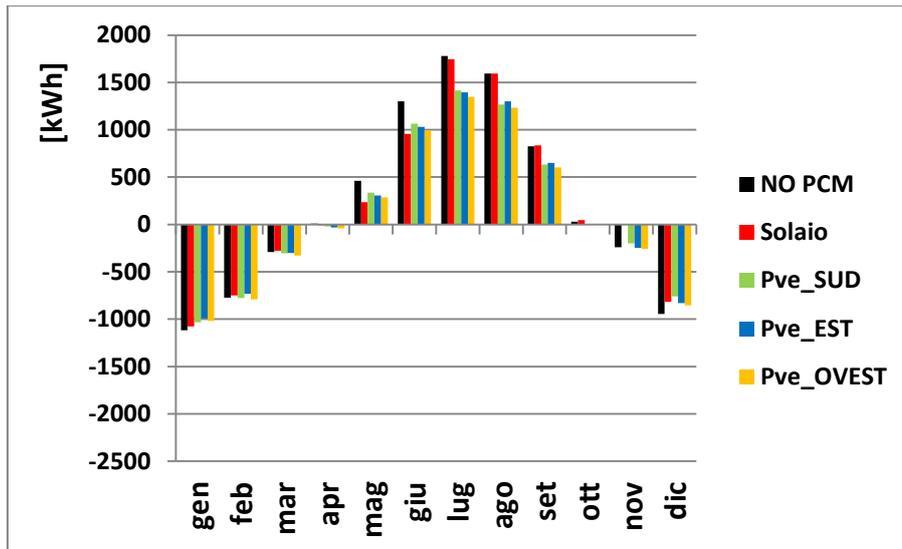


Figura 3. 94 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare del montaggio: caso studio Cosenza

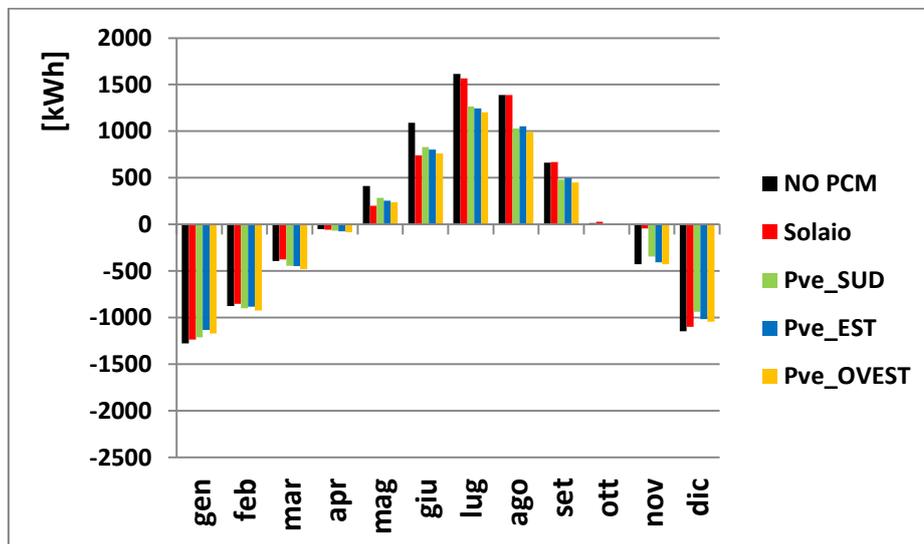


Figura 3. 95 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare del montaggio: caso studio Roma

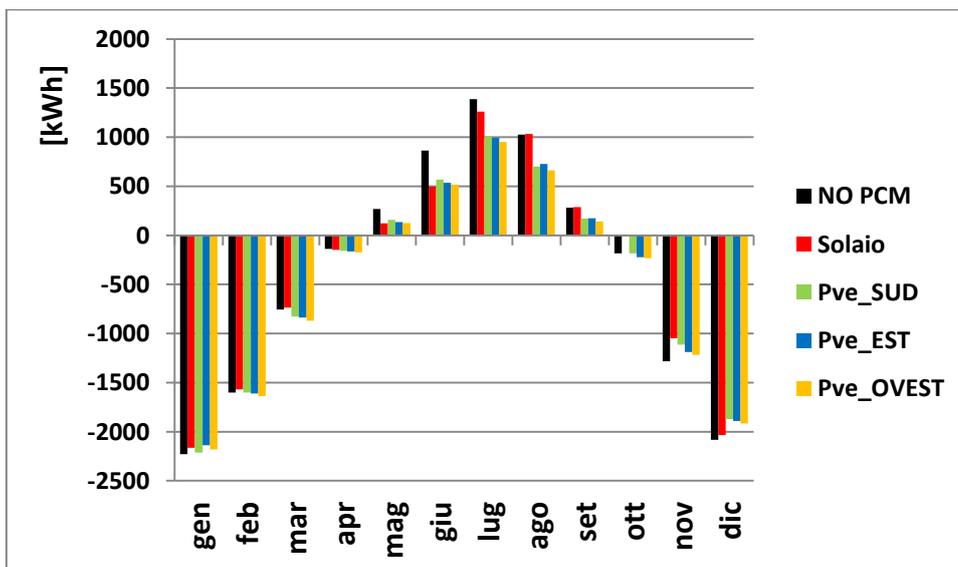


Figura 3. 96 - Fabbisogni mensili di energia richiesti al variare del montaggio: caso studio Milano

Come si vede dai grafici, il contributo del calore latente prodotto dal PCM si registra da Maggio a Gennaio/Febbraio nel caso di PCM inserito nelle pareti esterne, con alcune variazioni in funzione dell'esposizione; mentre il caso in cui il materiale a cambiamento di fase è integrato all'interno del solaio interpiano comporta una riduzione dei fabbisogni nei mesi intermedi (Maggio, Giugno, Luglio, Ottobre e Novembre); nei restanti mesi dell'anno il PCM non riesce a cambiare fase poiché si trova sempre in fase liquida o solida e le piccole riduzioni/aumenti del fabbisogno sono dovute essenzialmente all'accumulo di tipo sensibile. In particolare nel mese di Ottobre si nota un completo abbattimento della richiesta energetica a Milano e nel mese di Novembre a Cosenza e a Roma nel caso di PCM collocato nelle superfici interne. Questo è possibile visualizzarlo anche nelle Tabella 3. 27, Tabella 3. 28 e Tabella 3. 29, rappresentative delle tre località oggetto di studio, in cui sono riportate le riduzioni percentuali dei fabbisogni mensili nelle diverse tipologie di montaggio. Ad Ottobre a Milano si ha, infatti, una riduzione del 100 % del fabbisogno, mentre a Novembre, a Cosenza e a Roma, è pari al 98 % e 90 % rispettivamente. In tutte le località segue poi il mese di Maggio con una riduzione del 49 %, 51 % e 54 % rispettivamente a Cosenza, Roma e Milano. Per quanto concerne il caso in cui il PCM posizionato nelle pareti esterne il mese con le migliori performance è, per tutte le esposizioni, Maggio con riduzioni percentuali del fabbisogno che vanno dal 27 %, a Cosenza per l'esposizione Sud, al 53 %, a Milano per l'esposizione Ovest. I valori non presenti nella tabella sono quelli relativi ai casi in cui il fabbisogno in assenza di PCM è pressoché nullo e quindi la modifica indotta dalla presenza di PCM, anche se piccola, porta a variazioni percentuali del fabbisogno mensile elevate, che non sono quindi indice di performance in quel mese.

	COSENZA			
	Solaio	Pve_SUD	Pve_EST	Pve_OVEST
Gen	3.5%	7.6%	11.3%	8.9%
Feb	2.9%	-0.5%	4.8%	-2.3%
Mar	3.7%	-4.8%	-4.4%	-13.6%
Apr	-	-	-	-
Mag	49.3%	26.9%	33.6%	38.1%
Giu	26.4%	18.2%	20.7%	23.6%
Lug	2.1%	20.6%	21.6%	24.3%
Ago	0.0%	20.6%	18.5%	22.6%
Set	-1.3%	23.3%	21.0%	26.8%
Ott	-	-	-	-
Nov	98.3%	17.3%	-3.3%	-6.9%
Dic	13.7%	19.7%	12.1%	9.7%

Tabella 3. 27 - Riduzioni percentuali dei fabbisogni mensili al variare del montaggio per la città di Cosenza con 15 m3 di PCM e considerando la PMT ottima estiva

	ROMA			
	Solaio	Pve_SUD	Pve_EST	Pve_OVEST
Gen	3.3%	5.3%	11.4%	8.5%
Feb	2.7%	-2.8%	-0.7%	-5.4%
Mar	4.9%	-12.4%	-13.4%	-21.7%
Apr	-	-	-	-
Mag	51.9%	30.8%	38.0%	42.1%
Giu	32.2%	24.0%	26.5%	30.3%
Lug	3.0%	21.6%	22.9%	25.5%
Ago	-0.1%	25.8%	24.2%	28.6%
Set	-1.4%	27.1%	24.7%	31.7%
Ott	-	-	-	-
Nov	89.7%	18.8%	4.3%	0.0%
Dic	4.3%	18.3%	11.5%	9.1%

Tabella 3. 28 - Riduzioni percentuali dei fabbisogni mensili al variare del montaggio per la città di Roma con 15 m3 di PCM e considerando la PMT ottima estiva

	MILANO			
	Solaio	Pve_SUD	Pve_EST	Pve_OVEST
Gen	2.9%	0.7%	4.0%	2.1%
Feb	2.1%	0.0%	-0.7%	-2.4%
Mar	2.8%	-9.2%	-10.7%	-15.0%
Apr	-4.7%	-11.8%	-16.5%	-24.4%
Mag	54.3%	41.4%	49.0%	52.7%
Giu	42.3%	34.3%	38.1%	40.3%
Lug	9.1%	27.5%	28.4%	31.6%
Ago	-0.4%	31.6%	29.1%	35.4%
Set	-1.4%	39.9%	38.6%	50.5%
Ott	100.0%	0.7%	-21.5%	-26.2%
Nov	18.1%	13.2%	7.2%	4.8%
Dic	2.4%	10.3%	9.3%	8.1%

Tabella 3. 29 - Riduzioni percentuali dei fabbisogni mensili al variare del montaggio per la città di Milano con 15 m3 di PCM e considerando la PMT ottima estiva

### Fabbisogni Annuali

Lo studio è stato condotto per tutte le località, considerando la PMT ottima estiva relativa a ciascun caso, in particolare vengono raccolti i valori percentuali delle riduzioni del fabbisogno energetico per il caso della città di Roma: Figura 3. 97 caso estivo e Figura 3. 98 caso invernale.

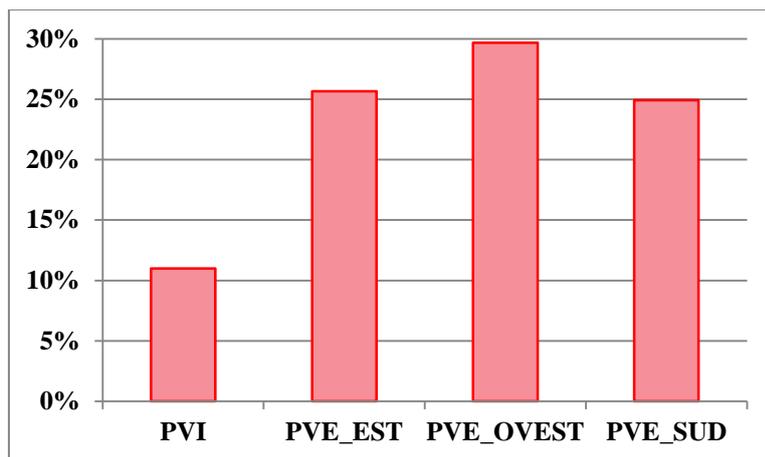


Figura 3. 97 - Riduzione del fabbisogno energetico estivo: Roma, 15 m3 di PCM.

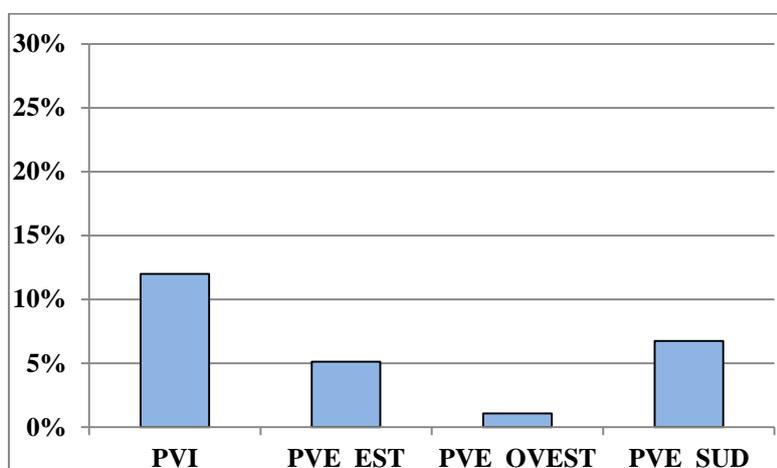


Figura 3. 98 - Riduzione del fabbisogno energetico invernale: Roma, 15 m3 di PCM.

Come si può vedere, nella stagione di raffrescamento la miglior soluzione di montaggio è quella secondo cui il PCM viene inserito nell'involucro esterno, in particolare nelle pareti esposte ad Ovest, alla quale corrisponde una riduzione del 30 % circa con una PMT ottima estiva pari a 21 °C; quella che invece comporta il minor risparmio corrisponde al caso in cui il PCM viene inserito nelle partizioni interne (solo l'11 %) fissando la temperatura di melting a 25 °C. La situazione è completamente opposta nel caso della stagione invernale dove la miglior soluzione di montaggio è proprio quella che prevede l'aggiunta di PCM nelle partizioni interne e che provoca una riduzione del 18 %, mentre la peggiore è proprio quella delle pareti esposte ad Ovest per la quale si registra solo l'1 % del risparmio. L'integrazione del PCM nelle pareti esterne esposte ad Est e Sud permette di ottenere rispettivamente il 26 % e il 25 % circa per il caso estivo, il 5 % e 7 % circa per quello invernale.

	Cosenza		Roma		Milano	
	Inverno	Estate	Inverno	Estate	Inverno	Estate
solaio	12.8%	9.8%	12.2%	11.4%	7.0%	16.4%
Pve_Sud	8.2%	21.3%	6.4%	24.9%	3.8%	32.0%
Pve_Est	6.7%	21.9%	5.1%	25.7%	2.6%	33.0%
Pve_Ovest	2.3%	25.6%	1.1%	29.7%	0.5%	37.5%

Tabella 3. 30 - 17Riduzioni percentuali dei fabbisogni al variare del montaggio per le tre città e per le due stagioni di climatizzazione: 15 m3 di PCM

Analizzando la Tabella 3. 30 le stesse considerazioni possono essere fatte a Cosenza, dove si riscontra in assoluto la massima riduzione del fabbisogno di energia in inverno attraverso il montaggio nel solaio e a Milano, dove, invece, si hanno in assoluto le maggiori performance estive se il PCM è collocato nelle pareti esterne esposte a Ovest.

### Attenuazione e sfasamento

Infine, nelle Figura 3. 100 e Figura 3. 101 vengono riportati i profili di temperatura superficiale interna delle pareti esterne esposte a Sud ed Est collocate nelle zone C e Ovest nella zona P (Figura 3. 102), mettendo a confronto le diverse tipologie di integrazione di PCM nelle pareti dell'edificio. Per una facile individuazione della localizzazione delle zone prima citate si riporta in Figura 3. 99 una rappresentazione comprensiva della pianta dell'edificio in esame.

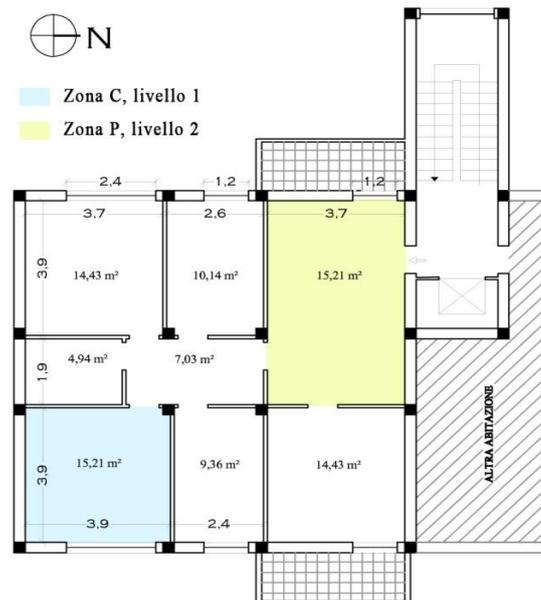


Figura 3. 99 - Individuazione in pianta delle zone climatiche C e P

La simulazione è stata condotta per un giorno rappresentativo della stagione di raffrescamento (16 Giugno).

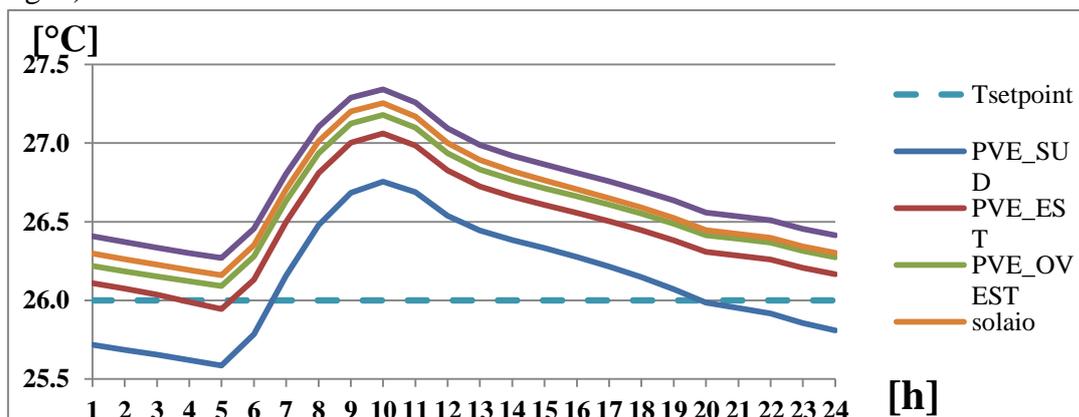


Figura 3. 100 - Andamento della temperatura superficiale interna della parete esposta a Sud della zona C al variare del montaggio del PCM

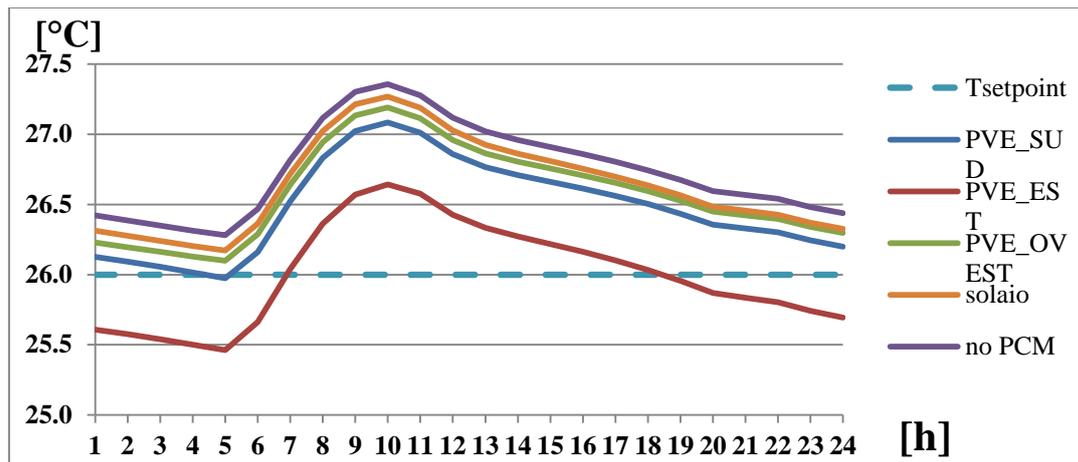


Figura 3. 101 - Andamento della temperatura superficiale interna della parete esposta a Est della zona C al variare del montaggio del PCM

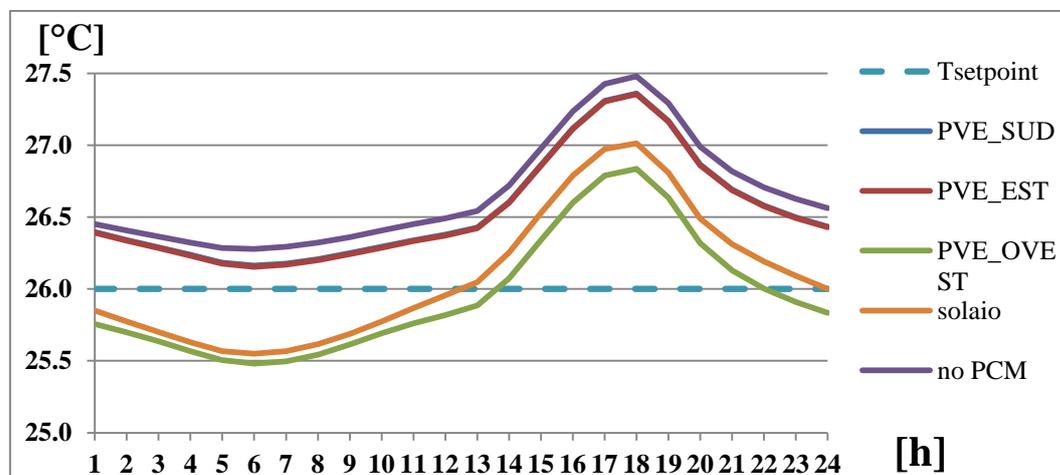


Figura 3. 102 - Andamento della temperatura superficiale interna della parete esposta a Ovest della zona P al variare del montaggio del PCM

Analizzando i profili di temperatura relativi alle pareti esposte a Sud e a Est della zona climatica C, si nota che inserendo il PCM nel solaio questo non produce rilevanti effetti in termini di attenuazione del picco. Per la superficie esposta a Sud si ottiene una riduzione del picco di 0.5 °C con PCM inserito nella stessa parete, lo stesso valore si ottiene per la parete esposta a Est con PCM integrato nella superficie stessa di cui stiamo determinando la temperatura. È importante notare che, nonostante il PCM venga inserito nelle pareti esposte ad Ovest, e quindi in superfici non afferenti alla stanza C, questo riesce comunque a indurre una maggior riduzione, anche se di poco, rispetto al caso in cui il PCM viene inserito nel solaio della zona climatica in questione. Invece, per quanto riguarda la parete esposta a Ovest della zona P (Figura 3. 102), rimane fermo il fatto che i miglior benefici in termini di riduzione si hanno quando il PCM è integrato nella parete stessa (0.7 °C), ma a differenza dei due casi precedenti, l'aggiunta di PCM nel solaio interpiano comporta maggior riduzione rispetto al caso di PCM inserito nelle pareti esterne esposte a Sud o a Est, i cui profili sono pressoché uguali. Questo diverso comportamento nelle due zone climatiche è dovuto principalmente alla diversa dimensione delle superfici del solaio e delle pareti esterne tra le due zone climatiche. Infatti nella zona P la superficie del solaio è maggiore di quella della zona C.

## **CONCLUSIONI**

L'analisi del contesto energetico odierno ha identificato nel settore edilizio-residenziale una delle principali fonti di consumo energetico e di inquinamento. In tale ambito un elemento costruttivo fortemente interessato da intensi flussi di calore è stato individuato nelle chiusure verticali dell'involucro edilizio. Inoltre, è stato considerato un sistema di accumulo di calore integrato sia negli elementi di involucro esterno che interno al fine di ottenere risparmio energetico. In particolare, lo studio effettuato ha evidenziato le potenzialità che i materiali a cambiamento di fase hanno nel controllo passivo del clima interno degli edifici. Si sono analizzate soluzioni tecniche che prevedono l'inserimento dei PCM nei divisori, nel solaio e nelle pareti esterne. In tutti i casi si è riscontrato un miglioramento delle prestazioni al crescere del volume di PCM utilizzato. Poiché un ruolo fondamentale è svolto dalla temperatura di melting (PMT), è stata determinata quella che minimizza i consumi, per ogni configurazione considerata. Con riferimento all'alloggio preso in esame, è risultato che, se una quantità di PCM di 20 m<sup>3</sup> viene posizionata nelle superfici opache interne, conduce ad una riduzione del fabbisogno estivo del 14% per Cosenza e del 23% per Milano, e ad una diminuzione del fabbisogno invernale di circa il 24% per Cosenza e del 14% per Milano. Nella configurazione che prevede l'inserimento di 15 m<sup>3</sup> di PCM nelle pareti esterne esposte a Sud si è riscontrata una riduzione del fabbisogno estivo del 21% per Cosenza e del 31% per Milano, ma il decremento del fabbisogno invernale è trascurabile. Questi risultati hanno evidenziato che il posizionamento ottimale del PCM deve essere valutato in funzione di alcune variabili, tra le quali il periodo in cui preferisce maggiormente diminuire i consumi, l'esposizione dell'edificio, il clima della località, oltre alla capacità ed alla trasmittanza delle pareti. Il lavoro ha evidenziato che la diminuzione del fabbisogno invernale ed estivo deriva dalle modalità di impiego del PCM, in particolare dal suo posizionamento, dalla PMT e dal volume di PCM utilizzato, valutazioni che devono essere effettuate in funzione della località e dell'edificio in esame.

## **CAPITOLO 4 ELEMENTO IMPIANTISTICO: FOTOVOLTAICO INNOVATIVO**

Lo studio affrontato in questa tesi, in accordo con l'analisi storica dell'energia affrontata nei precedenti capitoli, focalizza l'attenzione sul miglioramento di un sistema energetico, precisamente il convertitore fotovoltaico. Il limite principale dei sistemi fotovoltaici (FV) è la bassa efficienza di conversione delle celle, che è fortemente influenzata dalla loro temperatura di esercizio. Quando la temperatura aumenta la corrente di corto circuito ( $I_{sc}$ ) aumenta moderatamente, mentre la tensione a circuito aperto ( $V_{oc}$ ) diminuisce notevolmente. La riduzione di temperatura della cella è una metodologia utile che potrebbe essere utilizzata per migliorare la performance di pannelli fotovoltaici sia nuovi che già installati. Questa soluzione è particolarmente interessante per ambienti ad alti livelli di insolazione e di temperatura esterna dell'aria durante il giorno. Inoltre, questa soluzione è un'alternativa ai sistemi PVT (Thermal - fotovoltaico) nei quali il flusso d'acqua deve essere raffreddato durante le ore dove la radiazione solare è massima con lo scopo di non peggiorare le prestazioni dei pannelli. Lo scopo di questo lavoro è di valutare le prestazioni di diversi sistemi di raffreddamento integrati ad un sistema fotovoltaico. In particolare soluzioni che adottano rispettivamente un sistema di raffreddamento ad acqua di raffreddamento e un flusso d'aria lambisce la retro dei pannelli in un circuito aperto viene analizzata per individuare la migliore soluzione di raffreddamento. Elementi finiti di software che descrive con estremo dettaglio lo scambio termico tra le celle fotovoltaiche, l'ambiente esterno e il sistema di raffreddamento è usata per valutare la temperatura raggiunta delle cellule con differenti configurazioni di sistema di raffreddamento calcolare per ogni caso considerati il coefficiente complessivo perdite termiche. Sulla configurazione del sistema di raffreddamento dell'aria, che risulta meno invasiva, un confronto tra la simulato e la misurata con prove di laboratorio, è stato condotto velocità dell'aria. Simulazioni orarie Energia per le migliori configurazioni che utilizzano i software TRNSYS sono effettuate per valutare le prestazioni annuali.

### **4.1 Introduzione**

Si può certamente affermare che il 2010 sia stato un altro anno di straordinario successo per il fotovoltaico. A livello mondiale la potenza cumulata ha raggiunto i 38,4 GW, con 14,9 GW installati proprio nel 2010 (il 39% del totale cumulato). L'Europa guida la classifica delle aree geografiche per installazioni con 25,6 GW di potenza cumulata, dei quali ben 12 GW (47% del totale) sono da ascrivere all'anno 2010. In particolare a livello mondiale, la Germania è la nazione leader per potenza installata nel 2010 con 7,2 GW seguita dall'Italia con 2,3 GW e dalla Repubblica Ceca con 1,36 GW. Giappone (1GW), Stati Uniti (0,88 GW) e Francia (0,72 GW) seguono nel ranking mondiale per potenza installata nel 2010 (vedi Figura 4. 1) [82].

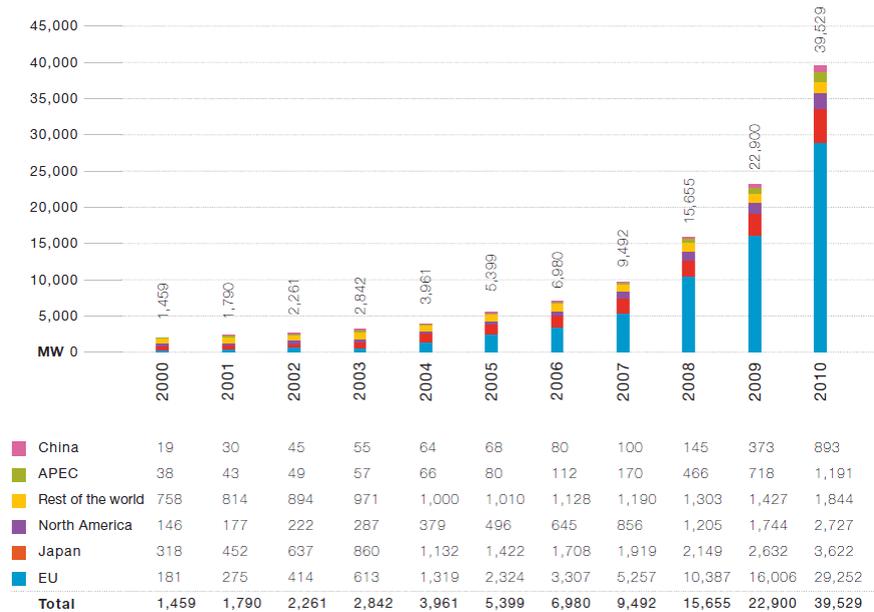


Figura 4. 1 - Capacità fotovoltaica mondiale installata fino al 2010.

La tecnologia “classica” del silicio mono e poli cristallino continua a dominare il mercato con una percentuale, nel 2010, pari all’81% del totale ( in particolare con un 45% per il poli silicio e un 35% per il mono, il restante 1% per altre tecnologie a base di c-Si). La celle di seconda generazione (film sottile) hanno avuto una crescita inferiore alle attese. Le quote di share di mercato per le tre tecnologie principali a film sottile, silicio amorfo (a-Si), Tellururo di cadmio (CdTe) e Diseleniuro di rame e indio ( e gallio) CIGS/CIS, sono state nel 2010 rispettivamente l’8%, il 9% e il 2%. Il prezzo di vendita dei moduli fotovoltaici continua a scendere come già registrato nel 2009 anche se in maniera più contenuta. Era stato registrato un calo del 30 % nel corso del 2009 rallentando nel 2010 attestandosi al 13%, dato l’alto livello della domanda che si è verificato ad opera di paesi come la Germania e l’Italia [81]. A dicembre 2010, il prezzo medio dei moduli al silicio cristallino è stato di circa 1,58 €/W. Il calo è da ascrivere alla forte competizione tra produttori occidentali e asiatici, questi ultimi in possesso di oltre il 50% del mercato mondiale con prezzi di vendita, nel 2010, mediamente del 10-15% più bassi rispetto ai produttori occidentali. La necessità di far fronte a questi prodotti, alcuni molto competitivi anche in termini di qualità, ha innescato il trend di abbattimento del costo dei moduli occidentali con evidenti effetti di mercato (riduzione dei prezzi dei moduli occidentali).Una certa vivacità di attività e mercato è riferibile alla tecnologia del fotovoltaico a concentrazione (C-PV). Molti operatori internazionali, principalmente Stati Uniti, Germania e Spagna, hanno sviluppato sistemi ormai industrializzati o molto vicini alla industrializzazione [81]. Nuovi player, anche in Italia, si stanno focalizzando su questa tecnologia. Si stima che al 2010 la potenza C-PV cumulata si attesti intorno ai 160 MW. Il C-PV ha ovviamente un valore di mercato prospettico. Nei prossimi anni sono attesi importanti passi per una riduzione dei costi e una conseguente crescita di mercato. E’ importante riportare il trend osservato nei prezzi di vendita degli inverter, elemento fondamentale e critico dell’impianto fotovoltaico che, per le correnti installazioni residenziali, pesa per il 10-11% sul costo totale d’impianto. A livello internazionale, nel 2010, si è assistito ad un calo medio dei prezzi degli inverter di circa il 25%. Il costo dell’inverter è legato

alla taglia dell'impianto con importi di circa 0,4 €/W per taglie fino a 5KW, 0,29 €/W da 5 a 10KW e 0,25 €/W tra 10 e 200KW. Per taglie fino a 10 KW la discesa dei prezzi è stata di circa il 20%; calo più sensibile (37%) è stato registrato per gli inverter di taglia maggiore. La produzione mondiale di inverter nel 2010 (potenza totale prodotta 29,8 GW) è guidata dalla Germania con 13,3 GW seguita dall'Italia che ha prodotto inverter per 4,9 GW. Cina (2,3 GW), Danimarca(1,5 GW) e Stati Uniti (1,5 GW) seguono nelle posizioni di rincalzo [83].

#### 4.1.1 Efficienza

L'efficienza di una cella è del 14% – 17% (Figura 4. 2) non solo perché una parte dei fotoni non ha energia sufficiente, ma anche perché:

- 1) non tutti i fotoni incidenti sulla cella penetrano al suo interno (alcuni sono riflessi dalla superficie della cella, altri incidono sulla griglia metallica dei contatti)
- 2) una parte degli elettroni "liberati" dai fotoni non arrivano al carico esterno in quanto trovano lungo il percorso delle cariche di segno opposto con cui ricombinarsi (effetto di "ricombinazione")
- 3) esistono le cosiddette "resistenze parassite": i contatti metallici posti sul fronte e sul retro della cella presentano una resistenza che provoca dissipazioni di potenza.

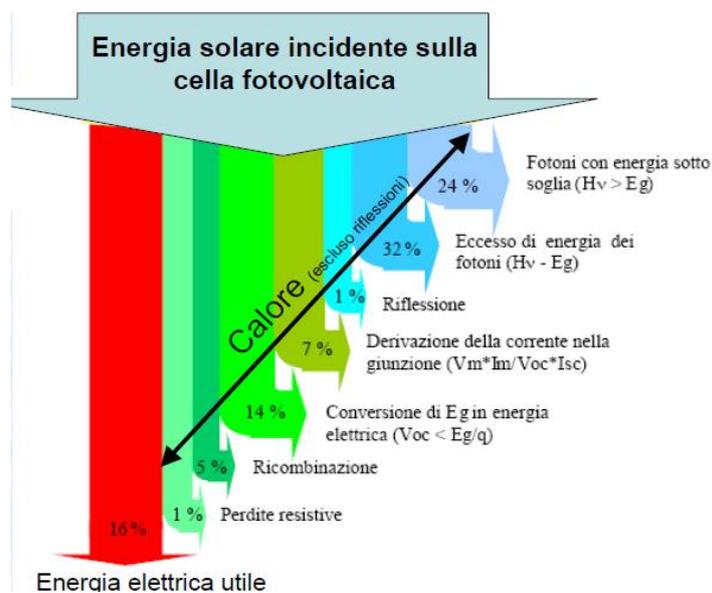


Figura 4. 2 - efficienza della cella.

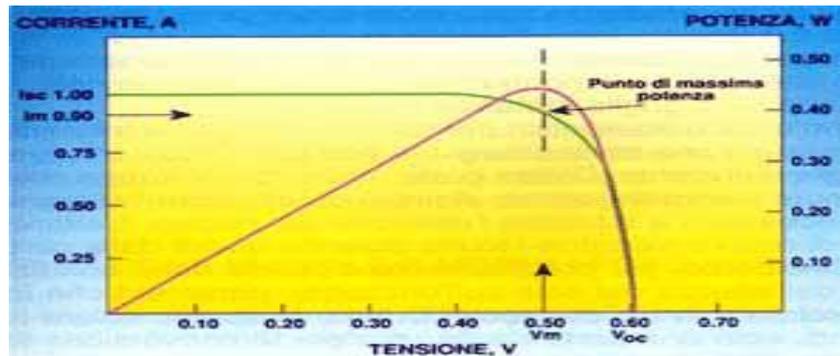


Figura 4. 3 - Caratteristica elettrica di una cella solare e andamento della potenza.

In condizioni di corto circuito la corrente generata è massima ( $I_{sc}$ ) (Figura 4. 3), mentre in condizioni di circuito aperto è massima la tensione ( $V_{oc}$ ). In condizioni di circuito aperto e di corto circuito la potenza estraibile sarà nulla, poiché nella relazione:

$$P = V I$$

Sarà nulla la corrente nel primo caso e nulla la tensione nel secondo caso. Negli altri punti della caratteristica all'aumentare della tensione aumenta la potenza, raggiungendo quindi un massimo e diminuendo repentinamente in prossimità della  $V_{oc}$ .

#### 4.1.2 Bilancio energetico di un pannello fotovoltaico

Per un pannello fotovoltaico può essere scritta una equazione di bilancio energetico, chiaramente la potenza utile è la potenza elettrica fornita [84]. Per una singola cella fotovoltaica si può scrivere la seguente equazione di bilancio energetico istantaneo:

$$P_{cel} = \tau * \alpha * G * A_{cel} - A_{cel} * U_c * (T_c - T_a)$$

Dove  $P_{cel}$  è la potenza elettrica fornita dalla cella,  $\tau$  è il coefficiente di trasmissione del vetro,  $\alpha$  è il coefficiente di assorbimento del silicio,  $T_c$  è la temperatura media della cella,  $T_a$  è la temperatura dell'aria esterna ed  $U_c$  è il coefficiente di scambio termico tra la cella e l'ambiente esterno. Il secondo termine dell'equazione rappresenta la potenza termica persa. Come è facilmente intuibile, una diminuzione della temperatura di cella porterebbe ad un aumento della potenza elettrica prodotta poiché la potenza termica persa diminuisce in quanto la differenza di temperatura ( $T_c - T_a$ ) diminuisce. La potenza termica dispersa dal collettore è valutabile con l'equazione:

$$q_p = A_{cel} * U_c * (T_c - T_a)$$

Dove  $U_c$  il coefficiente di perdita globale,  $T_c$  è la temperatura della cella e  $T_a$  è la temperatura ambiente.  $U_c$ , in  $W/m^2 \cdot K$ , è legato alla resistenza globale equivalente  $R_e$  del pannello ed è uguale a:

$$U_c = \frac{1}{R_e * A_c}$$

Dove  $R_e$  è la resistenza equivalente del pannello in  $^\circ K/W$ . Essa è ricavata dal circuito equivalente del pannello riportato in Figura 4. 4:

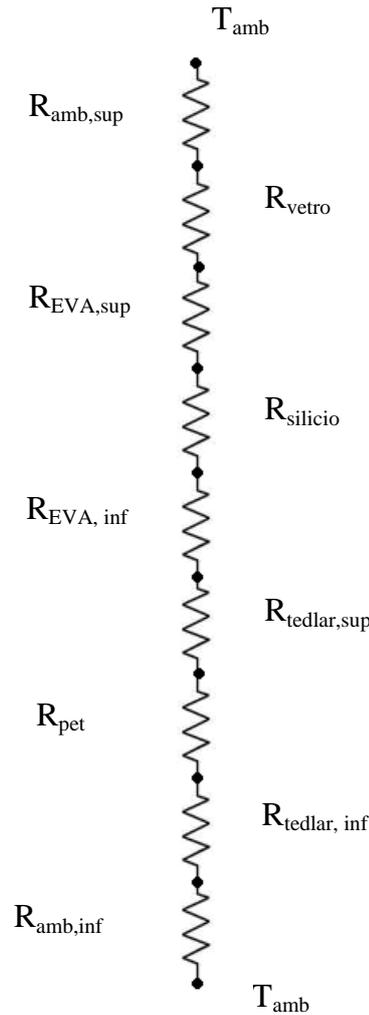


Figura 4. 4 - Collettore solare piano.

Dove  $R_{amb,sup}$  è la resistenza convettiva e radiativa tra l'ambiente e il vetro,  $R_{vetro}$  è la resistenza conduttiva del vetro,  $R_{EVA,sup}$  è la resistenza conduttiva dell'EVA,  $R_{silicio}$  è la resistenza conduttiva del silicio,  $R_{EVA,inf}$  è la resistenza conduttiva dello strato di EVA posto dopo il silicio,  $R_{tedlar,sup}$  è la resistenza conduttiva dello strato di tedlar,  $R_{pet}$  è la resistenza conduttiva del pet,  $R_{tedlar,inf}$  è la resistenza conduttiva del tedlar,  $R_{amb,inf}$  è la resistenza radiativa e convettiva dell'ambiente. Come si nota dalla figura le resistenze laterali, effetti di bordo, sono trascurate, poiché di ordine molto minore rispetto a quelle considerate. Le resistenze incontrate, quindi, sono di tipo radiativo, convettivo e conduttivo. Esse vengono calcolate con le seguenti relazioni:

- Resistenza convettiva:

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv} \cdot A}$$

Dove  $A$  è l'area in  $m^2$  della superficie interessata dallo scambio termico,  $h_{conv}$  è il coefficiente di scambio termico convettivo in  $W/m^2 \cdot ^\circ K$  ricavabile, se si tratta dello scambio termico tra una superficie e l'ambiente dalla relazione empirica:

$$h_{conv} = 2.8 + 3 \cdot v$$

Dove  $v$  è la velocità del vento in  $m/s$ .

- Resistenza conduttiva:

$$R_{cond} = \frac{s}{k \cdot A}$$

Dove  $s$  è lo spessore dello strato nella direzione dello scambio termico in m,  $A$  è l'area della superficie interessata dallo scambio termico e  $k$  è il coefficiente di conduzione termica, caratteristica di ogni materiale in  $W/m^{\circ}K$ .

- Resistenza radiativa:

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{radiat} \cdot A}$$

Dove  $h_{radiat}$  è il coefficiente di scambio termico radiativo, nel caso in esame si riferisce allo scambio termico radiativo tra contenitore, parte posteriore del pannello e, soprattutto vetro con l'ambiente. Esso è calcolabile con la seguente relazione:

$$h_{radiat} = \varepsilon_{sup} * \sigma * (T + T_{cielo}) * (T^2 + T_{cielo}^2) * \frac{(T - T_{cielo})}{(T - T_{ambiente})}$$

Dove  $\varepsilon_{sup}$  è l'emissività della superficie,  $\sigma = 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{K^4 * m^2}$  è la costante di Stephan – Boltzmann,  $T$  è la temperatura della superficie considerata in  $^{\circ}K$  e  $T_{cielo} = 0.0552 * T_a^{1.5} + 2.625 * N$ , dove  $T_a$  in  $^{\circ}K$  è la temperatura ambiente e  $N$  è la nuvolosità in ottavi di cielo. Il coefficiente di irraggiamento  $h_R$  è sensibilmente variabile. Molte volte è irrilevante determinare i singoli contributi convettivi e radianti perciò essi vengono valutati congiuntamente mediante il coefficiente di adduzione  $\alpha$  definito come la somma di  $h$  e  $h_R$ .

Infatti la somma delle equazioni:

$$q_{CONV} = h \cdot (T_1 - T_2)$$

$$q_{IRR} = h_R (T_1 - T_2)$$

è:

$$q_{CONV+IRR} = (h + h_R) \cdot (T_1 - T_2) = \alpha \cdot (T_1 - T_2)$$

La legislazione italiana (legge 10/91) prevede, per la progettazione termofisica, l'utilizzo dei coefficienti  $\alpha$  tabulati dalle norme UNI che stabiliscono anche le temperature ambientali di riferimento nelle diverse zone del paese. Naturalmente l'utilizzo di queste formule conduce a risultati tanto più precisi quanto più è piccola la differenza tra le temperature considerate, cosicché l'arco di curva  $q(\Delta T)$  possa essere approssimato al meglio. Nella realtà risulta complicata effettuare un'analisi di questo genere, proprio per questo si utilizzano codici di calcolo e software specifici. Il coefficiente  $U_c$  è, anche, esprimibile come la somma dei tre coefficienti di perdita verso l'alto, il basso e i bordi laterali:

$$U_c = U_a + U_b + U_l$$

Indicando con  $R_p$ ,  $R_a$  ed  $R_l$  in  $K/W$ , rispettivamente resistenza verso il basso, laterale e verso l'alto,  $U_a$ ,  $U_b$  e  $U_l$  sono rispettivamente:

$$U_a = \frac{1}{A_c * R_a}$$

$$U_p = \frac{1}{A_c * R_p}$$

$$U_l = \frac{1}{A_l * R_l}$$

Dove  $A_c$  è l'area del collettore in  $m^2$  e  $A_l$  è l'area laterale in  $m^2$ . Un metodo più semplice di stima del coefficiente  $U_c$  è basato sulla conoscenza della temperatura operativa nominale della cella il cosiddetto NOCT. Questa grandezza è la temperatura di cella, rilevata sperimentalmente, con il modulo disposto nella condizione di lavoro, per una radiazione incidente di  $800W/m^2$ , una velocità del vento di  $1m/s$ , una temperatura ambiente di  $20^\circ C$ , e con il modulo operante a circuito aperto(cioè rendimento nullo). Quindi  $U_c$  è valutato secondo la seguente relazione:

$$U_c = \tau\alpha \frac{800}{NOCT - 20}$$

Dove  $\tau$  è il coefficiente di trasmissione del vetro,  $\alpha$  è il coefficiente di assorbimento del vetro. Il rendimento del pannello è esprimibile secondo la relazione:

$$\eta = \frac{n * P_{cel}}{\tau * \alpha * G * A_{cel}} = \frac{V_p * I_p}{\tau * \alpha * G * A_{cel}}$$

Dove  $P_{cel}$  è la potenza elettrica fornita dalla cella,  $\tau$  è il coefficiente di trasmissione del vetro,  $\alpha$  è il coefficiente di assorbimento del vetro,  $V_p$  è la tensione del pannello, in Volt, e  $I_p$  è la corrente del pannello, in Ampère.

#### **4.2 Sistema di raffreddamento e soluzioni proposte**

Proprio da queste considerazioni da qualche anno sono nati cospicui studi di ricerca per migliorare l'efficienza dei pannelli sfruttando sistemi di raffreddamento. Sono state sperimentate diverse soluzioni: dalla progettazione di alette poste sul retro del pannello che sfruttando la convezione naturale raffreddano la cella, a soluzioni con convezione forzata, a soluzioni che utilizzano film d'acqua direttamente applicato sul pannello.

Tutte queste soluzioni perseguono l'obiettivo di ridurre la temperatura operativa di cella del pannello fotovoltaico. In particolare, Krauter et al. hanno studiato gli effetti del raffreddamento sulla produzione di potenza elettrica considerando un sistema che utilizzava un film d'acqua che lambiva la parte superiore del pannello [85]. I risultati mostrano un miglioramento delle prestazioni ottiche del 1,5 % e un incremento della resa energetica elettrica nell'arco della giornata considerata del 10,3 % rispetto allo stesso sistema fotovoltaico senza raffreddamento. Amery et al hanno indagato il raffreddamento spruzzando acqua nebulizzata sulla parte superiore del pannello, questo sistema permette di sfruttare al meglio il calore ceduto per il cambio di fase, in quanto essendo l'acqua nebulizzata l'evaporazione è accelerata e migliorata rispetto al sistema utilizzante un film sottile registrando un aumento dell'efficienza del 3,26 % e delle prestazioni ottiche del 1,8% [86]. Un grosso svantaggio di questi sistemi deriva dal modo di utilizzare il liquido refrigerante. L'acqua essendo in contatto con il vetro del pannello, appunto, deve possedere un grado di purezza elevato per non ledere la qualità della superficie del vetro di copertura, il quale, chiaramente, deve mantenere le sue proprietà di trasmissione della radiazione solare incidente almeno per la vita utile del pannello, circa venti anni. In questo pullulare di soluzioni, nasce l'idea di accoppiare al pannello un sistema di raffreddamento tale per cui il surplus di energia creato dal pannello, grazie all'accoppiamento con il sistema di

raffreddamento, sia tale da garantire il funzionamento del sistema di raffreddamento stesso e sia di fornire energia elettrica ulteriore a quella nominale. I consumi di un sistema di raffreddamento sono ingenti e dipendono da molte variabili, dalla scelta del fluido termovettore, che detterà i consumi del sistema di circolazione, ai materiali usati, alla scelta dei canali, materiali e geometrie. Si tratta, quindi, di trovare una via di mezzo tra le varie soluzioni ingegneristiche conosciute e successivamente tentare di affinare la tecnologia scelta in modo tale da renderla il più efficace possibile allo scopo. In particolare, questa ricerca cercherà di trarre delle conclusioni sul migliore sistema di raffreddamento per pannelli fotovoltaici applicabile a impianti già esistenti cercando di arrivare alla soluzione migliore secondo un criterio di ragionamento basato su considerazioni termofisiche, pratiche e senza ledere la struttura del pannello. Infatti, oltre i vincoli fluidodinamici, di trasmissione del calore ed economici vi sono anche vincoli pratici. Il pannello non può essere modificato o meglio non si possono effettuare forature, o altro, che lesioni o, addirittura, rivoluzioni la struttura del pannello per via della garanzia di cui godono i pannelli stessi. Sostanzialmente, il sistema di raffreddamento dovrà adattarsi alla struttura del pannello così come montato. Quindi non potrà essere sviluppato verso il basso e dovrà ingombrare il meno possibile. Per la realizzazione del lavoro è stato utilizzato un software multi fisico ai volumi finiti. Oggi questi software sono indispensabili per il lavoro complesso di ricerca o la semplice progettazione. La descrizione del software è stata affrontata già precedentemente. È stata effettuata un'analisi energetica in termini di producibilità ed efficienza annuale utilizzando il software TRNSYS anch'esso descritto in precedenza. Di seguito si riporta la descrizione del modello creato sul software multifisico e del type utilizzato per l'analisi energetica annuale.

#### 4.2.1 Il fenomeno della Convezione

Con il termine “convezione termica” si intende un fenomeno di scambio di calore tra una superficie solida e un fluido in moto rispetto ad essa. Si abbia un fluido in moto su una superficie di area  $A$ . La superficie sia alla temperatura uniforme  $T_s$ , mentre il fluido si trovi ad una temperatura  $T_f$ . Se la superficie e il fluido si trovano a diversa temperatura, vi sarà scambio termico per convezione:

$$q^* = dq/dA = h (T_s - T_f)$$

*relazioni di Newton*

$$q = h A (T_s - T_f)$$

$h$  è il coefficiente di scambio termico locale per convezione [ $W/(m^2 K)$ ]. La convezione termica riguarda un processo di scambio termico di conduzione in un fluido potenziata dal trasporto convettivo. Si abbia ad esempio uno strato di fluido di spessore  $L$  in moto rispetto ad una parete:

$$q^* = h (T_s - T_f)$$

Se il fluido fosse in quiete:

$$q^* = k / L (T_s - T_f)$$

dove  $k$  è la conducibilità del fluido.

Dalla definizione del numero di Nusselt:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k}$$

dove  $L$  rappresenta una lunghezza caratteristica del sistema (m),  $h$  è il coefficiente di scambio termico convettivo ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  $k$  è la conducibilità termica del fluido ( $\text{W}/\text{mK}$ ). Il *numero di Nusselt* ( $Nu$ ) rappresenta il rapporto tra il calore trasmesso per convezione e quello trasmesso per conduzione in un fluido a parete.

$$Nu = \frac{\text{scambio per convezione}}{\text{scambio per conduzione}} = \frac{hA(T_{aw} - T_w)}{kA \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{y=0}} \equiv \frac{hL^2 \Delta T}{kL^2 \frac{\Delta T}{L}} = \frac{hL}{k}$$

La conoscenza del  $Nu$  è di fondamentale importanza nello studio dei fenomeni di scambio termico, in quanto permette di determinare il coefficiente di convezione  $h$ . Il  $Nu$  viene spesso determinato mediante correlazioni sperimentali che ne esprimono il valore in funzione degli altri gruppi adimensionali. In particolare, dopo lo studio e l'analisi di alcuni casi si è potuto generalizzare la struttura del numero di Nusselt:

$$Nu = CR_g^a G_R^b P_R^c \left( \frac{\bar{X}}{L} \right)^d + D$$

La struttura è simile ad un'analisi dimensionale, se si esclude il coefficiente  $D$  che in effetti appare solo in rari casi. Gli esponenti  $a, b, c, d$ , e la costante correttiva  $C$  devono essere determinati caso per caso in funzione delle condizioni e dei campi di validità del problema. Successivamente verranno illustrati i valori dei coefficienti in base al problema da risolvere.  $L$  è la lunghezza del condotto ed  $X$  è il vettore posizione. Esistono due categorie di problemi nei quali il numero di Nusselt è indipendente dal coefficiente di convezione, e scompare la dipendenza spaziale, cioè  $d=0$ :

1. Aspettare che il regime del fluido si sia completamente sviluppato, come nel problema risolto da Dittus e Boelter.
2. Quando lo scambio di calore non è omogeneo, cioè fluido e parete hanno quantità di calore scambiato diverse in zone di contatto diverse.

In questi tipi di problemi è necessario definire un coefficiente di convezione medio  $h_m$  e ricavare così un numero di Nusselt medio  $N_U$ .

$$h_M = \frac{\int_S h ds}{S}$$

Quindi, un elevato numero di Nusselt indica che il processo di convezione termica è molto efficiente rispetto al caso dello scambio termico per sola conduzione nel fluido. Obiettivo dell'analisi dei fenomeni di convezione termica è la valutazione del coefficiente di scambio termico  $h$ . Si distinguono vari tipi di convezione:

- *Convezione forzata*: il fluido è in movimento con velocità imposta da un propulsore esterno; il campo di moto cioè è indipendente dal fenomeno termico.
- *Convezione naturale*: il campo di moto è diretta conseguenza dei fenomeni di scambio termico. In presenza di forze di massa (come la gravità), il movimento del

fluido è provocato da gradienti locali di densità, indotti da differenze di temperatura tra la superficie del corpo e il fluido.

- *Convezione mista*: entrambi gli effetti, dovuti al campo di moto imposto dall'esterno e alle spinte di galleggiamento possono essere importanti.

Un indicatore del tipo di convezione è il rapporto tra numero di Grashof e quello di Reynolds. Il numero di Reynolds è:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{\rho L}{\nu}$$

dove  $L$  rappresenta una lunghezza caratteristica del sistema (m),  $u$  è la velocità del fluido (m/s),  $\mu = \nu \rho$  è la viscosità cinematica del fluido ( $m^2/s$ ),  $\rho$  è la densità del fluido ( $kg/m^3$ ) e  $\nu$  è la viscosità dinamica ( $Pa \cdot s$ ). Il *numero di Reynolds* ( $Re$ ) rappresenta il rapporto tra le forze di inerzia e le forze viscosi, entrambe riferite al fluido per il quale esso è calcolato:

$$Re = \frac{\text{forze d'inerzia}}{\text{forze viscosi}} = \frac{m \cdot a}{\mu \left( \frac{du}{dL} \right) L^2} \equiv \frac{\rho L^3 \frac{u}{T}}{\mu \frac{u}{L} L^2} \equiv \frac{\rho u \frac{L}{T}}{\mu \frac{u}{L}} \equiv \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{\rho L}{\nu}$$

Fisicamente il  $Re$  indica quanto il fluido sia veloce rispetto alla sua resistenza viscosa. Nello studio della convezione forzata il  $Re$  contiene principalmente l'informazione "velocità". Per piccoli valori del numero di Reynolds, le forze viscosi prevalgono sulle forze d'inerzia. Le forze viscosi impediscono le rapide e casuali fluttuazioni del fluido. Il numero di Reynolds è, anche, indice del tipo di moto (laminare/turbolento) del fluido.

Il numero di Grashof è:

$$Gr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2}$$

Rappresenta un gruppo adimensionale utilizzato in fluidodinamica per misurare gli effetti delle forze di galleggiamento di un fluido rispetto agli effetti viscosi. Dove  $g$  è l'accelerazione di gravità ( $m/s^2$ )  $\beta$  è il coefficiente di comprimibilità isobarica ( $1/K$ ),  $T_\infty$  è la temperatura del fluido sufficientemente lontano dalla sorgente di calore (K),  $T_s$  è la temperatura della sorgente di calore (K),  $L$  è la lunghezza caratteristica del corpo (m) e  $\nu$  è la viscosità cinematica del fluido ( $m^2/s$ ). Inoltre esso regola il regime di flusso in convezione naturale. Oltre la formulazione proposta, il numero di Grashof può essere espresso come:

$$Gr = \frac{\text{forze di galleggiamento}}{\text{forze viscosi}} = \frac{g \cdot \Delta \rho \cdot V}{\rho \cdot \nu^2} = \frac{g \cdot \beta \Delta T \cdot V}{\rho \cdot \nu^2} = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2}$$

Il numero di Grashof fornisce il principale criterio per stabilire in convezione naturale se il flusso è laminare o turbolento. Svolge in convezione naturale lo stesso ruolo che svolge il numero di Reynolds in convezione forzata. Per piastre verticali il flusso diventa turbolento per numeri di Grashof maggiori di  $10^9$ .

Il rapporto di questi due numeri può essere:

1)

$$\frac{G_r}{R_g^2} \gg 1 \rightarrow a = 0$$

La convezione è naturale, sono preponderanti le forze di galleggiamento definite da  $G_R$ . Possiamo quindi assumere che nella formula precedente che l'esponente  $a$  sia nullo.

2)

$$\frac{G_r}{R_g^2} \ll 1 \rightarrow b = 0$$

La convezione è forzata. Le forze di galleggiamento sono trascurabili perché la densità del fluido subisce piccole variazioni, o perché le forze esterne sovrastano la condizione di convezione naturale. Possiamo, in analogia con quanto fatto prima, considerare nullo l'esponente  $b$ , in modo da eliminare dalla equazione precedente il numero di Grashof che indica convezione naturale.

3)

$$\frac{G_r}{R_g^2} \cong 1$$

La convezione è mista e il problema può essere risolto con l'analisi di entrambi i casi. I problemi in cui il fluido è in condizione di convezione forzata, sono più facilmente risolvibili, infatti una volta ottenuta la velocità fluidodinamica si può calcolare lo scambio termico. Nella convezione naturale il problema è più complesso perché la velocità del fluido e lo scambio termico sono una funzione dell'altro. Si intende che se si vogliono capire fino in fondo i meccanismi della convezione, poiché essa dipende dal tipo di moto, bisogna capire cosa succede da un punto fluidodinamico. La trasmissione di energia per convezione da una superficie, la cui temperatura è superiore a quella del fluido (liquido o gas) circostante, avviene principalmente secondo due stadi:

- 1) Inizialmente, il calore passa per conduzione dalla superficie alle particelle di fluido più vicine, in modo tale che l'energia così trasmessa faccia aumentare l'energia interna e la temperatura delle particelle;
- 2) Tali particelle "riscaldate" si spostano verso una regione del fluido a temperatura minore e si mescolano con esso: in tal modo, esse cedono, ancora per conduzione, parte della propria energia alle particelle più fredde.

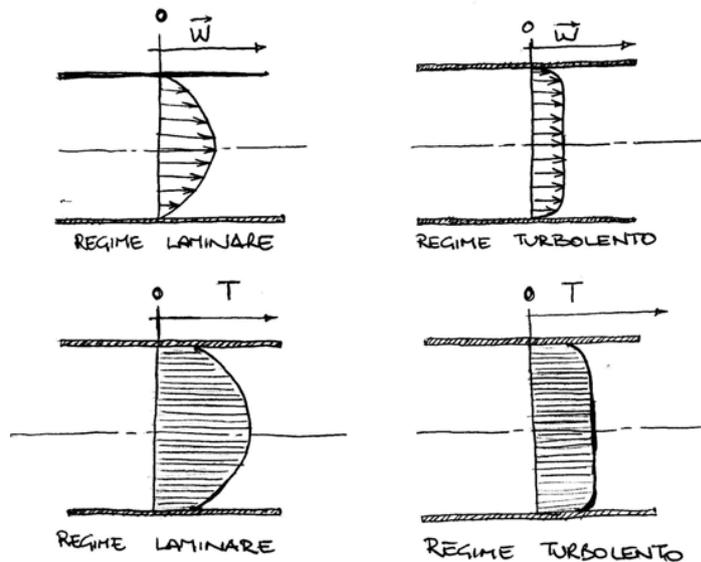


Figura 4.5 - Profilo velocità e temperatura in un condotto, condizione di moto turbolento e laminare.

La configurazione di moto turbolento è pertanto maggiormente desiderabile in applicazioni ingegneristiche. Tuttavia l'aumento dello sforzo tangenziale  $\tau$  richiede un aumento della potenza richiesta per le pompe o i ventilatori. L'instaurarsi di uno o l'altro regime è legato alla particolare condizione del sistema in esame ossia alle proprietà del fluido, densità  $\rho$ , viscosità  $\mu$ , al valore della velocità  $w$ , alla rugosità superficiale della superficie con cui il fluido è a contatto, alle caratteristiche geometriche del sistema considerato attraverso a sua una dimensione caratteristica  $d$ , il diametro equivalente. Questa grandezza è di fondamentale importanza, poiché per quanto riguarda il moto all'interno dei condotti, la lunghezza caratteristica da utilizzare nell'espressione del numero di Nusselt è proprio il diametro equivalente:

$$Nu = \frac{h \cdot D_{eq}}{k}$$

La definizione di questo parametro è abbastanza complessa. Si consideri il caso di un fluido in moto in un condotto molto lungo:

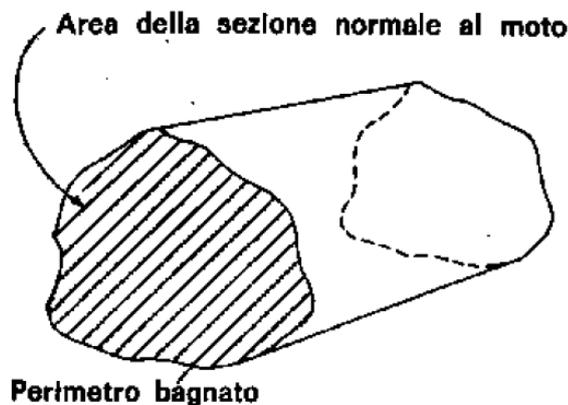


Figura 4.6

Con riferimento alla figura, la definizione del diametro equivalente è la seguente:

$$D_{eq} = 4 \frac{\text{area della sezione normale al moto}}{\text{perimetro bagnato}}$$

Nella pratica, comunque, il numero di Nusselt viene calcolato con delle correlazioni sperimentali pendenti da Reynolds e dal numero di Prandtl se la convezione è forzata.

- Correlazione di Kays e Crawford:

$$Nu = 0.0155 Re^{0.83} Pr^{0.5}$$

In particolare il numero di Prandtl è

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$

dove  $\mu$  è la viscosità cinematica del fluido,  $c_p$  è il calore specifico a pressione costante (J/kg K),  $k$  è la conducibilità termica del fluido (W/mK). Il numero di Prandtl ( $Pr$ ) rappresenta il rapporto tra la diffusività molecolare e la diffusività termica di un fluido.

$$Pr = \frac{\text{diffusività molecolare}}{\text{diffusività termica}} = \frac{\mu / \rho}{\lambda / c_p \rho} = \frac{\mu c_p}{k}$$

Il numero di Prandtl è un numero caratteristico del fluido, esso non dipende dalla velocità o altro. Il numero di Prandtl è indice degli spessori degli strati limite di velocità e di temperatura. Per capire il significato del numero di Prandtl analizziamo alcuni fluidi, in particolare numeri di Prandtl risultano:

- Meno di 0.01 per metalli liquidi, quindi il calore diffonde velocemente.
- Oltre 100000 per oli pesanti, quindi il calore diffonde lentamente.
- Per i gas è circa pari a 1. In particolare per l'aria è  $Pr = 0.7$ .
- Per l'acqua,  $Pr = 10.0$  circa.

Quindi, il formarsi della turbolenza è vincolato al rapporto tra forze di inerzia e forze viscosive: se questo è a favore delle prime, il regime di moto che si instaura è turbolento. In ogni caso il regime di moto può essere individuato da un parametro adimensionale che tiene conto di tutte queste grandezze e che corrisponde proprio al rapporto tra forze di inerzia e forze viscosive ossia dal numero di Reynolds:

$$Re = \frac{\rho u D_{eq}}{\mu} = \frac{\rho D_{eq}}{\nu}$$

In linea generale alti valori di  $Re$  corrispondono a moto turbolento bassi valori del numero di Reynolds descrivono moto laminare. E' possibile poi che in punti diversi di un fluido in moto si abbiano regimi di moto differenti. E' quello che succede ad esempio su di una lastra piana lambita da un fluido. Nelle vicinanze della lastra, dopo averne incontrato l'attacco, il fluido modifica il proprio regime di moto e si sviluppa il moto laminare. Lontano dalla lastra se la velocità è sufficientemente elevata si avrà invece una regione di moto turbolento pienamente sviluppato.

Come ci si aspetta nel momento in cui il fluido entra in un condotto, sia la velocità che la temperatura hanno valori definiti molto diversi da quelli della parete, si presentano, perciò, dei gradienti di temperatura e velocità tendenti all'infinito all'imbocco, con la tendenza a stabilizzarsi

man mano che il fluido entra nel condotto. Essi sono importanti se  $x/D < 50$ . Dove  $x$  è la coordinata spaziale e  $D$  è il diametro del condotto.

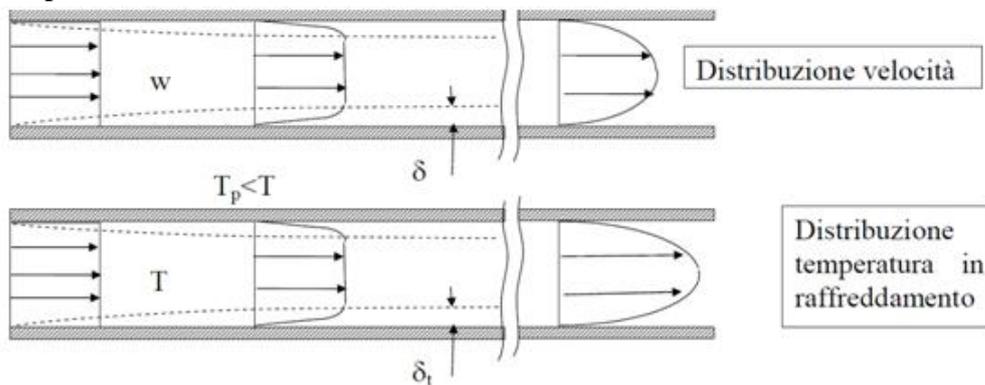


Figura 4. 7 - Evoluzione profilo di velocità e di temperatura in un condotto.

Il flusso termico convettivo all'interno dei condotti (Figura 4. 7) è espresso con la seguente relazione:

$$q^* = h (T_s - T_f) = h (T_s - T_m)$$

dove  $T_s$  è la temperatura della parete,  $T_f$  è la temperatura del fluido,  $h$  è il coefficiente di scambio termico convettivo e  $T_m$  è la temperatura media. La temperatura media a cui facciamo riferimento nei nostri calcoli è la *temperatura media di massa*: valore di temperatura ottenuto come media sulle capacità termiche di flusso locali sulla sezione di passaggio. È facile immaginarsi come nel caso di un fluido che scorre lungo un condotto la temperatura dello stesso non si livella, ma varia; in particolare, ci sono variazioni sia lungo la direzione del moto del fluido sia, nella direzione del flusso termico. Quindi, la scelta di  $T_s$  è condizionata da questi effetti. Si potrebbe scegliere, in una data sezione trasversale del condotto, la temperatura del fluido sull'asse. Tuttavia, ci sono due problemi:

- 1) Tale temperatura è difficile da misurare;
- 2) Questa temperatura non è affatto una misura della variazione di energia interna di tutto il fluido che scorre nel condotto.

Convenzionalmente, allora, si sceglie come temperatura di riferimento del fluido da usare nell'equazione precedente, la temperatura media di massa o *temperatura di mescolamento adiabatico*. Essa è definita come: temperatura che il fluido, passato in un certo tempo attraverso la sezione trasversale al moto, assumerebbe se fosse raccolto e mescolato in un recipiente. L'uso di questa temperatura consente di fare rapidamente i bilanci termici: infatti, nell'ipotesi di *regime premanente*, la variazione di temperatura di massa tra le due sezioni di un condotto consente di scrivere subito che:

$$q = mc_p (T_{m2} - T_{m1})$$

dove  $m$  è la portata massica [kg/h] e  $c_p$  è il calore specifico a pressione costante [kcal/kg°C]. Da un punto di vista pratico si considera come variazione della temperatura di massa nella direzione del moto, la media aritmetica delle temperature di massa nelle sezioni di ingresso e di uscita del condotto. Questo procedimento è corretto se la temperatura della parete del condotto è costante, ma richiede qualche modifica quando il calore si trasmette tra due fluidi separati da una parete. Di seguito si riporta l'andamento della velocità e del coefficiente locale di convezione nel caso di moto turbolento nelle condotte (Figura 4. 7).

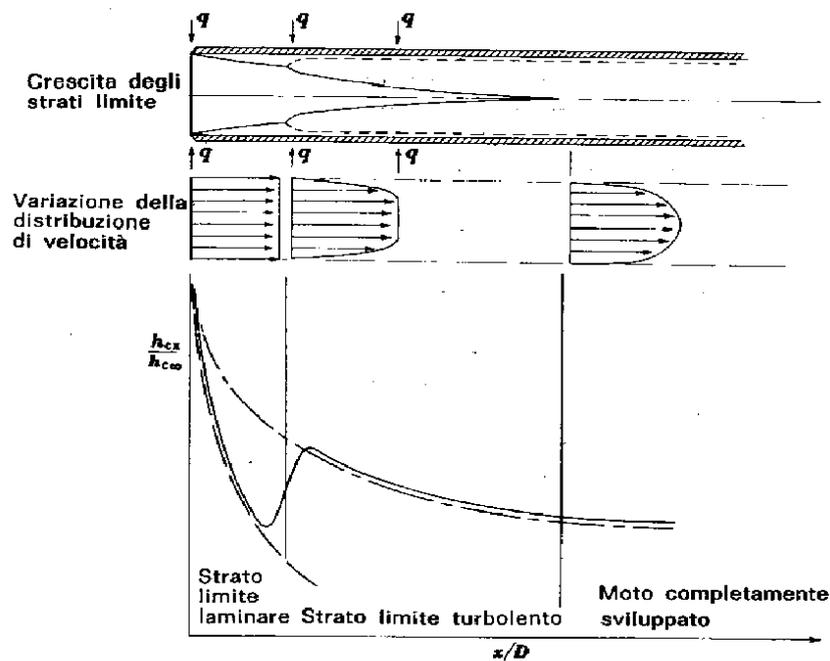


Figura 4. 8 - Evoluzione profilo di velocità e del coefficiente di scambio termico convettivo locale.

Descritti brevemente i fenomeni che regolano la convezione all'interno dei condotti si riporta la tabella che permette il calcolo del numero di Nusselt e quindi il coefficiente di scambio termico convettivo (Tabella 6. 1).

Tab. 5.1. Coefficienti C, a, b, per il calcolo del numero di Nusselt.

Campo Re	Regime			Nu = C * Re <sup>a</sup> * Pr <sup>b</sup>			Note
	ing. dinam.	ing. term.	svilupato	C	a	b	
<2300	•	•		0.289(D/x) <sup>1/2</sup>	0.5	0.33	L<20 D teorico
<2300		•		1.860(D/x) <sup>1/3</sup>	0.33	0.33	
<2300	•	•		0.664(D/x) <sup>1/2</sup>	0.5	0.33	teorico parete piana
3000-30000			•	0.0033	1	0.37	
2700-7000	•	•		0.01(D/x) <sup>0.37</sup>	1	0.37	
>10000	•	•		0.036(D/x) <sup>1/18</sup>	0.8	0.33	
>10000		•		0.032(D/x) <sup>1/20</sup>	0.8	0.37	liquido riscaldato
>10000		•		0.032(D/x) <sup>1/20</sup>	0.8	0.30	liquido raffreddato
>10000		•		0.183(D/x) <sup>1/3</sup>	0.583	0.33	teorico
>10000			•	0.023	0.8	0.40	fluido riscaldato
>10000			•	0.023	0.8	0.30	fluido raffreddato
>10000			•	0.027	0.8	0.33	prodotti petroliferi
12000-220000			•	0.02(D <sub>i</sub> /D <sub>e</sub> ) <sup>0.53</sup>	0.8	0.33	anulare, superficie esterna isolata

Tabella 6. 1

#### 4.2.2 Pannello Fotovoltaico analizzato



Figura 4. 9 - Pannello fotovoltaico DG Energy.

L'analisi è stata effettuata su pannelli fotovoltaici posti a Cosenza (Lat = 39.3° N). Il modulo fotovoltaico preso in considerazione è stato fornito dalla DG Energy ® (Figura 4. 9) e presenta la seguente configurazione stratigrafica:

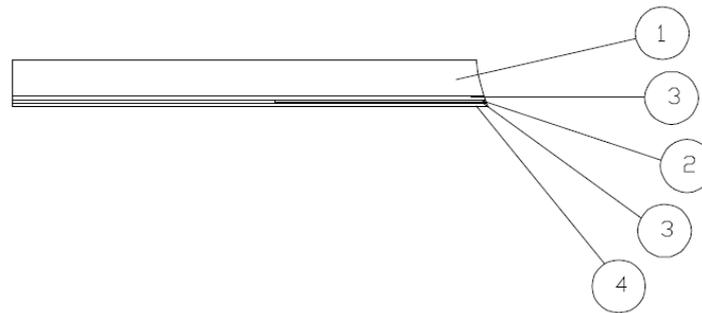
- Vetro temperato prismatico a basso contenuto di Fe di spessore 4 mm con strato antiriflesso;
- Incapsulate Etilen – Vinil – Acetato (EVA) trasparente;
- 36 celle in silicio policristallino di tipo quadrato ad alta efficienza di dimensioni 156 mm x 156 mm;
- Retro il pellicola Tedlar trasparente antiumidità;
- Cornice in alluminio anodizzato.

Le caratteristiche fisiche e termiche dei materiali sono riportate nella Tabella 4. 2.

materiale	Densità [Kg/m <sup>3</sup> ]	Conducibilità termica [W/m K]	Calore Specifico [J/Kg K]	Spessore [m]
Vetro	2500	1.16	840	0.004
Eva	960	0.25	2090	0.00018
Silicio	2336	149	700	0.00027
Eva	960	0.25	2090	0.00018
Tedlar	1780	0.2	1050	0.00011
Pet	1330	0.2	1047	0.00015
Tedlar	1780	0.2	1050	0.00011
Alluminio	2700	160	700	Variabile

Tabella 4. 2 - Caratteristiche fisiche.

Il vetro presenta un coefficiente di trasmissione della radiazione solare  $\tau$  pari a 0.9, il silicio ha un coefficiente di assorbimento  $\alpha$  pari a 0.85. La stratigrafia del pannello è riportata in Figura 4. 10.



1	vetro	1	prismatico, temperato, basso contenuto Fe, 4mm
2	celle	36	silicio policristallino 240 - 270 micron
3	incapsulante	2	eva a polimerizzazione rapida o fast cure
4	back sheet	1	tristrato tedlar-pet-tedlar trasparente, 370 micron
5	ribbon cell interconnector		36% Sn, 62% Pb, 2% Ag, sezione 2.032x0.127 mm <sup>2</sup>
6	ribbon string interconnector		96.5 % Sn, 3.5 % Ag, sezione 5x0.2 mm <sup>2</sup>
7	box di giunzione	1	box ip65, 1000V con connector ad innesto rapido

Figura 4. 10 - Stratigrafia pannello fotovoltaico DG Energy.

Il peso complessivo del pannello senza impianto di raffreddamento è di 14.5 Kg. Le caratteristiche elettriche fanno riferimento a particolari condizioni di riferimento. Queste sono evidenziate da una sigla che si riporta anche nelle tabelle fornite dai costruttori: STC, standard test condition, per l'appunto. Prima di esplicitare queste particolari condizioni è importante esprimere un altro valore, quello di Massa d'Aria (AM). Essa rappresenta la lunghezza relativa percorsa dai raggi solari diretti attraverso l'atmosfera. In un giorno d'estate sereno, al livello del mare e con il Sole allo zenith si ha  $AM = 1$ . Per le applicazioni satellitari si ha  $AM = 0$ . Un valore tipico sulla superficie terrestre è  $AM = 1,5$ . Quest'ultimo valore di massa d'aria, con irradianza di  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura di  $25^\circ\text{C}$ , è usato per le prove di laboratorio su celle e moduli fotovoltaici (condizioni standard STC). Dunque le caratteristiche elettriche sono:

- Potenza massima: 140 W.
- Tensione a vuoto 22.35 V.
- Tensione alla massima Potenza 17.84 V.
- Corrente di corto circuito 8.20 A.
- Fattore di riempimento 76.40%.
- Efficienza 13.60%.

La dipendenza della tensione, della corrente e della potenza erogate dal modulo sono definite tramite i corrispondenti coefficienti di temperatura:

- $+0.05\%/^\circ\text{C}$  per la corrente di cortocircuito;
- $-0.34\%/^\circ\text{C}$  per la tensione a vuoto;
- $-0.43\%/^\circ\text{C}$  per la potenza.

Il NOCT della cella è pari a 47°C. Come visto nel capitolo precedente il coefficiente di perdita globale del collettore  $U_{\text{pann}}$  ha un particolare significato. Esso ci da informazioni sulla capacità del collettore di smaltire il calore. In questo lavoro sono state analizzate diverse configurazioni con diversi fluidi termo – vettori. Proprio per questo è necessario puntualizzare un parametro che permetta il confronto energetico tra le diverse soluzioni. Quando si parla di confronto energetico il parametro che meglio descrive le informazioni energetiche di scambio termico è proprio il coefficiente di perdita globale  $U_{\text{pann}}$ . Questo coefficiente non è fornito direttamente dalla casa produttrice, ma si ricava indirettamente con il NOCT (vedi cap. 7). Ricordiamo che il NOCT è la temperatura alla quale si portano le celle nelle seguenti condizioni operative:

- Flusso solare incidente di 800W/m<sup>2</sup>;
- Temperatura dell'aria esterna pari a 20°C;
- Velocità del vento pari a 1m/s;
- Modulo operante a circuito aperto.

Tali condizioni consentono di determinare il coefficiente globale  $U_{\text{pann}}$  del pannello attraverso la relazione:

$$(\tau\alpha) * G_T = U_{\text{pann}} * (\text{NOCT} - T_{\text{amb}})$$

È facile notare che lavorando in circuito aperto non c'è passaggio di corrente e quindi nell'equazione di bilancio di sopra non è presente il termine relativo alla produzione di energia elettrica. Con l'ausilio del software agli elementi finiti, efficientissimo nel descrivere lo scambio termico tra le celle fotovoltaiche e l'esterno, si è calcolato il coefficiente di perdita  $U_{\text{pann}}$  globale del pannello. In Tabella 4. 3 vengono riportati i valori delle resistenze termiche e i coefficienti di emissione dei vari strati del pannello.

materiale	emissività corta	emissività lunga	Spessore[m]	Resistenza termica [K/W]
vetro	0.077506	0.840956	0.004000	0.003846
eva	0.085000	0.950000	0.000180	0.000732
silicio	0.781082	0.839429	0.000270	0.000002
eva	0.085000	0.950000	0.000180	0.000732
tedlar	0.850000	0.900000	0.000110	0.000550
pet	0.850000	0.900000	0.000150	0.000750
tedlar	0.850000	0.800784	0.000110	0.000550
alluminio			0.001000	0.000006

Tabella 4. 3 - Emissività, spessore, resistenza termica strati pannello.

La scelta del fluido termovettore dipende dalla capacità termica e dalla densità del fluido stesso. Sono stati presi in considerazione acqua e aria escludendo gli altri fluidi per ragioni di approvvigionamento, costo e poiché dall'esperienza e dalla teoria questi due fluidi risultano idonei al nostro caso. Non essendo in condizioni termofisiche estreme possiamo, dunque, utilizzare questi due senza alcun problema ne termico, in quanto idonei per asportare potenze termiche, ne chimico, in quanto non si verificano reazioni chimiche che deteriorerebbero i canali o il pannello stesso. Anche la scelta del fluido termovettore è stata effettuata utilizzando un software ai volumi finiti.

### 4.2.3 Soluzioni proposte

#### Sistema di raffreddamento ad acqua

In questo lavoro di tesi si cercherà di valutare il miglior sistema di raffreddamento da installare direttamente al pannello, già funzionante o non, senza modificare la sua configurazione. Esistono svariati sistemi di raffreddamento sul mercato. Tra i molti sistemi uno in particolare è adatto, in prima analisi, allo scopo di questo lavoro di tesi. È il sistema clima system<sup>©</sup> della aquatherm<sup>®</sup>, in Figura 4. 11. Essendo già in commercio e, soprattutto, prodotto in scala industriale la variabile costo, in particolare quella relativa al costo fisso iniziale per compere l'impianto, non ha una grossa influenza sulla scelta. Oggi la variabile costo, divisa in costi fissi e variabili, rappresenta la variabile che determina, nella maggior parte dei casi, la scelta delle soluzioni ingegneristiche da parte dell'ingegnere. È un sistema ad acqua con una decina di tubi aventi sezione quadrata. La sezione quadrata, sebbene rispetto alla circolare presenta maggiori perdite di carico, permette una maggior superficie di scambio termico. Il sistema della aquatherm<sup>®</sup> può essere semplicemente saldato sul retro del pannello o su una piastra posta dietro lo strato ultimo del pannello. La funzione della piastra è quella di uniformare la temperatura in quanto, si vedrà dettagliatamente nel seguito, applicando il sistema direttamente sull'ultimo strato del pannello si formano delle zone con elevati gradienti di temperatura in prossimità delle superfici dei tubi in contatto con il pannello. Verranno analizzate diverse configurazioni: con o senza piastra, con tubi in alluminio ed in polipropilene.



Figura 4. 11 - clima system<sup>©</sup>, aquatherm<sup>®</sup>.

Le prime analisi sono state condotte considerando le stesse caratteristiche geometriche del sistema *clima system*<sup>©</sup> per quanto riguarda il circuito di raffreddamento. Come fluido termovettore si è scelto di utilizzare acqua, in quanto presenta un calore specifico di 4816 J/(kg\*K) a temperatura ambiente. Lo svantaggio di utilizzare acqua è il suo peso, facilmente intuibile dalla sua densità che a temperatura ambiente è di 1000 kg/m<sup>3</sup>, ma può considerarsi costante.

viscosità dinamica [Pa*s]	0.001
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	1000
viscosità cinematica [m <sup>2</sup> /s]	0.000001

Tabella 4. 4 - Proprietà acqua.

Sottolineando che la sezione quadrata dei tubi consente, rispetto alla sezione circolare, una maggior superficie di scambio termico, le dimensioni sono:

- 12 mm lato esterno tubo;
- 2 mm spessore tubo;
- 52 mm passo dei tubi.

In Figura 4. 12 è riportata la sezione del pannello con i tubi refrigeranti.

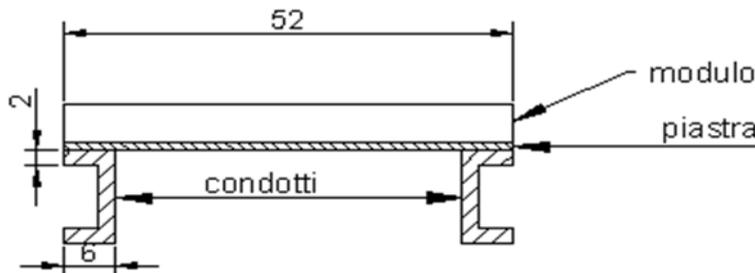


Figura 4. 12 - Sezione del pannello con tubi refrigeranti.

Creato il modello del sistema di raffreddamento con l'interfaccia CAD del software multi fisico (Figura 4. 13) e assegnate le proprietà fisiche ai domini geometrici si procede con il calcolo del coefficiente di scambio termico convettivo all'interno dei tubi, il quale successivamente verrà assegnato alle boundary del tubo.

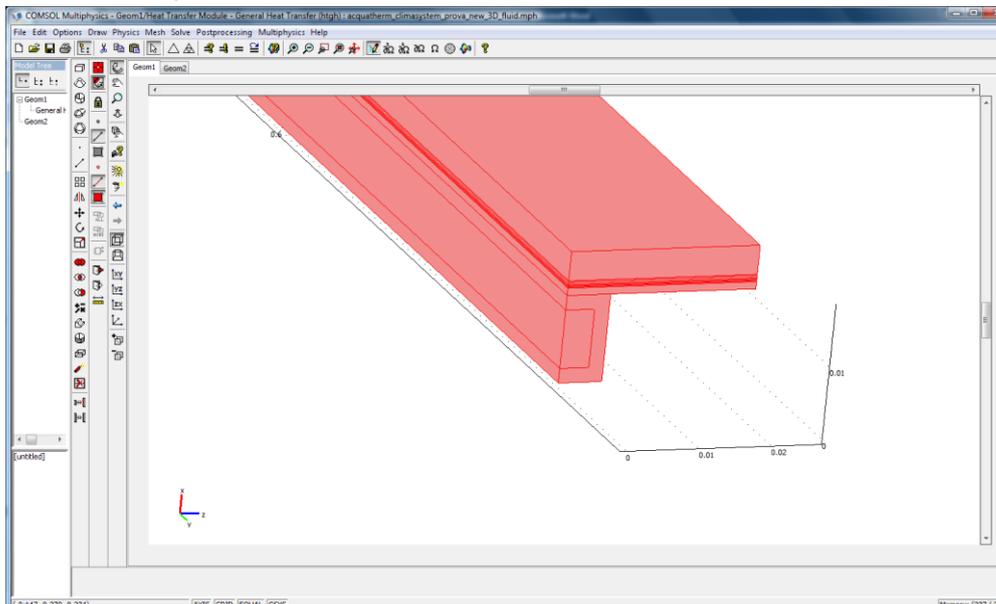


Figura 4. 13 - Modello CAD pannello DG Energy con sistema di raffreddamento ad acqua.

Lo scambio termico tra il pannello e i tubi è legato al coefficiente di scambio termico convettivo all'interfaccia tubo – fluido termovettore. Questo dipende dal regime di moto: turbolento o laminare. Come visto in precedenza (cap. 5) il calcolo del coefficiente convettivo dipende dalla velocità, quindi dal numero di Reynolds ed, infine Nusselt. La velocità all'interno dei condotti per la quale corrisponde il numero di Reynolds critico di 2300 è 0.25 m/s. Per avere invece moto turbolento, numero di Reynolds superiore a 10000, bisogna ottenere una velocità di 1.25m/s all'interno delle condotte. Si sono scelte per evitare zone di transizione una velocità più bassa per quanto riguarda il limite laminare, precisamente di 0.2m/s, e una

più alta per il regime turbolento 1.5 m/s. A queste velocità corrispondono i corrispondenti coefficienti convettivi, ricavati dal numero di Nusselt.

- $h_{\text{conv, laminare}} = 365 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $h_{\text{conv, turbolento}} = 7351 \text{ W/m}^2\text{K}$

In Figura 4. 13 sono riportati i numeri adimensionali che descrivono il tipo di moto del caso in esame:

	velocità[m/s]	Reynolds	Prandlt	Nusselt	$h_{\text{conv}}[\text{W/m}^2\text{K}]$
laminare	0.2	1600	6.25	4.36	365
turbolento	1.5	12000	6.25	87.77	7351

Tabella 4. 5 - Coefficienti adimensionali caratterizzanti il tipo di moto.

La portata, in regime laminare, per singolo tubo è di 0.018 Kg/s, considerato che i tubi sono diciannove la portata totale è di 0.35 kg/s, mentre, in regime turbolento la portata totale è di 1.94 kg/s. Questa prima ipotesi prevede, quindi, un circuito di raffreddamento chiuso con scambiatore di calore acqua – aria, la temperatura del fluido viene posta 10°C superiore rispetto a quella ambiente, circa 300 K. Successivamente al calcolo dei coefficienti convettivi si assegnano le condizioni al contorno. Questo è il passo più delicato nella modellazione. Le condizioni al contorno esterne e quelle particolari riguardanti il vetro rimangono inalterate, quelle da assegnare sono, proprio, quelle relative al sistema di raffreddamento e le laterali. Infatti, è stato assegnato al perimetro interno del tubo la condizione *heat flux* riguardante solo lo scambio termico convettivo. Naturalmente, i coefficienti convettivi inseriti sono quelli precedentemente calcolati. Per quanto riguarda i bordi, invece, è stata utilizzata la condizione di simmetria, in quanto è valida l'ipotesi di simmetria dei profili di temperatura a cavallo della mezzeria del passo dei tubi. Il confronto tra le diverse soluzioni impiantistiche verrà effettuato tramite i profili di temperatura delle celle in silicio. La sezione scelta per il confronto è una intermedia (Figura 4. 14); cioè, i lati del concio non sono quelli a contatto con l'ambiente, ma, bensì, sono nella mezzeria del collettore. Questo permette di non tener conto degli effetti di bordo, fortemente diversi tra i due materiali, e, quindi, effettuare un confronto veritiero.

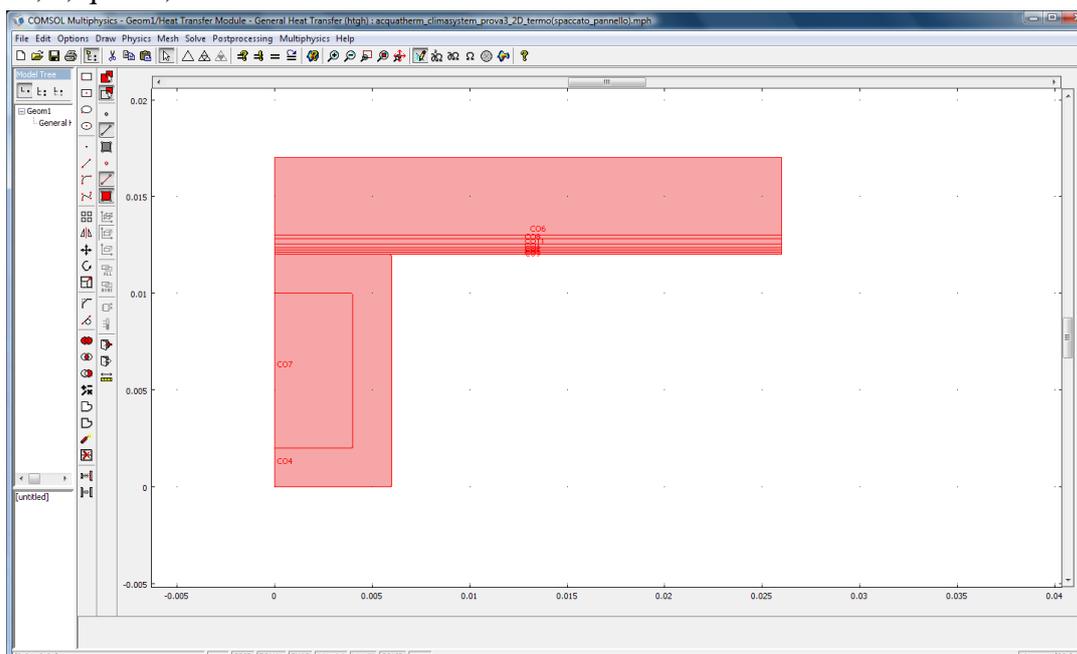


Figura 4. 14 - Modello CAD concio pannello DG Energy con sistema di raffreddamento ad acqua.

### Sistema di raffreddamento ad aria

In questo lavoro è stato analizzato anche un'altra soluzione impiantistica utilizzando un diverso fluido termovettore: l'aria. L'aria per le sue caratteristiche fisiche (Tabella 4. 6) è più semplice da trattare da un punto di vista fluidodinamico, ma non sempre risponde alle esigenze termotecniche, in quanto, rispetto a molti altri fluidi termo-vettori, compresa l'acqua, non possiede proprietà termiche spinte. D'altro canto il suo peso, la sua reperibilità, la poca manutenzione da effettuare ai sistemi che la utilizzano, la rendono competitiva.

viscosità dinamica [Pa*s]	0.0000181
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	1.21
viscosità cinematica [m <sup>2</sup> /s]	0.000015

Tabella 4. 6 - Proprietà aria.

La scelta dei canali e degli spessori è vincolata dal calore specifico. L'aria possiede un  $c_p$  molto basso rispetto all'aria, pari a 1005 J/KgK e una conducibilità termica di 0.025 W/mK. Proprio per questo motivo il sistema di raffreddamento deve avere superfici di scambio termico elevate. Quindi i condotti sono stati pensati e progettati per ricoprire la totalità della superficie posteriore del pannello. Un ruolo fondamentale lo svolge lo spessore dei canali, come la teoria sottolinea[87], che è stato scelto pari a 1.5 mm. Questa dimensione permette di coinvolgere tutta la portata nel processo di raffreddamento. Nel caso dell'aria, sempre per il suo basso calore specifico, è fondamentale il ruolo del telaio, in quanto superficie di scambio termico. È necessario trovare il giusto compromesso tra superficie di scambio termico e perdite di carico. Aumentare troppo la superficie di scambio termico, aggiungendo setti divisorii e, quindi, canali, porta ad aumentare le perdite di carico e il peso del pannello. Naturalmente nelle simulazioni effettuate è stato utilizzato il coefficiente di scambio termico laminare trovato in fase di taratura, invece il coefficiente di scambio termico convettivo questa volta varia in base al numero di canali, poiché cambiando le dimensioni cambia il numero di Nusselt, poiché cambia anche Reynolds. La velocità imposta, o meglio da raggiungere nel canale, è di 5 m/s, così da ottenere un regime di moto turbolento. La teoria, infatti, ci insegna che quando si utilizza aria come fluido refrigerante conviene sempre ottenere un regime di moto turbolento così da migliorare gli effetti dello scambio termico. Il problema, che verrà affrontato successivamente, è verificare se la velocità imposta è effettivamente raggiungibile nel canale rimanendo nei limiti di consumo di potenza imposti, altrimenti il sistema di raffreddamento diventa non più adatto allo scopo. Per quanto riguarda la  $U_{\text{pann}}$  la procedura è la stessa del caso ad acqua. Per le considerazioni effettuate sono stati considerati i seguenti casi:

	Materiale Condotti	Spessore piastra
Caso 1	Tre canali	0 mm
Caso 2	Tre canali	1 mm
Caso 3	Tre canali	2 mm
Caso 4	Quattro canali	1 mm

Tabella 4. 7 - leggenda casi di studio, fluido termovettore aria.

La configurazione del sistema di raffreddamento si presenta come in Figura 4. 15

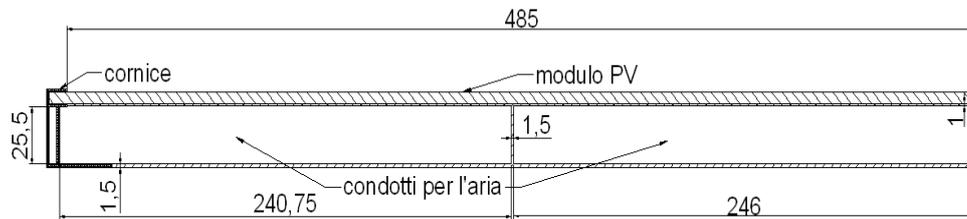


Figura 4. 15 - Sezione della mezzeria del pannello refrigerato ad aria (caso 4).

Le condizioni al contorno assegnate ai casi sono quelle relative alle condizioni di determinazione del NOCT, viste in precedenza, mentre la temperatura di ingresso dell'aria è stata posta pari a quella ambiente, questa ipotesi risulta accettabile se si prevede un suo raffreddamento per umidificazione nella sezione di ingresso.

#### 4.2.4 Taratura del modello

Prima di effettuare qualunque analisi o operazione di calcolo è strettamente necessario tarare il modello utilizzato dal software. Per prima cosa si crea la geometria del pannello. Il software utilizzato presenta una semplice interfaccia grafica che permette la creazione di geometrie anche complesse con semplici passaggi. Il modello del pannello fornitoci è riportato in Figura 4. 16. Si tratta dell'ambiente cad proprio del software multi fisico utilizzato.

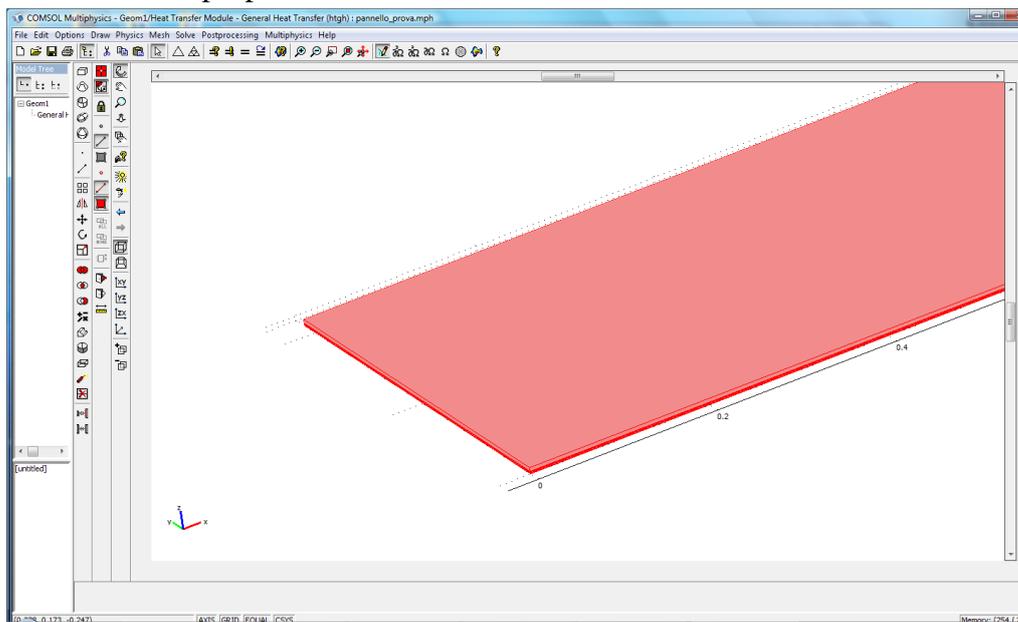


Figura 4. 16 - Cad pannello fotovoltaico DG Energy.

Una volta creata la geometria si entra nell'ambiente multi fisico vero e proprio. Il primo passaggio è assegnare le proprietà fisiche ai diversi materiali. Nel menù a tendina scegliendo *Physics* e cliccando, successivamente, su *Subdomain Settings* compare la finestra di assegnazione delle proprietà fisiche. Il software consente di inserire manualmente valori puntuali o formule matematiche, in caso di interdipendenza di alcuni parametri. Oppure, sempre per quanto riguarda le proprietà fisiche, si può usufruire della libreria di materiali già presente nel programma.

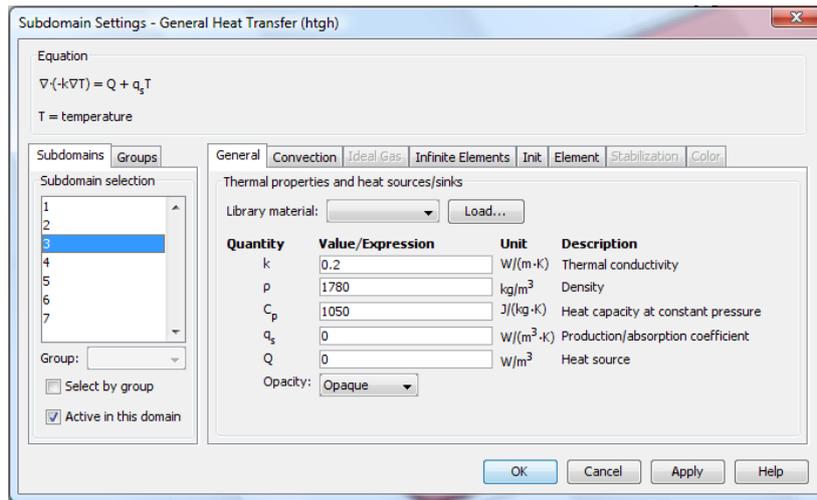


Figura 4. 17 - Finestra proprietà fisiche software volumi finiti.

In Figura 4. 17 si distinguono i vari sottodomini, che rappresentano le patch geometriche dei diversi materiali del quale è composto il pannello. I materiali sono quelli descritti in precedenza nella presentazione stratigrafica del pannello. Sulla destra della figura si distinguono, invece, le proprietà fisiche da assegnare. Una volta assegnate, si passa alla scelta delle condizioni al contorno; fondamentali nell'utilizzo di questi software. Dare una condizione al contorno non veritiera o non compatibile con il caso preso in esame significherebbe risultati molto lontani dal reale. Proprio per questo bisogna prestare la massima attenzione nella scelta delle condizioni al contorno in quanto pur assegnando delle condizioni errate il software comunque elabora una soluzione che l'operatore potrebbe prendere per buona cadendo in un grosso errore. Sempre nel menù a tendina scegliendo *Physics* e cliccando, successivamente, su *Boundary Settings*, si assegnano le condizioni al contorno. Come si vede in Figura 4. 18 la finestra di assegnazione della boundary è di semplice comprensione ed anche qui, come per le proprietà fisiche, si può inserire o un valore puntuale che un'espressione matematica.

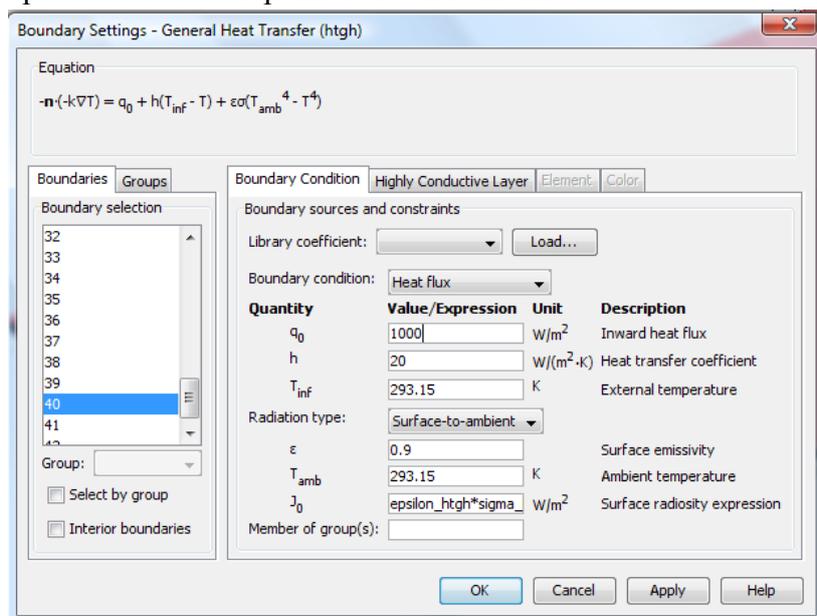


Figura 4. 18 - Finestra boundary settings software volumi finiti.

Le condizioni al contorno assegnate sono di tipo *Heat flux*. Quest'ultima permette di assegnare alla superficie un flusso termico incidente, uno scambio termico convettivo (o liminare) e, se

attivata l'opzione *radiation flux*, permette di considerare lo scambio termico radiativo. Nel nostro caso si è utilizzato *Heat flux* in termini di scambio termico convettivo. Questa è stata assegnata alla parte superiore ed inferiore del pannello, mentre ai lati del collettore si è mantenuta la condizione di simmetria/continuità, cioè condizione adiabatica. Questa ipotesi è plausibile in quanto gli effetti di bordo sono trascurabili per via della predominanza della lunghezza sull'altezza. Inoltre, è stata utilizzata una particolare condizione al contorno: *interior boundary*, poiché essendo il vetro trasparente alla radiazione solare il flusso termico non incide sulla superficie del vetro ma direttamente sul silicio. Chiaramente, il flusso termico incidente sul silicio è stato scremato della quantità  $\tau\alpha$  e nel dominio geometrico del vetro è stata imposta una generazione interna di calore pari ad  $\alpha*G$ , per tenere in considerazione la quantità di calore assorbita dal vetro. Si precisa che in questa fase di taratura le condizioni al contorno devono essere in accordo con le condizioni operative alle quali si riferisce il NOCT. A questo punto si può avviare la simulazione. Il parametro da tarare è proprio il coefficiente di scambio termico liminare (tiene conto delle perdite radiative e convettive), tra superficie e aria esterna. Questo deve soddisfare la relazione:

$$(\tau\alpha) * G_T = U_{\text{pann}} * (\text{NOCT} - T_{\text{amb}})$$

Come visto in precedenza il coefficiente di scambio termico convettivo è incluso nella valutazione della  $U_{\text{pann}}$ . Dalle simulazioni effettuate il coefficiente di scambio termico liminare  $h$  tarato per il modello in esame è di  $9.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

#### 4.2.5 TRNSYS: Type 180, array fotovoltaico

Type 180 è basato su un modello matematico che descrive il comportamento di un generatore fotovoltaico accoppiato ad un sistema di raffreddamento. Il modello descrittivo si rifà al circuito equivalente in Figura 4. 19.

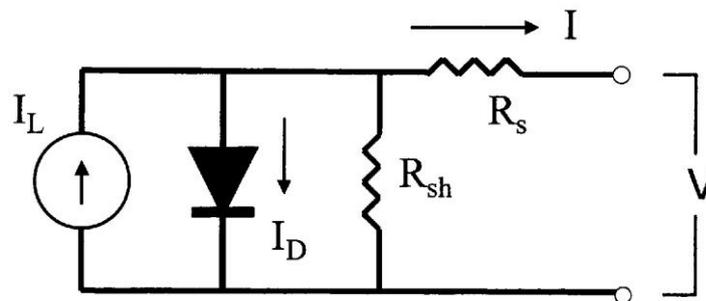


Figura 4. 19 - Circuito equivalente modello type 180

Come è evidente in figura il circuito è formato da un generatore di corrente,  $I_L$  (corrente generata dalla luce), due resistenze, una in serie  $R_s$  propria del collettore fotovoltaico e una in parallelo  $R_{sh}$ , la quale tiene conto dello sporco che si deposita sulla copertura vitrea, e un diodo, cuore del circuito. Il diodo è quello che caratterizza l'equivalenza del circuito al pannello. In particolare  $I_D$  è la corrente che passa attraverso il diodo. Il modello è settato per celle in silicio, ma è valido anche per altri materiali. Inoltre, il modello è valido per un certo numero di celle da specificare all'interno del programma. Naturalmente tiene conto anche della connessione tra le celle, in serie e in parallelo. L'utente, infatti, deve specificare il numero di celle in serie per modulo, il numero di moduli in serie nell'array e il numero di moduli in parallelo per array. Il modello del type 180 utilizza il metodo Newton – Raphson per trovare la soluzione numerica,

per un dato voltaggio  $U$ , della corrente  $I_{cell}$ . Inoltre, è implementato l'algoritmo che trova il punto di funzionamento di massima potenza, descrivendo con precisione il funzionamento reale del campo fotovoltaico. Questo algoritmo è il MPPT. L'utilizzo del Newton – Raphson e il MPPT rendono il type molto robusto. Di seguito si riportano le equazioni che regolano il comportamento del modello e quelle che legano la corrente di cella  $I_{cell}$  e la differenza di potenziale  $U$  del circuito equivalente alla corrente di shunt  $I_{sh}$ , a quella del diodo  $I_D$  e a quella del generatore  $I_L$ :

- Corrente di cella:

$$I_{cell} = I_L - I_D - I_{sh}$$

Con:

$$I_L = \frac{G_T}{G_{T,ref}} \left( I_{L,ref} + \mu_{isc} (T_{cell} - T_{cell,ref}) \right)$$

$$I_{sh} = \frac{U_{cell} + I_{cell} R_s}{R_{sh}}$$

$$I_D = I_0 \left[ \exp \left( \frac{U_{cell} + I_{cell} R_s}{a} \right) - 1 \right]$$

- Potenziale a circuito aperto:

$$U_{OC} = a \ln \frac{I_L}{I_0}$$

- Potenza di cella:

$$P_{cell} = I_{cell} U_{cell}$$

- Potenza dell'array:

$$P_{tot} = N_s I_{cell} U_{cell}$$

Una misura della performance della cella fotovoltaica è il suo rendimento definito dal rapporto tra l'energia elettrica prodotta e l'energia solare incidente:

$$\eta = \frac{P_{cell}}{A_{cell} G_T}$$

La peculiarità di questo type, rispetto al type classico che modella il comportamento di un array fotovoltaico (type 194), è l'utilizzo del modello termico. Infatti, tenendo conto anche dello scambio termico e soprattutto potendo variare la  $U_{pann}$ , in base all'impianto o configurazione del sistema di raffreddamento, il type 180 risulta adatto a questo a questa analisi. La temperatura di cella  $T_{cell}$  dipende sostanzialmente dalle condizioni ambientali (flusso solare, temperatura dell'aria esterna), ma anche dalla trasformazione in energia elettrica dell'energia solare da parte del collettore fotovoltaico. In parole povere, l'energia solare incidente sul pannello viene trasformata in parte in energia termica e in parte in energia elettrica, la quale è rimossa da un circuito esterno. L'energia termica è dissipata dalla combinazione di scambio termico convettivo, conduttivo e radiativo. Il processo di scambio termico dipende molto dalla configurazione geometrica del pannello. Per esempio, le celle possono essere raffreddate artificialmente tramite il passaggio di aria o acqua sul retro del pannello. Il vantaggio di questo modello è che ha

bisogno di poche informazioni per descrivere il collettore. Questo perché tutte le perdite termiche sono raggruppate in un unico coefficiente  $U_L$ . Esprimendo, inoltre, la capacità termica del pannello sotto un unico parametro, il bilancio termico può essere espresso in maniera lineare con un'equazione differenziale non omogenea di primo ordine. Di seguito si riporta il bilancio energetico del modello e la formulazione del coefficiente globale di perdita. In particolare, quest'ultima è uguale alla formulazione data nei precedenti capitoli.

$$U_L = \tau\alpha \frac{G_T}{T_{c,NOCT} - T_{amb,NOCT}};$$

$$C_t = \tau\alpha \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{el} - \dot{Q}_{loss};$$

$$\dot{Q}_{rad} = \tau\alpha G_T;$$

$$\dot{Q}_{el} = \eta G_T;$$

$$\dot{Q}_{loss} = U_L (T_{cell} - T_{amb});$$

Il type 180 può operare in tre maniere differenti:

- La temperatura dell'array PV è data in input;
- La temperatura di cella è calcolata usando il coefficiente di perdite globali  $U_L$  valutato nelle condizioni del NOCT;
- La temperatura di cella è calcolata usando sia il coefficiente di perdite globali  $U_L$  che la capacità termica totale ( $C_T$ )

È stato usato il terzo metodo così da tenere in considerazione le differenti configurazioni e le diverse capacità termiche dei differenti sistemi di raffreddamento.

## **4.3 Risultati**

### **4.3.1 Sistema ad acqua**

#### **Moto Laminare**

Per facilitare la comprensione al lettore è riportata di seguito la leggenda (Tabella 4. 8) dei casi analizzati:

.	Materiale Condotti	Spessore piastra
Caso 1	Senza condotti	0 mm
Caso 2	Polipropilene	0 mm
Caso 3	Alluminio	0 mm
Caso 4	Polipropilene	1 mm
Caso 5	Alluminio	1 mm
Caso 6	Polipropilene	0.5 mm
Caso 7	Polipropilene	2 mm
Caso 8	Alluminio	0.5 mm
Caso 9	Alluminio	2 mm

Tabella 4. 8 - leggenda casi di studio regime laminare, fluido termovettore acqua

### Caso 2: sistema di raffreddamento in polipilene.

Il polipropilene (PP, anche: polipropilene) è un polimero termoplastico che può mostrare diversa tatticità. Il prodotto più interessante dal punto di vista commerciale è quello isotattico: è un polimero semicristallino caratterizzato da un elevato carico di rottura, una bassa densità, una buona resistenza termica e all'abrasione. La densità è di  $900 \text{ kg/m}^3$  e il punto di fusione è spesso oltre i  $165 \text{ }^\circ\text{C}$ . Le proprietà chimiche, determinate nella produzione, comprendono la stereoregolarità, la massa molecolare e l'indice di polidispersione. Il prodotto atattico si presenta invece come un materiale dall'aspetto gommoso, e ha scarso interesse commerciale (è stato usato solo come additivo). Il polipropilene ha conosciuto un grande successo nell'industria della plastica: molti oggetti di uso comune, dagli zerbini agli scolapasta per fare alcuni esempi, sono fatti di polipropilene. Negli ultimi tempi ha trovato un grosso utilizzo nei sistemi di climatizzazione, riscaldamento e raffreddamento, per edifici, in particolare viene utilizzato come scambiatore di calore nei pannelli radianti; anche se non è il materiale ideale per quanto riguarda la trasmissione del calore, ha, infatti, una conducibilità termica di  $0.22 \text{ W/mK}$ . Naturalmente, per quanto riguarda l'ambiente FEM, sono state assegnate esclusivamente alla geometria del sistema di raffreddamento le proprietà fisiche descritte pocanzi. I risultati della simulazione, considerando moto laminare, evidenziano un andamento parabolico della temperatura, con un picco massimo di  $314.8 \text{ K}$  (Figura 4. 20), contro i  $320.32 \text{ K}$  delle celle in silicio del caso senza sistema di raffreddamento.

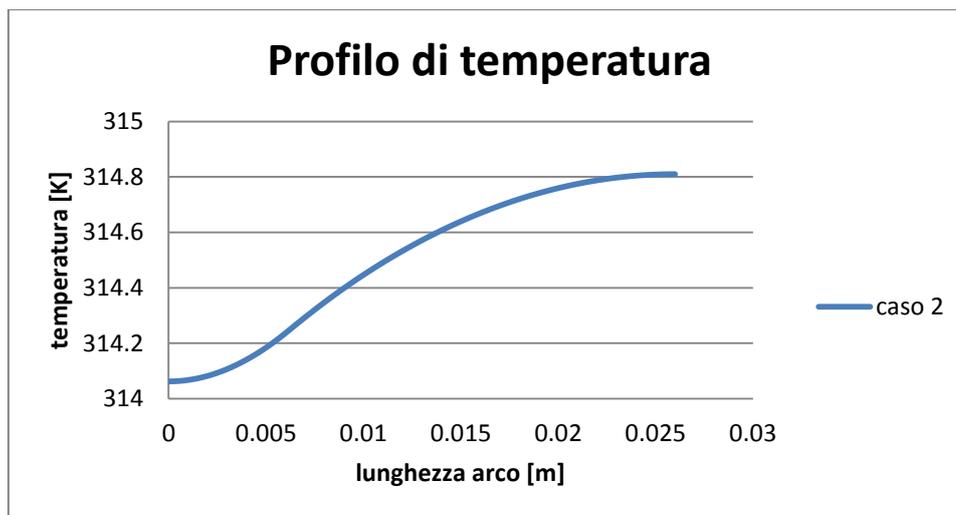


Figura 4. 20 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in polipropilene, regime laminare.

Si nota dal grafico che tra la massima temperatura e quella minima vi è una forbice di circa  $1^\circ$ .

### Caso 3: sistema di raffreddamento in alluminio.

L'alluminio è un metallo leggero ma resistente, con un aspetto grigio argento a causa del leggero strato di ossidazione che si forma rapidamente quando è esposto all'aria e che previene la corrosione in quanto non solubile. L'alluminio ha un peso specifico di circa un terzo dell'acciaio, o del rame; è malleabile, duttile e può essere lavorato facilmente; ha una eccellente resistenza alla corrosione e durata. Inoltre non è magnetico, non fa scintille, ed è il secondo metallo per malleabilità e sesto per duttilità. L'alluminio è uno degli elementi più diffusi sulla terra (8,3% in peso), secondo solo a ossigeno (45,5%) e silicio (25,7%) e paragonabile al ferro (6,2%) e al calcio (4,6%) . In natura si trova sempre combinato con altri elementi; è presente in numerosi

minerali. Dal punto di vista industriale questo metallo leggero (la sua densità è di  $2.71 \text{ g/cm}^3$ ) viene prodotto a partire dalla bauxite, roccia rosso bruno o giallo, diffusa soprattutto negli USA, in Russia, Guyana, Ungheria, nei territori dell'ex Jugoslavia. Le proprietà salienti dell'alluminio sono:

- Basso peso specifico, pari a circa un terzo di quello dell'acciaio o delle leghe di Rame;
- Elevata resistenza alla corrosione;
- Alta conducibilità termica ed elettrica;
- Elevata plasticità;
- Eccellente duttilità e malleabilità;
- Basso potere radiante;
- Difficile saldabilità .

Pochi elementi in natura si prestano a costituire un numero così elevato di leghe come l'alluminio. Per migliorare le caratteristiche meccaniche si aggiungono all'alluminio determinati quantitativi di elementi alliganti. Quando si combina con altri elementi, le caratteristiche di questo metallo, che allo stato puro è tenero e duttile, cambiano radicalmente. Basta un solo esempio: l'ossido di alluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o corindone (i cristalli trasparenti della migliore qualità sono più conosciuti come zaffiri e rubini), è la sostanza naturale più dura dopo il diamante, con durezza relativa 9 nella scala di Mohs. Per quanto riguarda le leghe metalliche formate dall'alluminio, le peculiarità in comune per tutte sono:

- Bassa temperatura di fusione (compresa tra i  $510$  ed i  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- Basso peso specifico, compreso tra  $2,66$  e  $2,85 \text{ g/cm}^3$ ;
- Elevatissima conducibilità elettrica e termica, circa  $250 \text{ W/mK}$ ;
- Contenuto di alluminio maggiore del  $95\%$ .

Naturalmente, per quanto riguarda l'ambiente FEM, sono state assegnate esclusivamente alla geometria del sistema di raffreddamento le proprietà fisiche descritte pocanzi. I risultati della simulazione, considerando moto laminare, evidenziano un andamento parabolico della temperatura, con un picco massimo di  $308.9 \text{ K}$  (Figura 4. 21), contro i  $320.32 \text{ K}$  delle celle in silicio del caso senza sistema di raffreddamento e i  $314.8 \text{ K}$  delle celle con sistema di raffreddamento con condotti in polipropilene.

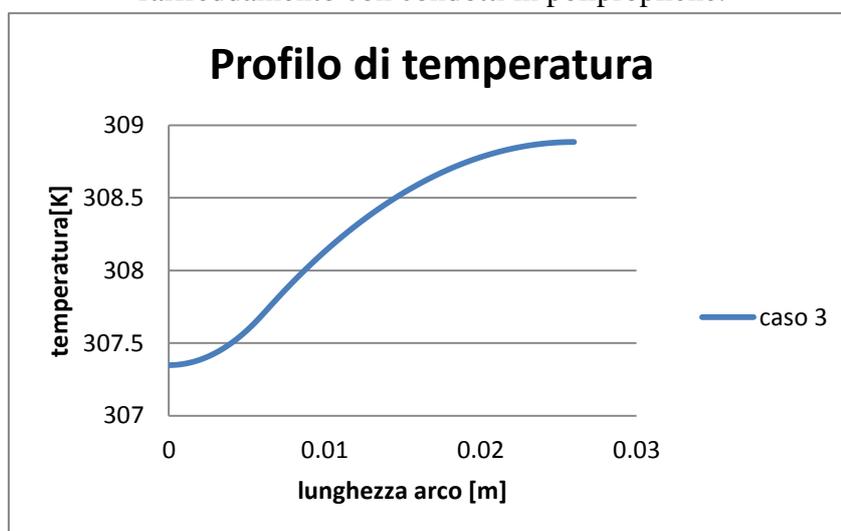


Figura 4. 21 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in alluminio, regime laminare

Come è lecito aspettarsi le temperature, utilizzando come materiale per le condotte l'alluminio, si abbassano. Si registra, infatti, una riduzione rispetto al caso precedente di circa  $6^{\circ}\text{K}$ . La forbice, invece, tra temperatura massima e minima è di circa  $1^{\circ}\text{K}$ , come nel caso con condotte in polipropilene. È molto interessante il confronto tra i due casi. In Figura 4. 22 sono riportati i profili di temperatura delle due soluzioni.

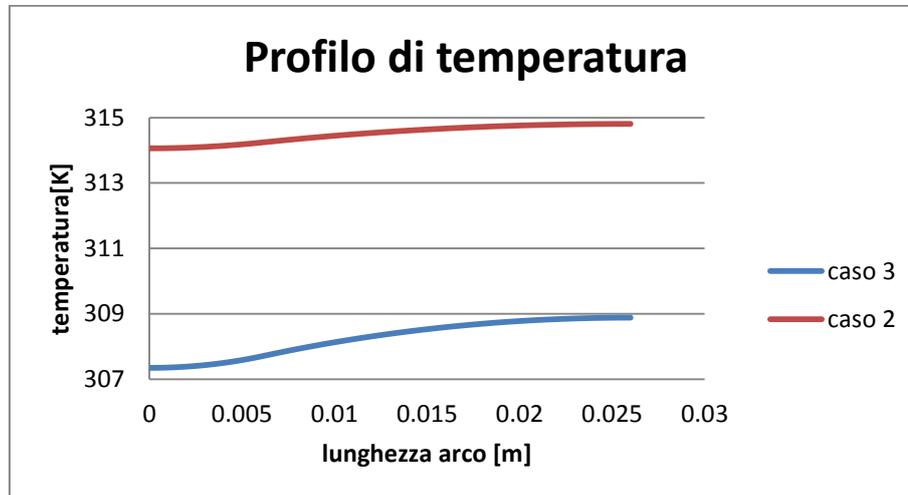


Figura 4. 22 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in alluminio e tubi in polipropilene, regime laminare

Si nota che l'andamento del profilo è quasi lo stesso, mentre è ben netta e distinta la differenza di temperature tra i due casi.

#### **Caso 4: sistema di raffreddamento in Polipropilene con piastra in Alluminio di spessore 1mm.**

Al fine di uniformare il profilo di temperatura della cella si è simulato l'inserimento di una piastra metallica, precisamente in alluminio, tra il pannello e il sistema di raffreddamento. Sfruttando l'alta conducibilità termica dell'alluminio, infatti, il calore da smaltire viene scaricato più facilmente sui tubi, questo fenomeno fa sì che non si formino alti gradienti di temperatura tra un tubo e l'altro. Come si vede in Figura 4. 23, al precedente modello si è aggiunto il dominio geometrico della piastra.

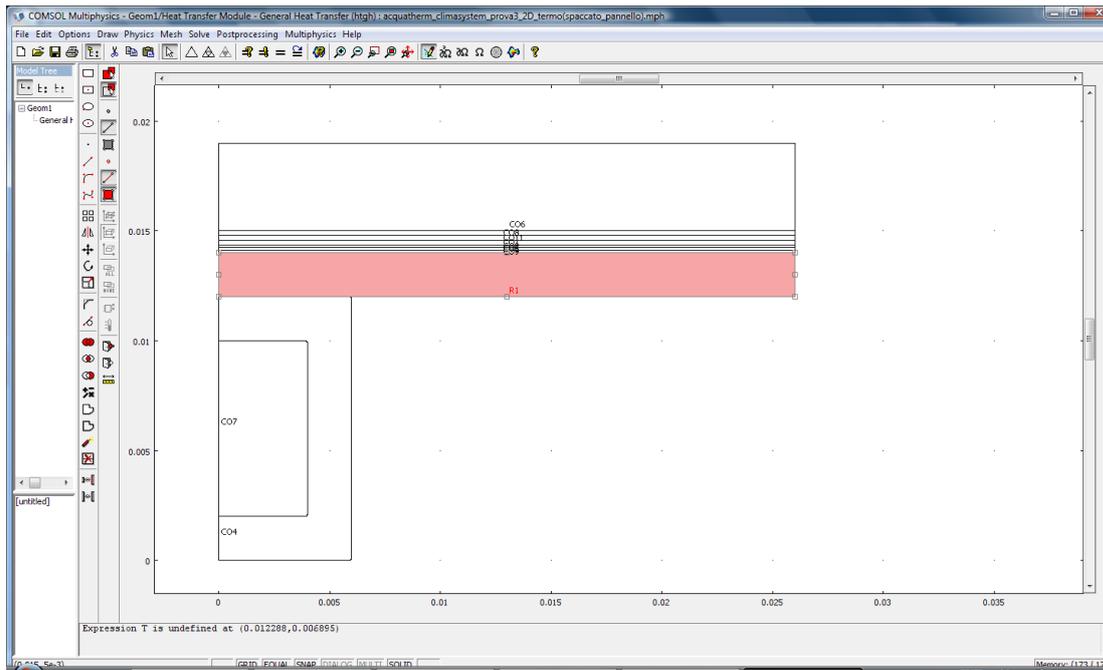


Figura 4. 23 - Modello CAD concio pannello DG Energy con sistema di raffreddamento ad acqua e piastra (evidenziata in figura).

I risultati della simulazione, considerando moto laminare, evidenziano un andamento piatto, rispetto al caso precedente senza piastra, della temperatura, con un picco massimo di 313.98 K (Figura 4. 24), contro i 320.32 K delle celle in silicio del caso senza sistema di raffreddamento e i 314.8 K delle celle con sistema di raffreddamento con condotti in polipropilene senza piastra.

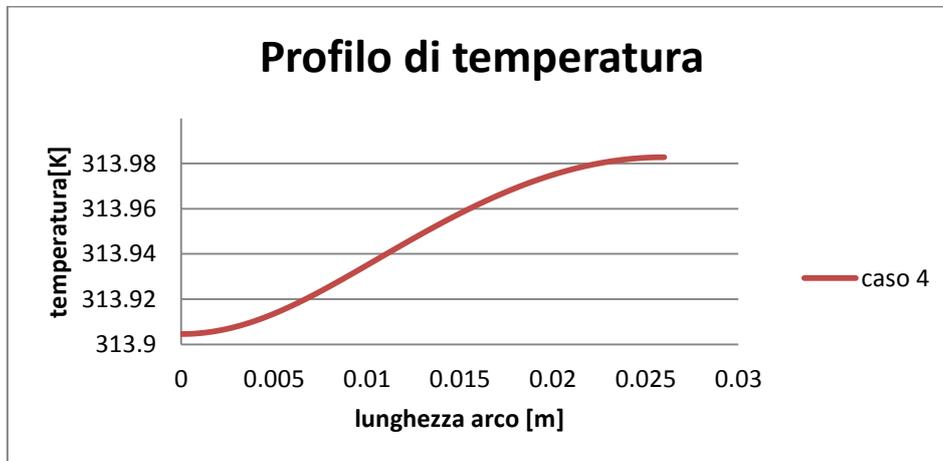


Figura 4. 24 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in polipropilene e piastra in alluminio, regime laminare.

Si nota che l'andamento del profilo di temperatura è comune agli altri casi, mentre l'effetto benefico, termicamente parlando, sta nella forbice tra temperatura massima e minima che è di solo 0.08°K. L'aggiunta della piastra da 1 mm di spessore porta dei grossi benefici in termini di distribuzione di temperatura e quindi di gradiente. Nel caso in esame, infatti, non vi sono gradienti significativi di temperatura. La Figura 4. 25 sottostante mostra l'effetto della riduzione del gradiente della temperatura lungo il passo dei tubi. Si nota, infatti, come l'utilizzo della piastra, per via delle sue proprietà termiche, schiaccia il profilo delle temperature di cella.

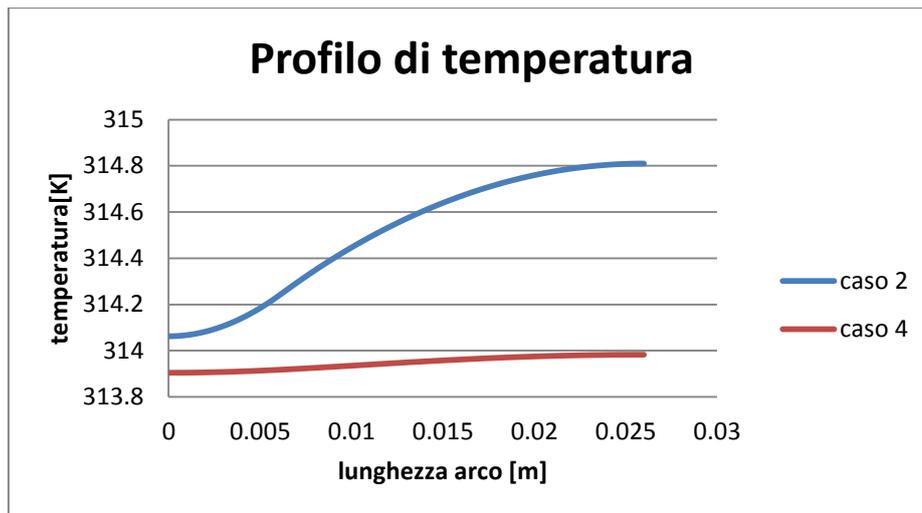


Figura 4. 25 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in polipropilene con e senza piastra, regime laminare.

#### Caso 5: sistema di raffreddamento in Alluminio con piastra in Alluminio di spessore 1mm

L'utilizzo combinato di piastra e condotti in alluminio porta non solo ad un miglioramento della distribuzione della temperatura, come nel caso precedente, ma anche ad un ulteriore abbassamento della temperatura di cella di qualche grado. Tutto questo è ben descritto dalla Figura 4. 26.

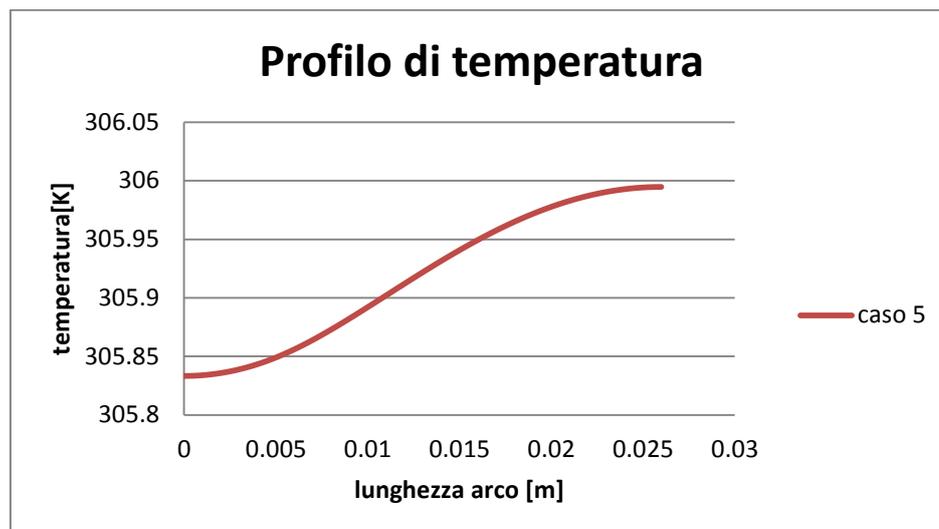


Figura 4. 26 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in alluminio e piastra in alluminio, regime laminare

Si nota che l'andamento del profilo di temperatura è comune agli altri casi, mentre l'effetto benefico della piastra, termicamente parlando, risiede sia nella forbice tra temperatura massima e minima che è di solo  $0.1^{\circ}\text{K}$  che nell'abbassamento di  $3^{\circ}\text{K}$  della temperatura massima raggiunta dal silicio. Questo accade poiché i materiali della piastra e dei condotti, essendo gli stessi, presentano una conducibilità termica elevata. Il confronto con il caso 3 evidenzia questi fenomeni (Figura 4. 27).

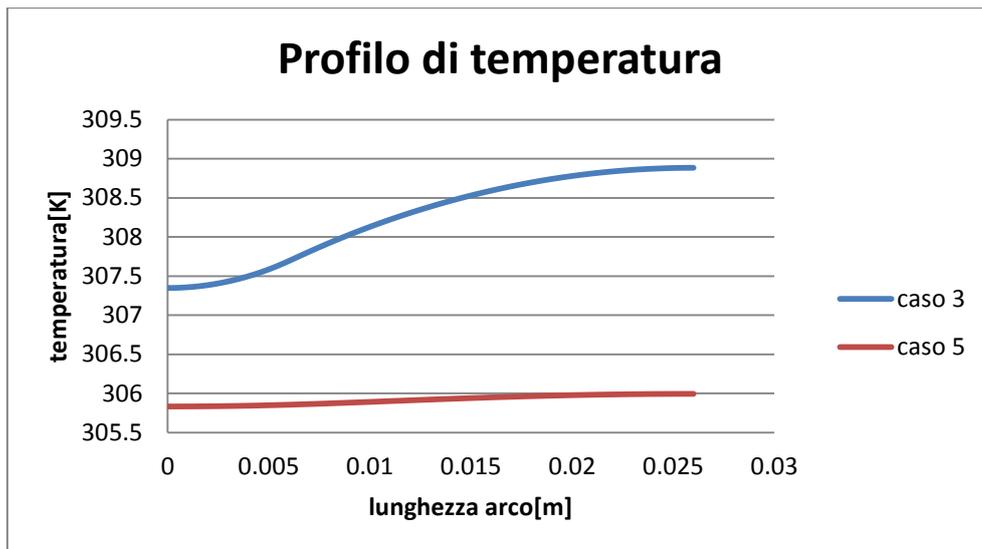


Figura 4. 27 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in alluminio con e senza piastra, regime laminare

Si nota come la piastra scarica meglio il calore al fluido termo-vettore, in particolare la temperatura massima diminuisce di ben  $3^{\circ}\text{K}$ .

Sono state effettuate diverse simulazioni considerando spessori variabili della piastra: rispettivamente 0.5 mm e 2 mm. Di seguito, in Figura 4. 28, si riportano i profili di temperatura relativi a stesso materiale dei condotti ma diversi spessori della piastra.

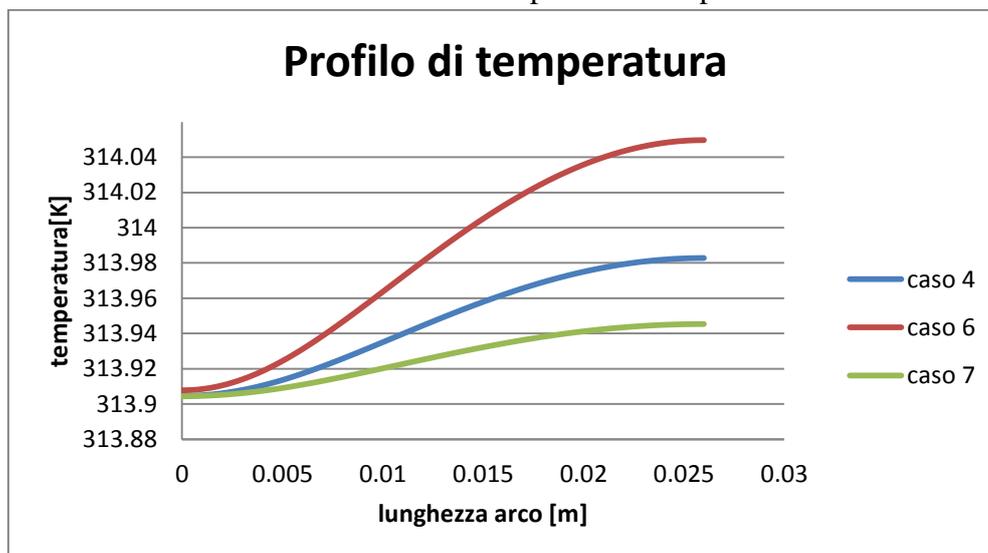


Figura 4. 28 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in polipropilene con spessore di piastra variabile, regime laminare

Il caso 6, tubi in polipropilene e piastra da 0.5 mm, presenta una differenza elevata, rispetto agli altri casi, tra la temperatura massima e minima. Anche se, ingegneristicamente parlando non vi è molta differenza in quanto concretamente questa si formalizza in  $0.14^{\circ}\text{K}$ . Come è evidente dal grafico (Figura 4. 28) dimezzare o duplicare lo spessore non porta grossi vantaggi in caso di regime laminare; infatti, se consideriamo il caso 7, piastra da 2mm, e il caso 4, piastra da 1mm, la differenza tra le rispettive temperature massime è di  $0.05^{\circ}\text{K}$ . Stesso discorso per i tubi in alluminio. Il caso con piastra da 0.5mm è sicuramente il peggiore, ma analizzando i risultati da un punto di vista termo- tecnico (Figura 4. 29) variare lo spessore non porta grandi benefici.

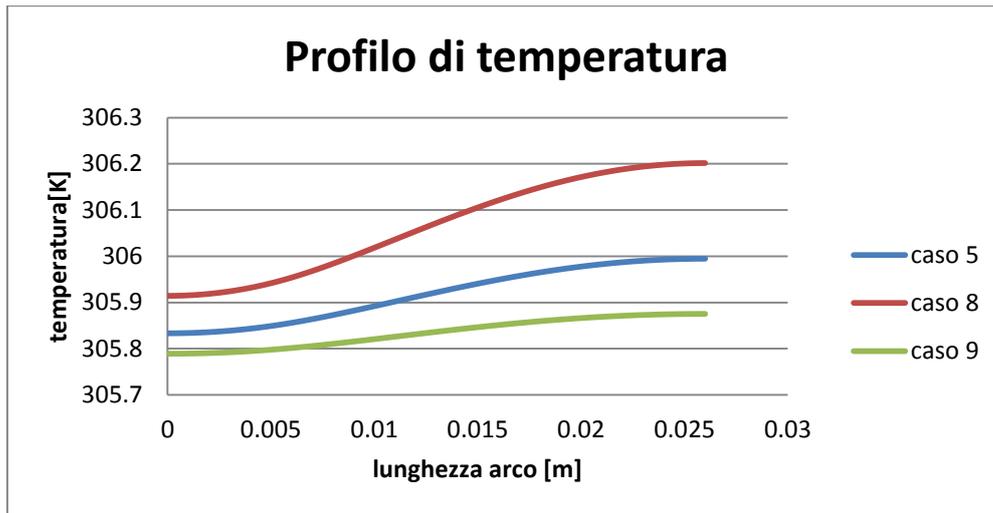


Figura 4. 29 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in alluminio con spessore di piastra variabile, regime laminare

### Moto Turbolento

Per quanto riguarda il regime turbolento sono state effettuate le stesse simulazioni. Di seguito si riporta la leggenda (Tabella 4. 9) delle simulazioni in regime turbolento:

	Materiale Condotti	Spessore piastra
Caso 2'	Polipropilene	0 mm
Caso 3'	Alluminio	0 mm
Caso 4'	Polipropilene	1 mm
Caso 5'	Alluminio	1 mm
Caso 6'	Polipropilene	0.5 mm
Caso 7'	Polipropilene	2 mm
Caso 8'	Alluminio	0.5 mm
Caso 9'	Alluminio	2 mm

Tabella 4. 9 - leggenda casi di studio regime turbolento, fluido termovettore acqua

Il regime turbolento, dispendioso da ottenere, non porta grossi benefici, come evidenzia, in maniera chiara, la Figura 4. 30, che mostra il confronto tra il caso 2 e 2' e la Figura 4. 31, che mostra il confronto tra il caso 5 e il caso 5'.

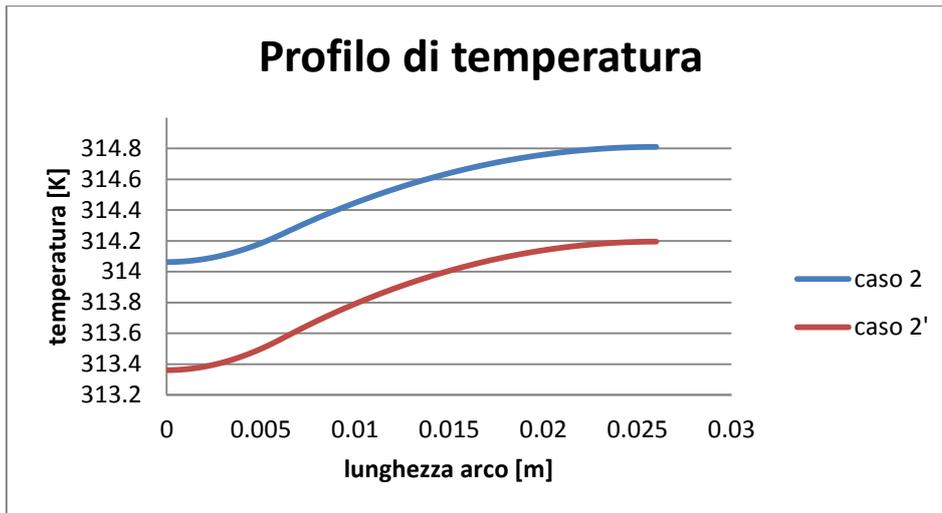


Figura 4. 30 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in polipropilene, regime laminare e turbolento

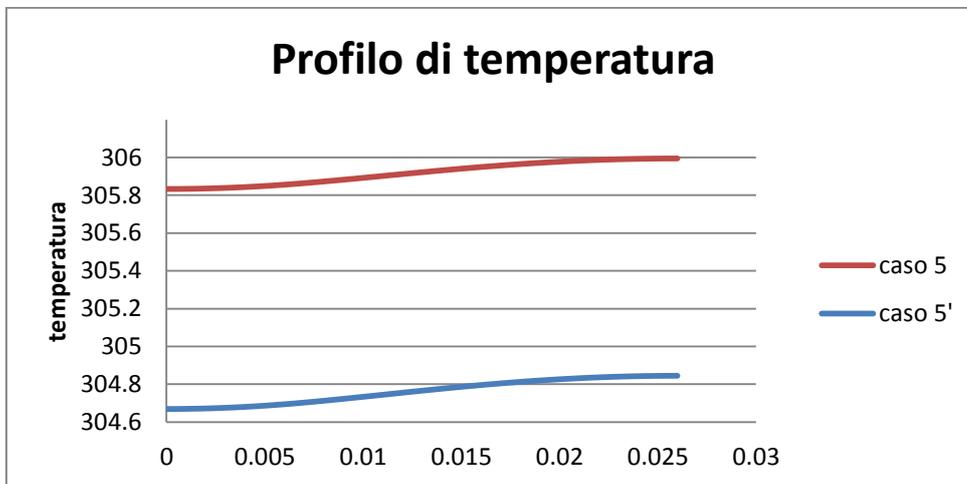


Figura 4. 31 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in alluminio, regime laminare e turbolento

Dalle Figura 4. 32 e Figura 4. 33 si nota come anche nel caso di moto turbolento aumentare lo spessore della piastra non porta grandi benefici.

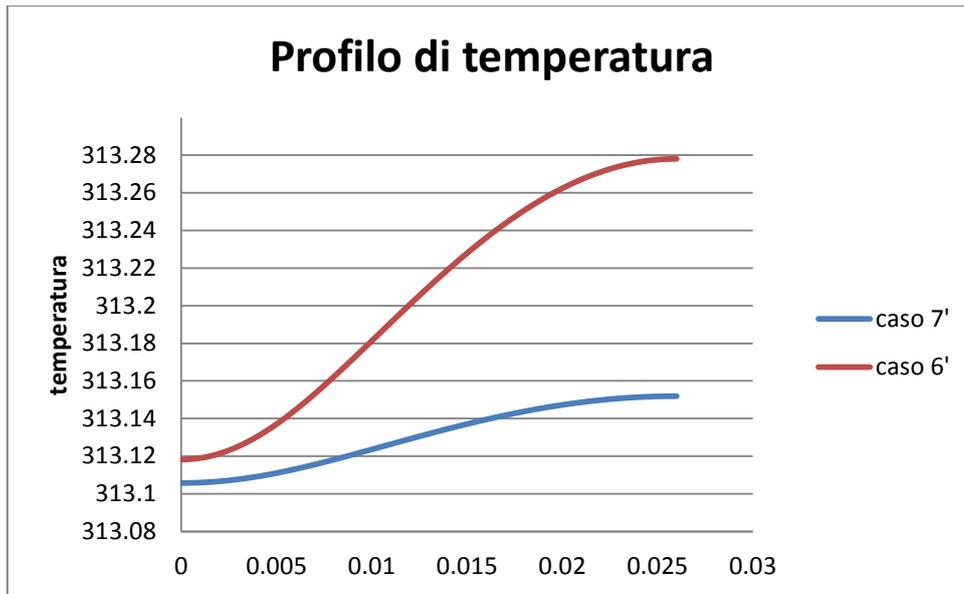


Figura 4. 32 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in polipropilene spessore di piastra variabile, regime turbolento

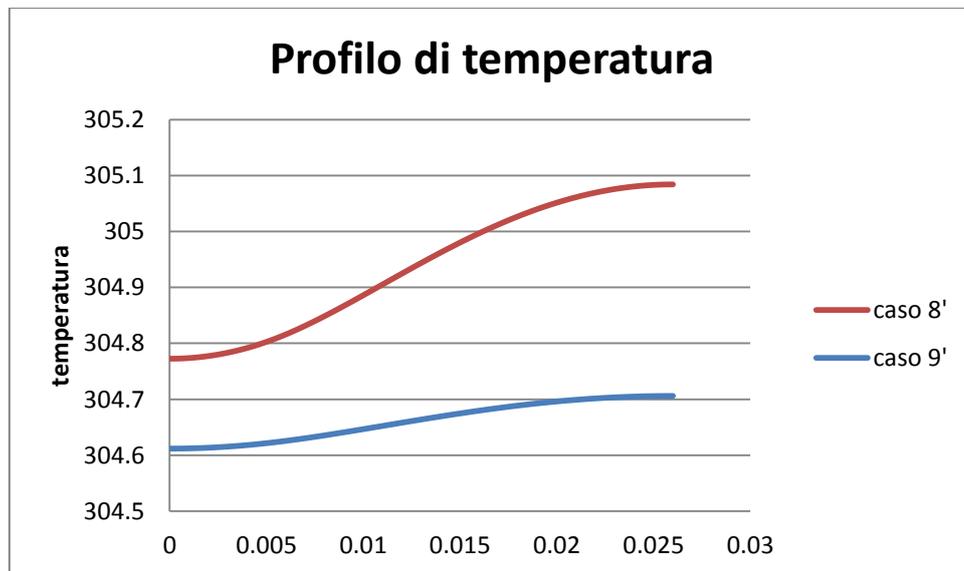


Figura 4. 33 - Profilo di temperatura delle celle, tubi in alluminio spessore di piastra variabile, regime turbolento

### 4.3.2 Confronto delle soluzioni ad acqua

Conoscendo il coefficiente di scambio termico liminare, calcolato in precedenza, è possibile calcolare il coefficiente globale di trasmissione  $U_{pann}$  per le diverse configurazioni.  $U_{pann}$  è calcolabile tramite la seguente relazione:

$$U_{pann} = \frac{(\tau\alpha)G_T}{(T_{cell} - T_{amb})}$$

Dove  $T_{cell}$  è la temperatura media di cella calcolata tramite software. In Tabella 4. 10 sono riportate tutti i valori delle  $T_{cell}$ , delle  $U_{pann}$ , e delle capacità termiche  $C_t$  del sistema pannello – sistema di refrigerazione.

	$T_{cell}$ [°C]	$U_{coll}$ [W/m <sup>2</sup> K]	$C_t$ [J/m <sup>2</sup> K]
caso 1	47.17	22.52	10184
caso 2	41.36	28.66	10184
caso 3	35.10	40.52	10184
caso 4	40.80	29.43	12614
caso 5	32.77	47.93	12614
caso 6	40.83	29.38	11399
caso 7	40.78	29.46	15044
caso 8	32.91	47.39	11399
caso 9	32.68	48.25	15044
caso 2'	40.71	29.56	10184
caso 3'	34.45	42.36	10184
caso 4'	40.01	30.59	12614
caso 5'	31.61	52.71	12614
caso 6'	40.05	30.52	11399
caso 7'	39.98	30.63	15044
caso 8'	31.79	51.93	11399
caso 9'	31.51	53.17	15044

Tabella 4. 10 - Temperatura media di cella, coefficiente globale trasmissione, capacità termica

Al fine di trarre considerazioni energetiche si riportano in Figura 4. 34, i coefficienti di scambio termico globale.

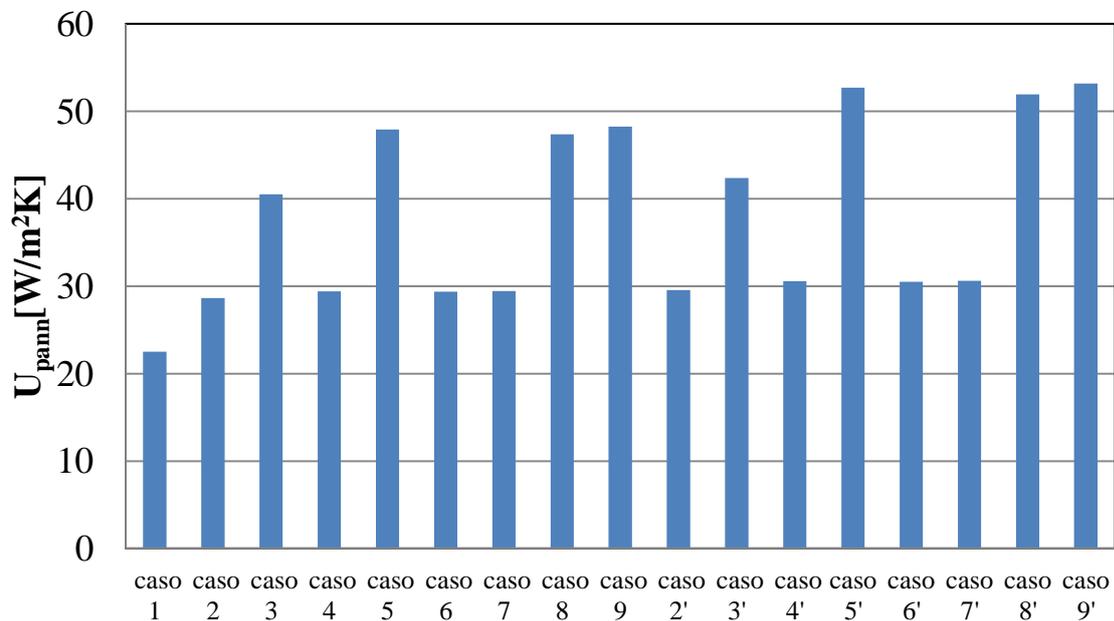


Figura 4. 34 - Coefficienti di scambio termico globale

L'efficienza del sistema di refrigerazione è fortemente condizionata dal materiale dei condotti (casi 2 e 3), si nota un'impennata del coefficiente di scambio termico tra i due casi dovuta al materiale differente; in particolare, si nota che il coefficiente di scambio termico globale è sempre sopra i 40 W/m<sup>2</sup>K quando il sistema di refrigerazione è in alluminio. Inoltre, molto interessante sono gli effetti della differenza di moto, infatti, si nota come instaurare un moto turbolento nelle condotte migliora il sistema solo se il materiale di cui è composto è metallico,

caso 8, moto laminare, caso 8', moto turbolento. La piastra fornisce dei rilevanti effetti benefici solo in presenza di condotti metallici, casi 8-5-9 rispetto al caso 3. Da notare, anche, gli effetti conseguenti all'aumento di spessore della piastra in caso di moto turbolento e laminare, si notano dei lievi miglioramenti solo in caso di regime turbolento, casi 8' e 9'. Non conviene aumentare lo spessore della piastra, poiché si andrebbe ad appesantire di molto il pannello e questo vincolerebbe la struttura di sostegno, che deve essere in grado di sopportare un carico ingente. Preliminarmente non si è voluto modificare il passo tra i tubi prestando, quindi, attenzione alla scelta del materiale e al tipo di moto da instaurare. Inoltre, la scelta del passo di 52 mm è stata effettuata facendo riferimento ai condotti in polipropilene. Se, invece, come visto nelle simulazioni si utilizza un condotto metallico, più efficace dal punto di vista termico del polipropilene, presenta un grosso inconveniente: il peso. Utilizzare diciannove condotti metallici più la piastra e considerando anche il peso del fluido termovettore, nel caso in esame acqua, diventa complicato e sicuramente non applicabile a tutte le strutture esistenti, in quanto lo scheletro portante non riuscirebbe a reggere il peso aggiunto. D'altro canto le simulazioni effettuate utilizzando la piastra mostrano grandi vantaggi uniformando il profilo di temperatura delle celle. In particolare, la piastra favorisce lo scambio di calore trasversale riducendo le differenze di temperatura tra i diversi punti del modulo. Sfruttando il funzionamento della piastra si è, dunque, pensato di analizzare il comportamento del sistema variando il passo e il numero dei tubi. Il caso limite è quello di inserire, oltre alla piastra di 2mm, solamente due condotti di refrigerazione lungo la cornice del modulo (Figura 4. 35).

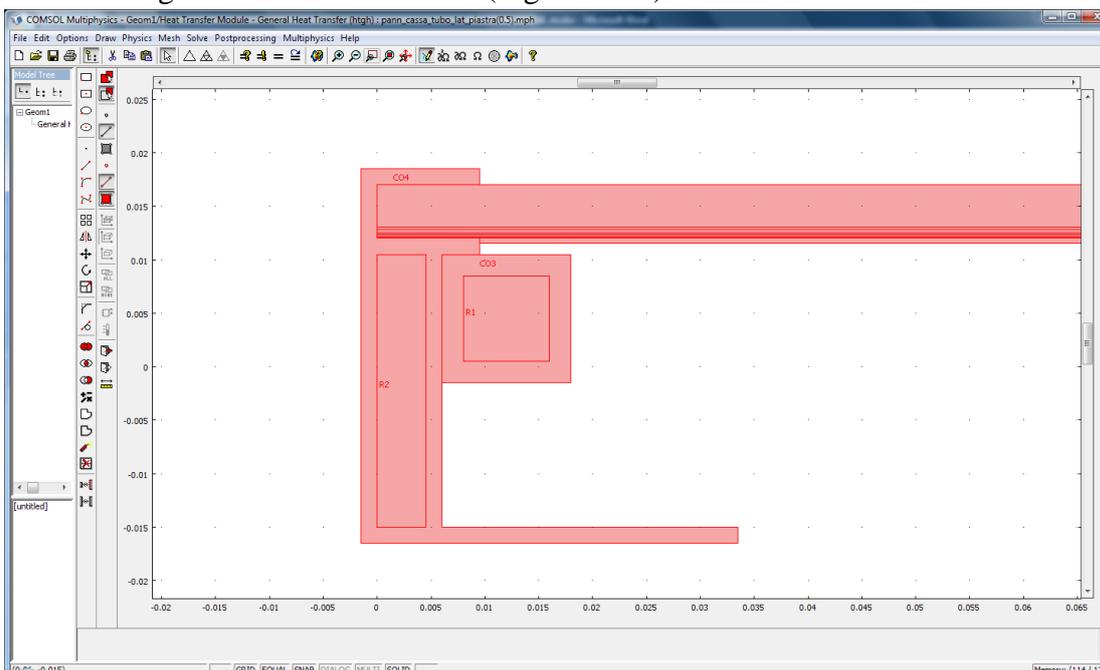


Figura 4. 35 - Modello CAD concio pannello DG Energy con sistema di raffreddamento ad acqua (tubi sulla cornice) e piastra

In Figura 4. 36 è illustrato il profilo di temperatura delle celle nella configurazione descritta pocanzi. Si nota una grande differenza di temperatura tra il centro e il bordo. Al centro si registrano temperature prossime a quelle del NOCT, questo evidenzia il fatto che si refrigera solo la parte esterna del pannello con benefici non trascurabili.

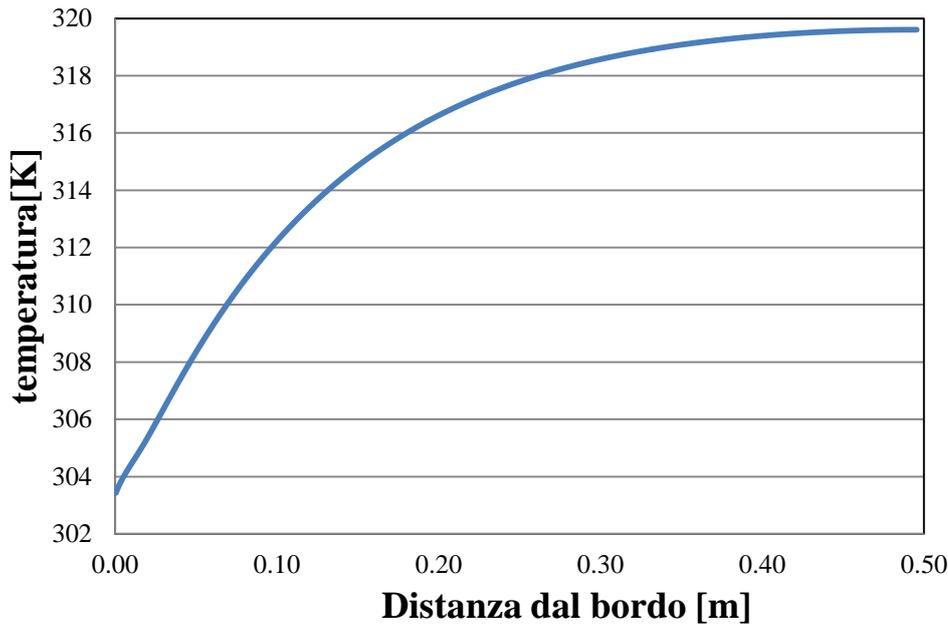


Figura 4. 36 - Profilo temperatura, due tubi in alluminio, piastra 2mm, moto laminare

Chiaramente è esagerato utilizzare solamente due tubi per raffreddare il collettore. Successivamente, si è aggiunto un condotto centrale. Come si vede dalla Figura 4. 37 questa configurazione porta un abbassamento, rispetto alla precedente, del profilo di temperatura in mezzzeria con benefici sulla temperatura media, ma ancora troppo alta la forbice tra temperatura massima e minima.

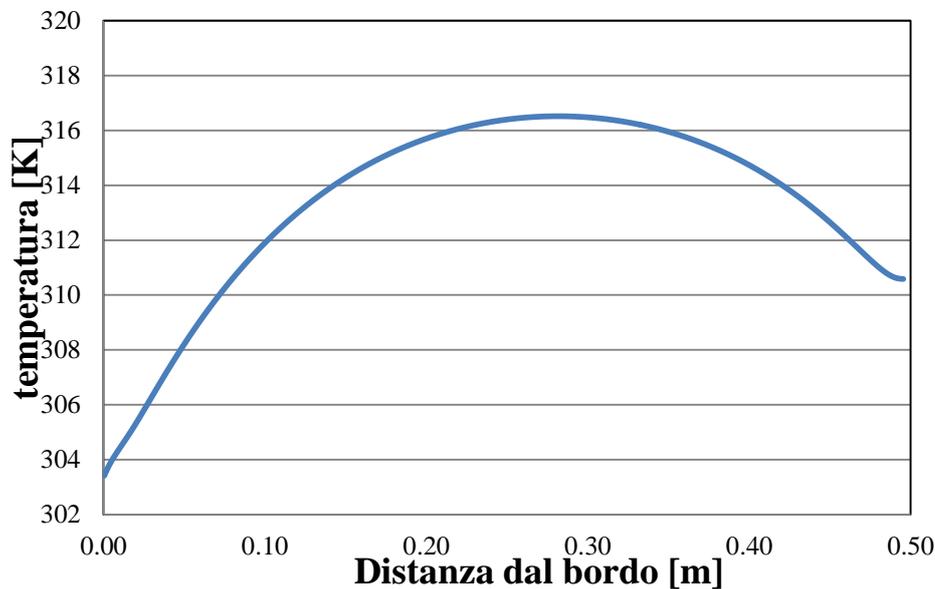


Figura 4. 37 - Profilo temperatura, tre tubi in alluminio, piastra 2mm, moto laminare

### 4.3.3 Ottimizzazione della soluzione ad acqua

Lo studio successivo ha riguardato l'ottimizzazione del posizionamento dei condotti al fine di ridurre la temperatura media, corrispondente ad un profilo quasi uniforme, utilizzando il numero minimo di tubi possibile. Questo ha condotto a considerare la cornice come elemento disperdente anche per la presenza della piastra metallica posteriore che trasferisce il calore generato dalla

parte più esterna del pannello verso la cornice in alluminio, materiale, per altro, dotato di elevata diffusibilità termica. Il grafico in Figura 4. 38 mostra i risultati delle simulazioni effettuate per ottimizzare il numero e il posizionamento dei tubi.

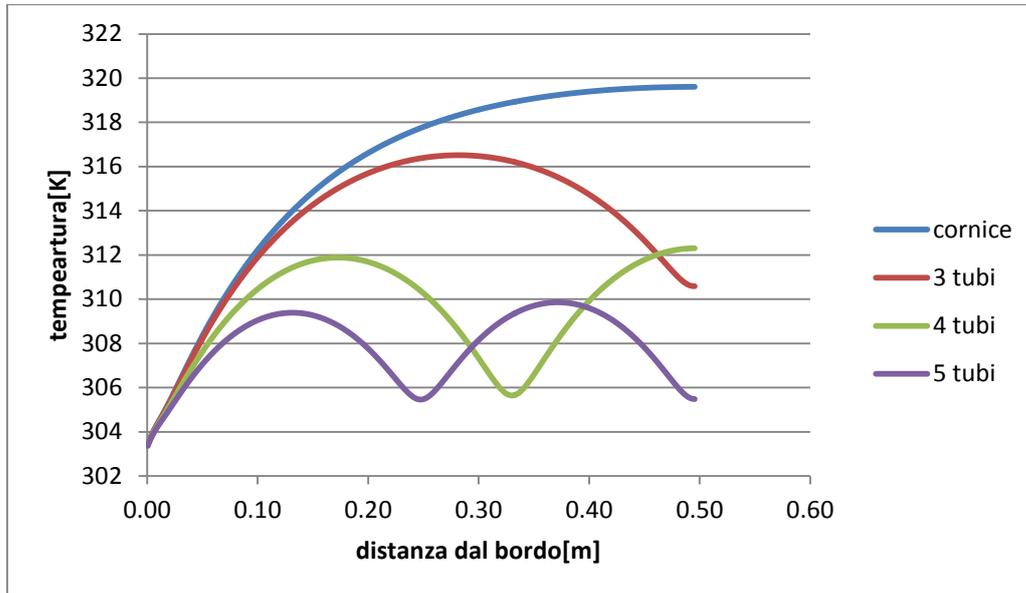


Figura 4. 38 - Profilo temperatura, diverse configurazioni da 2 a 5 tubi, piastra 2mm, moto laminare

Il profilo di temperatura che presenta la configurazione a cinque tubi è sufficientemente accettabile per lo scopo dello studio, inoltre si è ridotto drasticamente il numero di tubi utilizzati, alleggerendo, quindi, il sistema di refrigerazione. Quindi, il numero minimo di condotti a cui si è giunti, è di cinque, di cui uno è posizionato in mezzeria del pannello e gli altri due a una distanza di 159 mm ciascuno. In Figura 4. 39 è riportata la sezione della soluzione scelta ed in Figura 4. 40 il relativo profilo di temperatura che evidenzia una variazione massima di 3°K.

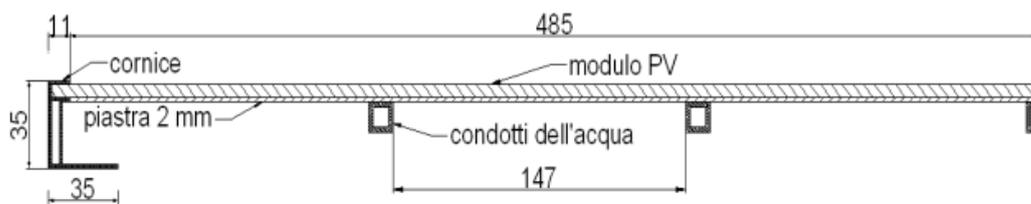


Figura 4. 39 - Sezione del pannello con posizionamento dei condotti ottimizzato

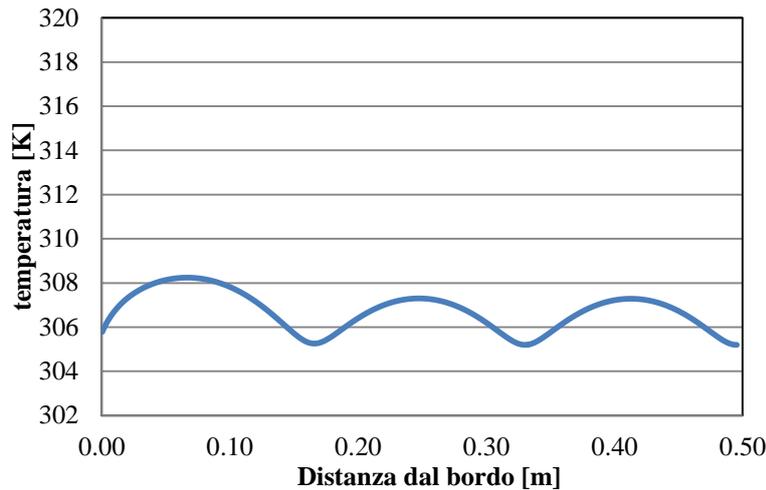


Figura 4. 40 - Profilo temperatura, 5 tubi alluminio, piastra 2mm, moto laminare

Interessante, inoltre, è il coefficiente di globale di perdita del pannello ottenuto per i casi studiati al variare del numero e del posizionamento dei condotti (Figura 4. 41).

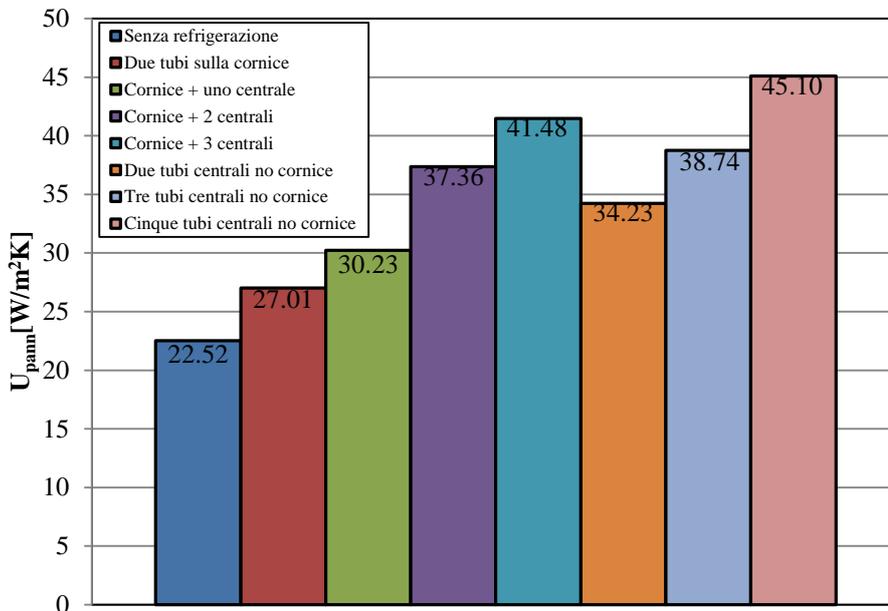


Figura 4. 41 - Coefficiente globale di perdita del pannello delle diverse configurazioni

Alcune considerazioni: avendo un peso così grande, rispetto all'aria, il circuito di circolazione dell'acqua sarà più dispendioso sia in termini di consumi che come costo iniziale. Essendo il costo la variabile più importante bisogna valutare con oculatezza i vantaggi di sfruttare l'acqua in sostituzione dell'aria. Inoltre, il sistema ad acqua deve essere in pressione e deve essere sottoposto a manutenzione ciclica. Bisogna tener conto anche di queste considerazioni, non solo dell'aspetto ingegneristico puro, poiché spesso sono proprio queste che fanno la differenza tra un sistema ed un altro.

#### 4.3.4 Sistema ad aria

##### Caso 1: sistema di raffreddamento con tre canali senza piastra

Di seguito si riportano i valori del numero di Reynolds, Nusselt e il corrispondente coefficiente di scambio termico convettivo per il caso in esame (Tabella 4. 11) .

velocità[m/s]	Reynolds	Prandlt	Nusselt	$h_{conv}$ [W/m <sup>2</sup> K]
5	16108	0.73	47.00	24

Tabella 4. 11 - Numeri adimensionali caratterizzanti il moto e coefficiente di scambio termico convettivo.

Il modello utilizzato per lo studio di questo caso è riportato in Figura 4. 42.

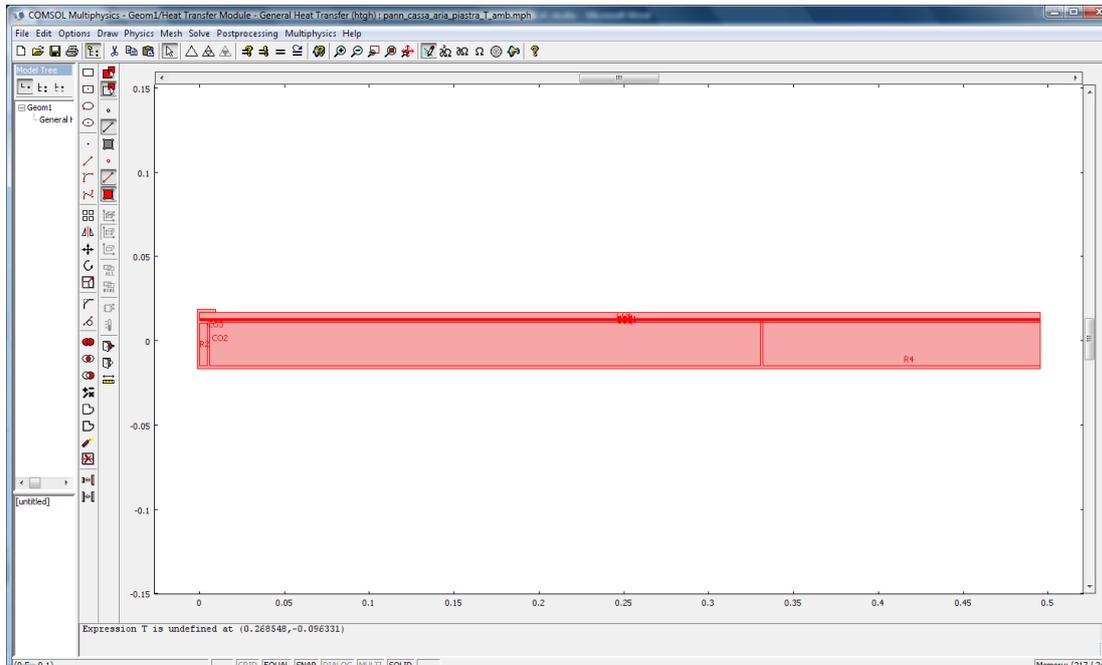


Figura 4. 42 - Modello CAD concio pannello DG Energy con sistema di raffreddamento ad aria( tre canali) e piastra

In Figura 4. 43, invece, è mostrato il profilo di temperatura della celle in silicio, si nota, come si ci aspettava, che la temperatura più bassa, dopo quella di bordo del telaio(0 m), si ha in corrispondenza del setto divisore del canale(0.25 m), questo avviene proprio perché il telaio dell’impianto svolge un ruolo fondamentale nel raffreddare il collettore e, in particolare, i setti divisori, che sono in diretto contatto, in questo caso particolare, con lo strato di tedlar.

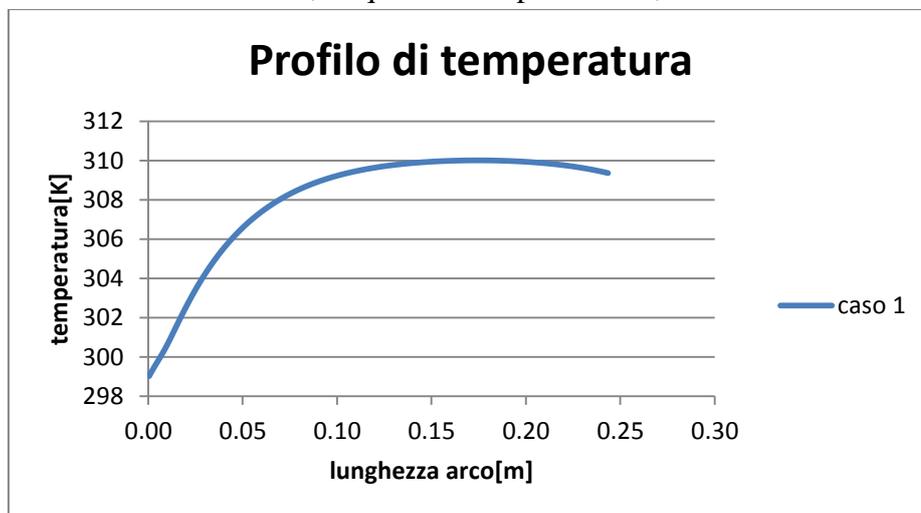


Figura 4. 43 - Profilo di temperatura, tre canali, senza piastra

La temperatura media alla quale si porta il collettore con questa configurazione è di 307.9 K.

### Caso 2: sistema di raffreddamento con tre canali con piastra spessa 1mm

L'uso della piastra, anche per il sistema con aria, è risultato avere dei grossi vantaggi in termini di profilo di temperatura. Si nota in figura come le temperature siano più uniformate lungo il collettore. Infatti, la temperatura di bordo si alza di qualche grado ma la temperatura di picco diminuisce, proprio per l'effetto che la piastra ha (Figura 4. 44).

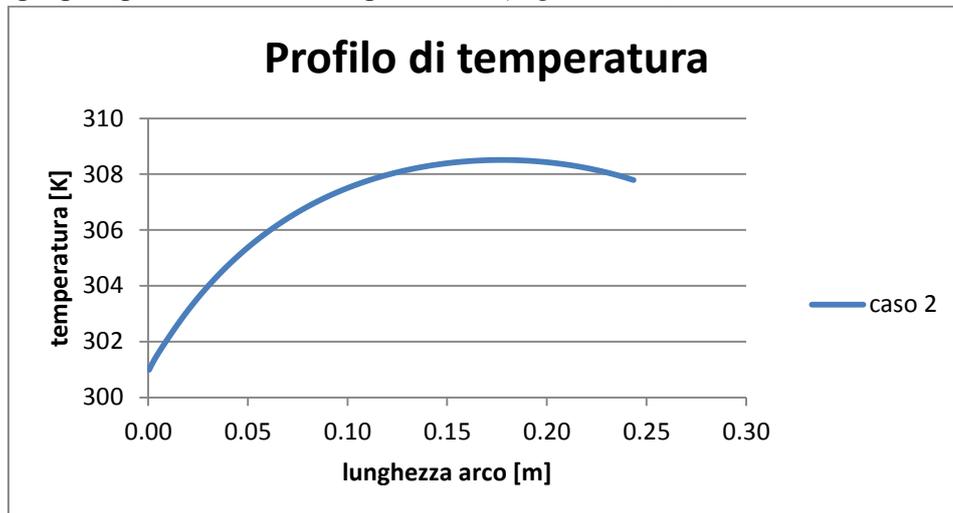


Figura 4. 44 - Profilo di temperatura, tre canali, con piastra 1mm

La temperatura media alla quale si porta il collettore con questa configurazione è di 306.8 K.

### Caso 3: sistema di raffreddamento con tre canali con piastra spessa 2mm

Si è analizzato anche il sistema aumentando lo spessore della piastra, dato il ruolo fondamentale del telaio. I risultati, però, di questa analisi non sono particolarmente migliorati. Questo è da additare all'aumento della capacità termica del collettore. Questo è evidente il Figura 4. 45, la quale mostra il profilo di temperatura del caso in esame.

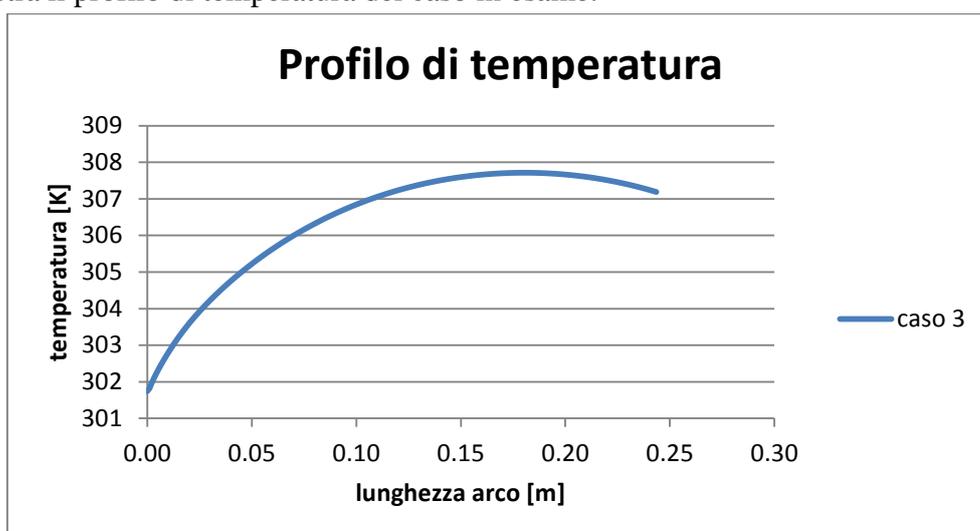


Figura 4. 45 - Profilo di temperatura, tre canali con piastra 2mm

La temperatura media alla quale si porta il collettore con questa configurazione è di 306.5 K.

**Caso4: sistema di raffreddamento con quattro canali con piastra spessa 1mm**

Aumentando i setti, quindi i canali, si ottiene un miglioramento sia dal punto di vista del profilo di temperatura, che di temperatura media. Naturalmente cambia anche il coefficiente di scambio termico convettivo poiché è diversa dagli altri casi la dimensione del canale (Tabella 4. 12).

velocità[m/s]	Reynolds	Prandlt	Nusselt	$h_{conv}$ [W/m <sup>2</sup> K]
5	15712	0.73	46.08	25

Tabella 4. 12 - numeri adimensionali caratterizzanti il moto e coefficiente di scambio termico convettivo

Da sottolineare, però, che il primo è molto più importante del secondo. Infatti la temperatura media si abbassa rispetto al caso precedente di circa 1°K, mentre il profilo migliora nettamente (Figura 4. 46) per l'inserimento di un altro setto che contribuisce allo smaltimento del calore del collettore.

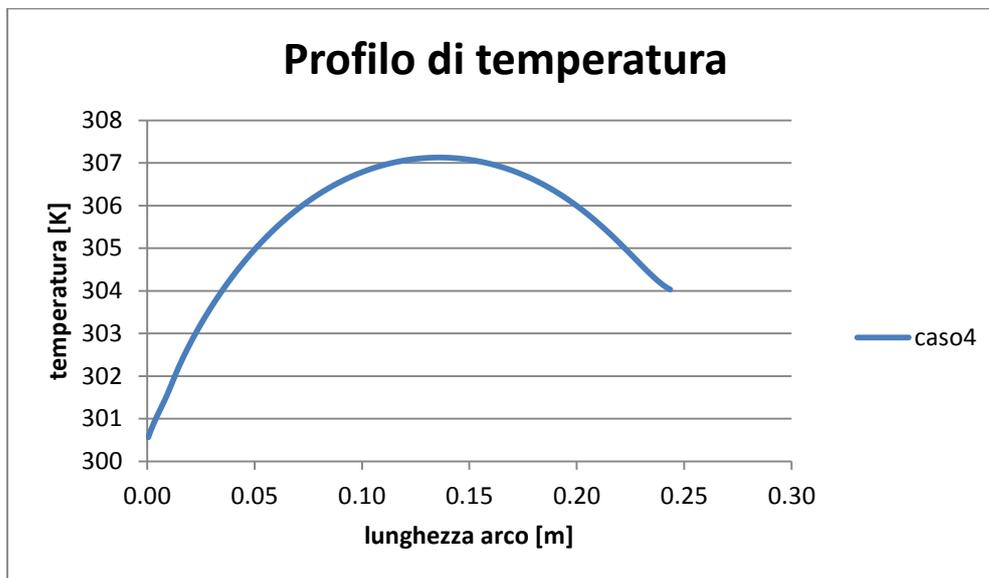


Figura 4. 46 - Profilo di temperatura, quattro canali con piastra spessa 1mm

**4.3.5 Confronto delle soluzioni ad aria**

Interessante mettere a confronto i casi. La Figura 4. 47 mostra, appunto, il confronto. Risulta chiaro ed evidente che il caso migliore sia il quarto. Si nota, ancora, che in termini di temperatura media non ci sono grandi differenze, invece cosa contraria in termini di profilo di temperatura.

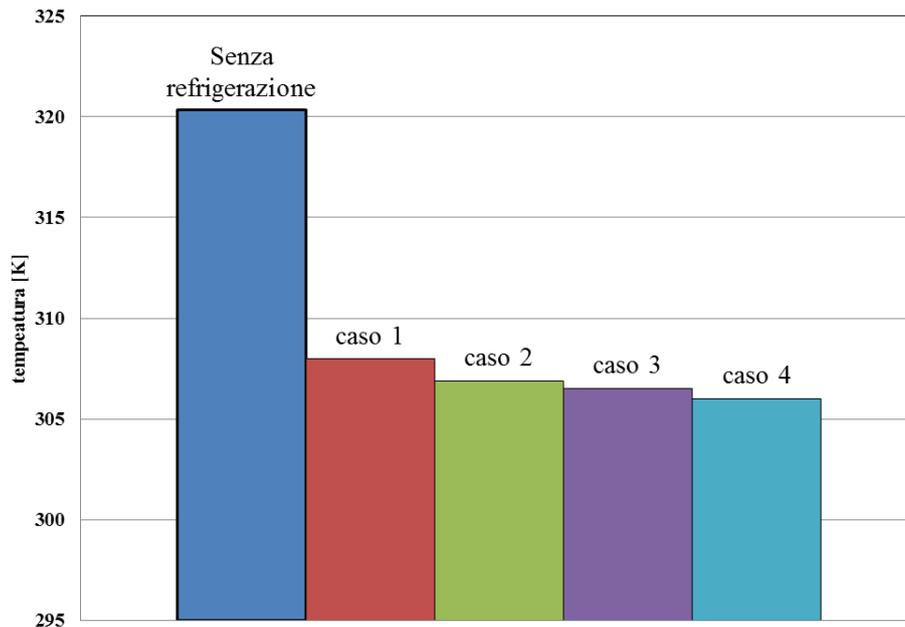


Figura 4. 47 - Temperatura media, quattro casi.

Un altro effetto che si nota dal confronto è il ruolo della piastra (Figura 4. 48). C'è una sostanziale differenza tra il caso senza piastra da tre setti e quello con la piastra, sempre da tre setti. Si vede, infatti, come le temperature siano più “spalmate” nel caso con piastra rispetto quello senza. La temperatura iniziale cresce ma quella di picco diminuisce. Ancora, se si aumenta lo spessore della piastra, considerando i casi con tre e quattro setti, i profili di temperatura si avvicinano.

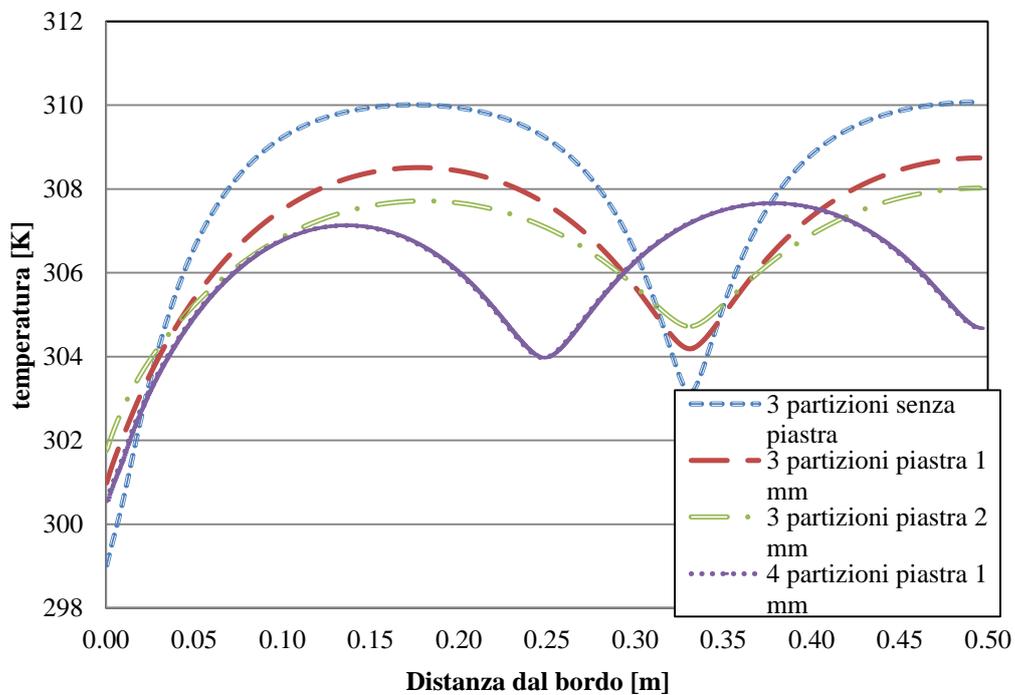


Figura 4. 48 - Confronto profilo di temperatura, caso aria

Effettuando il confronto in termini di  $U_{\text{pann}}$ , (Figura 4. 49) non si riscontrano grandi differenze tra i casi con piastra, mentre è presente una importante variazione tra il caso senza e con piastra.

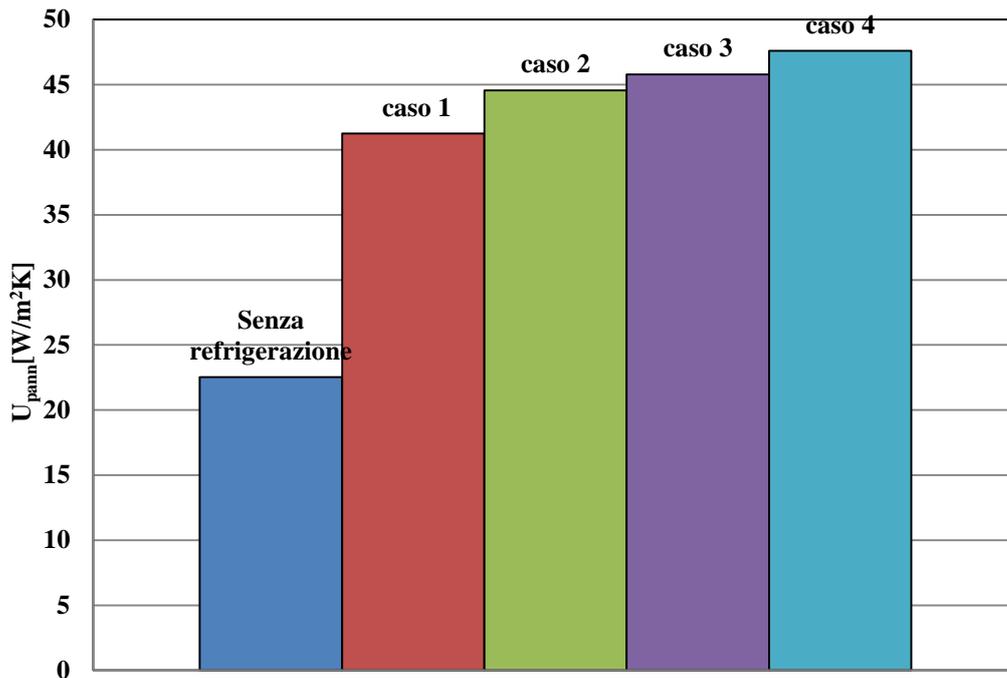


Figura 4.49 - Confronto dei coefficienti globali di scambio termico caso aria

Non conviene spingersi oltre in termini di spessore piastra, per i motivi già visti prima, cioè aumentando lo spessore non si riscontrano grossi benefici, mentre il peso e soprattutto la capacità termica aumenta di molto (Tabella 4.13). Stesso discorso per quanto riguarda i setti. Aumentare il numero dei setti porterebbe a migliorare il profilo di temperatura, ma non in maniera significativa e, d’altro canto, aumenterebbero le perdite di carico e il peso del collettore comincerebbe ad essere importante.

	tecnologia	T <sub>cell</sub> [°C]	U <sub>coll</sub> [W/m²K]	C <sub>t</sub> [J/m²K]
Caso base	no refrigerazione	47.17	22.52	10184
caso 1	3 canali no piastra	34.84	41.24	12614
caso 2	3 canali piastra 1mm	33.74	44.55	15084
caso 3	3 canali piastra 2mm	33.37	45.78	17474
caso 4	4 canali piastra 1 mm	32.85	47.61	15084

Tabella 4.13 - Temperatura media di cella, coefficiente globale trasmissione, capacità termica, caso aria.

#### **4.4 Rilievo sperimentale del campo di velocità**

Prima di proseguire con la descrizione delle analisi energetiche si presentano i risultati ottenuti dalle valutazioni effettuate in laboratorio in termini di campo di velocità nei condotti. In particolare si riporta il confronto tra i dati simulati e i dati misurati. L’obiettivo è validare i coefficienti di scambio termico convettivo derivanti dal campo di moto utilizzati nell’analisi energetica.

##### **4.4.1 Introduzione**

Per completare lo studio svolto è stato creato il modello del sistema di raffreddamento migliore. Dopo un'oculata analisi dei diversi tipi di sistema di raffreddamento si è arrivati alla conclusione che il migliore fosse quello ad aria. Quindi, al fine di analizzare il campo di moto è stato costruito il modello reale. Modello, nell'uso scientifico e tecnico-progettuale, è una rappresentazione reale di un oggetto o di un fenomeno, che corrisponde alla cosa modellata per il fatto di riprodurre (evidentemente alla luce di precisi riscontri fattuali ottenuti a partire da un metodo che sia garanzia di controllabilità) alcune caratteristiche o comportamenti fondamentali; in modo tale che questi aspetti possano essere mostrati, studiati, conosciuti laddove l'oggetto modellato non sia direttamente accessibile. La costituzione di un modello scientifico o tecnico, per quanto possa essere genericamente orientata o guidata in partenza da una teoria metafisica, è sempre il risultato di un contesto della prova rigoroso, predisposto in modo tale da non essere minimamente influenzato dalle aspettative e dall'interpretazione soggettiva dell'osservatore (si dice che l'osservazione e l'esperienza scientifiche, su cui si fonda la formulazione di modelli teorici validi, sono invarianti rispetto all'osservatore). Il modello è stato costruito per verificare la veridicità del campo di moto, risultato dell'analisi tramite software, nel condotto di raffreddamento. Si è focalizzata l'attenzione sul campo di moto, quindi sulla velocità, poiché il fenomeno di scambio termico convettivo, che è alla base del funzionamento del sistema, ed in particolare il coefficiente di scambio termico convettivo, dipende, proprio, dalla velocità. Quindi è necessario verificare che il campo di moto presente nelle simulazioni risulta qualitativamente e quantitativamente simile a quello reale.

#### 4.4.2 Creazione del Modello

Il primo problema nella creazione di un modello è comprendere cosa realmente andare a realizzare per studiare il fenomeno desiderato. Nel caso in esame è sufficiente realizzare il condotto di raffreddamento. Sono state utilizzate delle tavole in compensato per creare il modello (Figura 4. 50).



Figura 4. 50 - Modello Reale

Utilizzando, però, questo materiale si potrebbero avere effetti indesiderati sul campo di moto, data la alta rugosità superficiale del legno rispetto al condotto originale in alluminio. Per ovviare a questo problema è stata passata una mano di vernice in modo tale da aver reso la superficie liscia, quindi simile all'alluminio. L'aria è immessa nel condotto tramite una ventola (Figura 4. 51).



Figura 4. 51 - Ventola

Naturalmente la ventola deve assorbire la minor potenza possibile, altrimenti il sistema di raffreddamento diventa oneroso in termini di consumo energetico e, quindi, rischierebbe di consumare più dell'energia guadagnata. Più precisamente la ventola usata ha le seguenti caratteristiche:

- Potenziale: 12 Volt
- Corrente: 0.14 Ampere

Sono stati eseguiti una serie di fori su diverse sezioni del condotto. Precisamente tre fori per tre sezioni. I fori sono stati eseguiti: uno in mezzeria della sezione considerata, un altro sulla sinistra e l'ultimo sulla destra. Per ottenere più misure, considerando che il profilo di velocità è simmetrico, i fori laterali sono asimmetrici. In Figura 4. 52 sono riportate le indicazioni geometriche della posizione dei fori.





Figura 4. 54 - Strumenti Babuc

Gli strumenti Babuc possono connettersi direttamente a sensori per la misura di :1 - Temperatura aria, superfici, liquidi, fumi, senza contatto, radiante; 2 - Umidità relativa, Contenuto idrico; 3 - Pressione atmosferica e differenziale; 4 - Velocità dell'aria; 5 – Illuminamento; 6 - Radiazione solare, UVA, UVB, etc; 7 - Flusso termico; 8 - Concentrazione gas.

Per misurare la velocità dell'aria nelle condotte è stata utilizzata la sonda BSV 105 dell SI® (Figura 4. 55).



Figura 4. 55 - Sonda BSV 105

È una sonda anemometrica portatile a filo caldo omnidirezionale. È utilizzata, appunto, per misure della velocità media dell'aria ( $v_a$ ) e di intensità di turbolenza (TU) come da norma ISO7726. È adatta a misure in ambienti, condotte, bocchette di ventilazione e, inoltre, è destinata ad un uso portatile o installabile su un dispositivo. Nel caso in esame è stata collegata al dispositivo BABUC, descritto prima.

#### 4.4.3 Misure acquisite

Per comodità sono stati numerati i fori. In, particolare ai fori posti sulle sezioni trasversali alla direzione principale del fluido è stato assegnato l'indice numerico, crescente dalla mandata, mentre ai fori sulle sezioni parallele alla direzione del fluido è stato assegnato l'indice alfabetico, crescente da sinistra a destra. Quindi, si riportano in Tabella 4. 14 i valori puntuali della velocità in m/s misurati.

v[m/s]	A	B	C
<b>1</b>	3.392	2.46	2.7
<b>2</b>	2.87	2.41	2.63
<b>3</b>	2.77	2.16	2.48

Tabella 4. 14 - Valori velocità puntuali misurati

Dalla misure effettuate è stata estrapolata la velocità media nella sezione considerata effettuando una media pesata in funzione della porzione di area corrispondente al foro. In pratica è stata divisa la sezione trasversale alla direzione del fluido in tre sotto – sezioni differenti (S1, S2, S3), poiché i fori sono asimmetrici rispetto a quello centrale, che è posto sull’asse del condotto (Figura 4. 55). Quindi, la velocità del foro è stata moltiplicata per la porzione di area corrispondente, sommate i prodotti delle velocità per le aree e diviso tutto per la somme delle aree si è ottenuta la velocità media nella sezione desiderata.

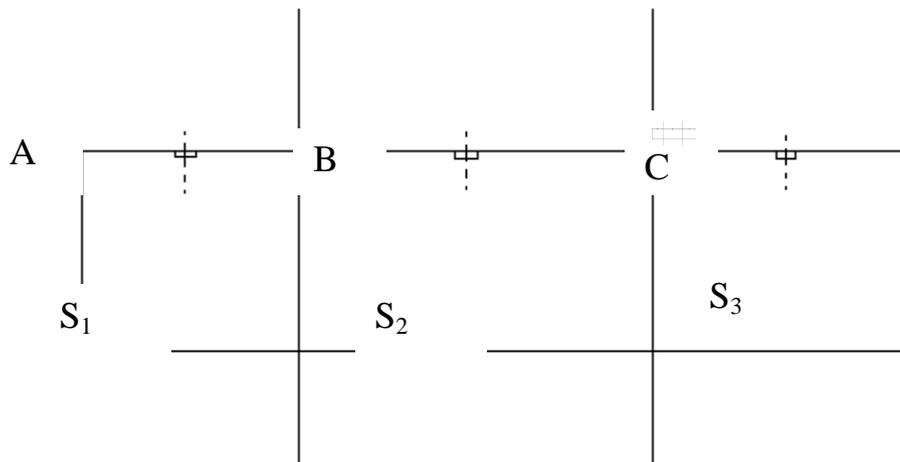


Tabella 4. 15 - Calcolo della velocità ,media: sottosezioni

La velocità media nella sezione centrale del canale ortogonale alla direzione del fluido è:

$$\bar{v} = 2.28 \text{ m/s}$$

In Figura 4. 56 sono riportati i profili di velocità nelle tre sezioni simulati e misurati.

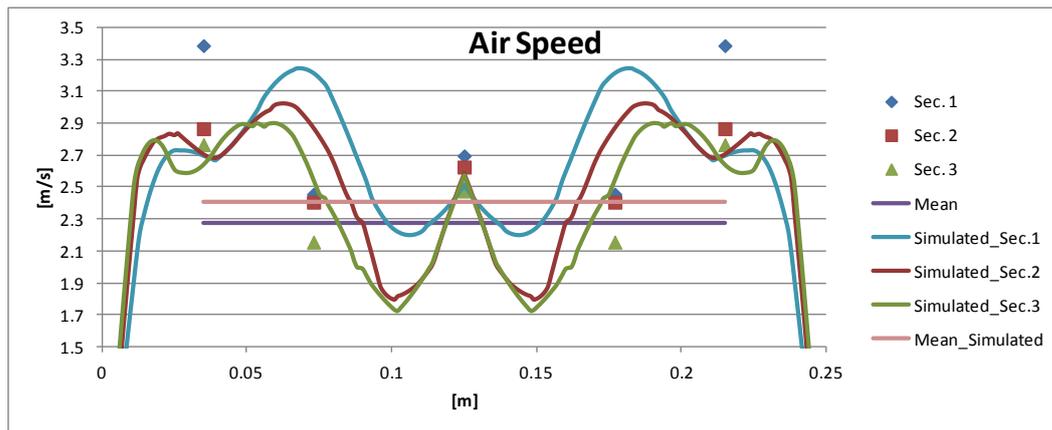


Figura 4. 56 - Profilo di velocità

È interessante notare l'andamento del profilo di velocità, in particolare si nota un'accelerazione del fluido nella zona centrale e laterale. Questo è dovuto alla ventola e alla sua posizione, infatti, poiché la ventola espelle l'aria in tutte le direzioni, inoltre essendo distanziata dal bordo ed essendo l'asse della ventola perpendicolare alla direzione del fluido, questo è costretto ad un cambio di direzione. Quindi, si crea una zona dove l'aria defluisce con semplicità, zona centrale del grafico (Figura 4. 56), una zona, quella laterale, dove si presenta una decelerazione, e una zona di accelerazione, quella vicino ai bordi. Quest'ultimo effetto è causato dal fluido che viene espulso in direzione opposta a quella principale di moto e, quindi, non trovando vie d'uscita e non potendo prendere la strada centrale, poiché occupata dall'aria che espelle la ventola si riversa sui lati accelerando. Si capisce che il campo di moto all'interno dei condotti è abbastanza complesso, ma la verifica effettuata permette di giustificare il campo di moto utilizzato nelle simulazioni in quanto le velocità imposte nel modello di calcolo risultano raggiungibili nella realtà con ventole a basso consumo e differiscono in termini di medie solamente del 5% rispetto alla velocità media simulata.

#### **4.5 Analisi Energetica**

Utilizzando il software TRNSYS, descritto nei precedenti capitoli, è stata effettuata l'analisi energetica dei sistemi, più performanti, finora descritti. In particolare, sono state analizzate quattro giornate tipo:

- *giornata serena estiva*
- *giornata nuvolosa estiva*
- *giornata serena invernale*
- *giornata nuvolosa invernale*

Infine, sono state condotte simulazioni annuali al fine di valutare l'incremento di energia elettrica prodotta, rispetto al sistema privo di qualsivoglia impianto di raffreddamento, e del rendimento. Il modello utilizzato in TRNSYS è riportato in Figura 4. 57. I vari componenti sono:

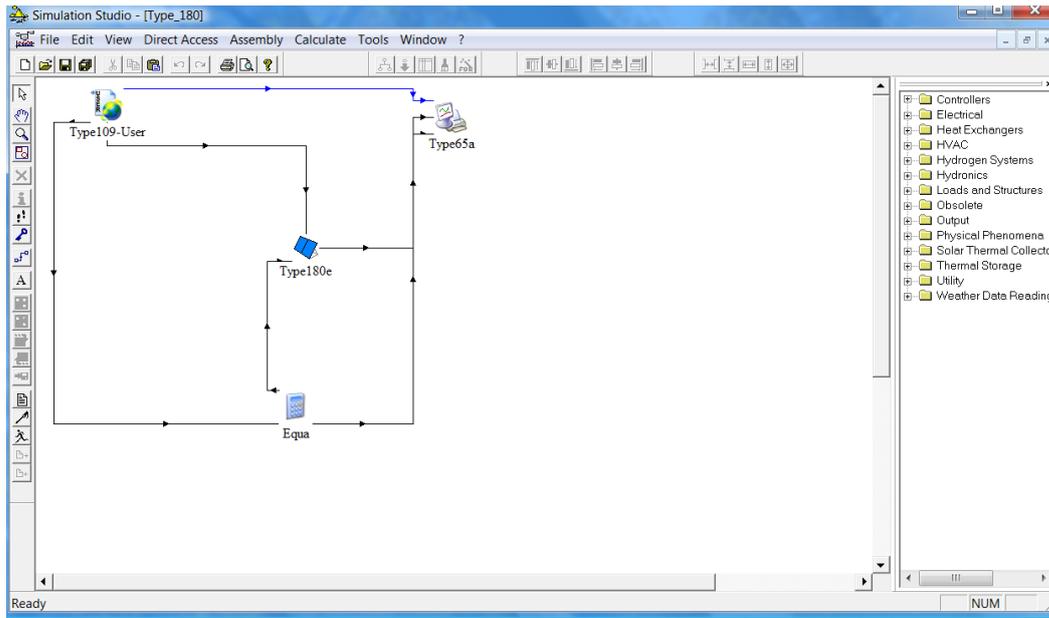


Figura 4. 57 - Modello TRNSYS utilizzato per l'analisi energetica

#### 4.5.1 Risultati

Come anticipato nel precedente capitolo è stato utilizzato un type particolare il type 180, il quale permette di schematizzare il raffreddamento del pannello. La modalità utilizzata è la terza, in quanto, così facendo, si tiene conto sia della diversa  $U_{pann}$  delle diverse configurazioni che della capacità termica di ogni sistema. I casi oggetto di analisi sono:

- sistema di raffreddamento ad acqua con 5 tubi in alluminio con piastra spessa 2mm, regime laminare ;
- sistema di raffreddamento ad aria con quattro canali e piastra da 1mm ;

questi sono stati confrontati con i casi:

- sistema di raffreddamento ad acqua con 19 tubi in alluminio con piastra spessa 2mm, regime turbolento;
- pannello senza sistema di raffreddamento;

Sono stati utilizzati questi due casi come mezzi di paragone, poiché sono rispettivamente il caso più performante e quello meno.

#### Efficienza

##### *Giornata estiva serena*

In Figura 4. 58 è mostrato l'andamento del rendimento considerando una giornata serena estiva:

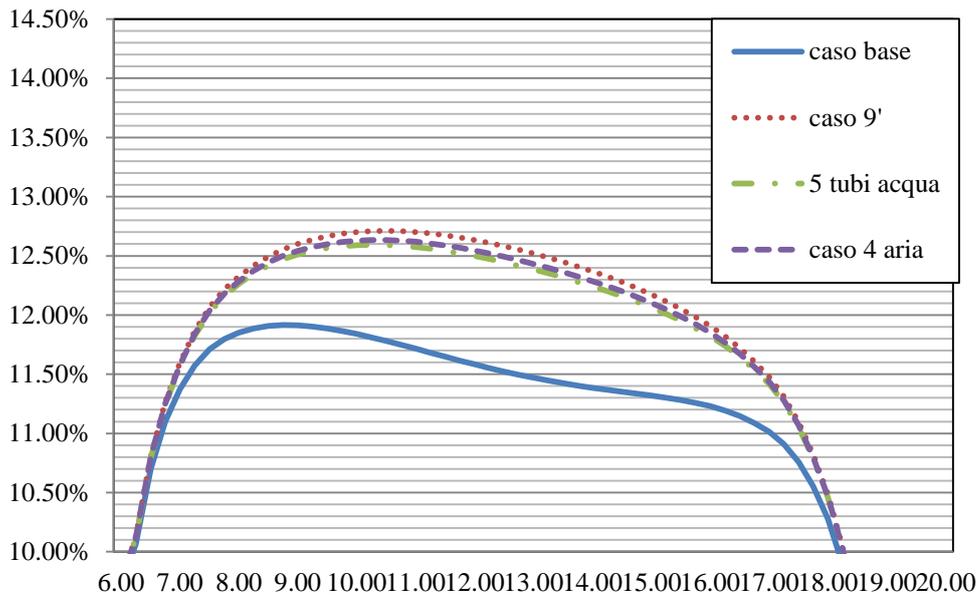


Figura 4. 58 - Andamento del rendimento per le quattro configurazioni considerate per una giornata serena estiva

Si nota che i casi con sistema di raffreddamento presentano un andamento più o meno simile, anche se, il caso con fluido termovettore aria risulta di essere leggermente migliore di quello a cinque tubi utilizzando acqua.

*Giornata estiva nuvolosa*

In Figura 4. 59 è mostrato l’andamento del rendimento considerando una giornata estiva nuvolosa:

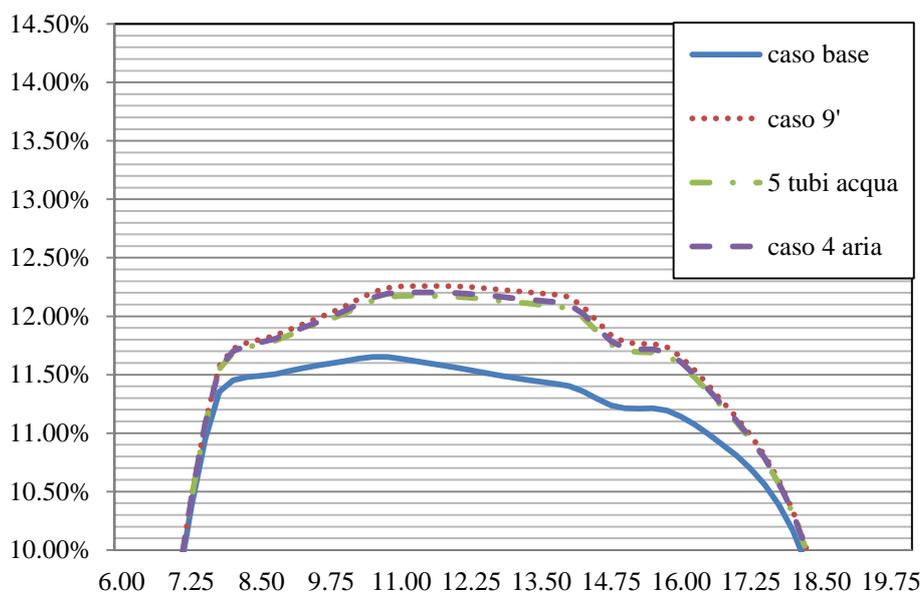


Figura 4. 59 - Andamento del rendimento per le quattro configurazioni considerate per una giornata nuvolosa estiva

Si nota che, anche in questo caso, i sistemi di raffreddamento presentano un andamento più o meno simile e, inoltre, il caso con fluido termovettore aria risulta essere leggermente migliore di quello a cinque tubi utilizzando acqua.

#### *Giornata invernale serena*

In Figura 4. 60 è mostrato l'andamento del rendimento considerando una giornata invernale serena:

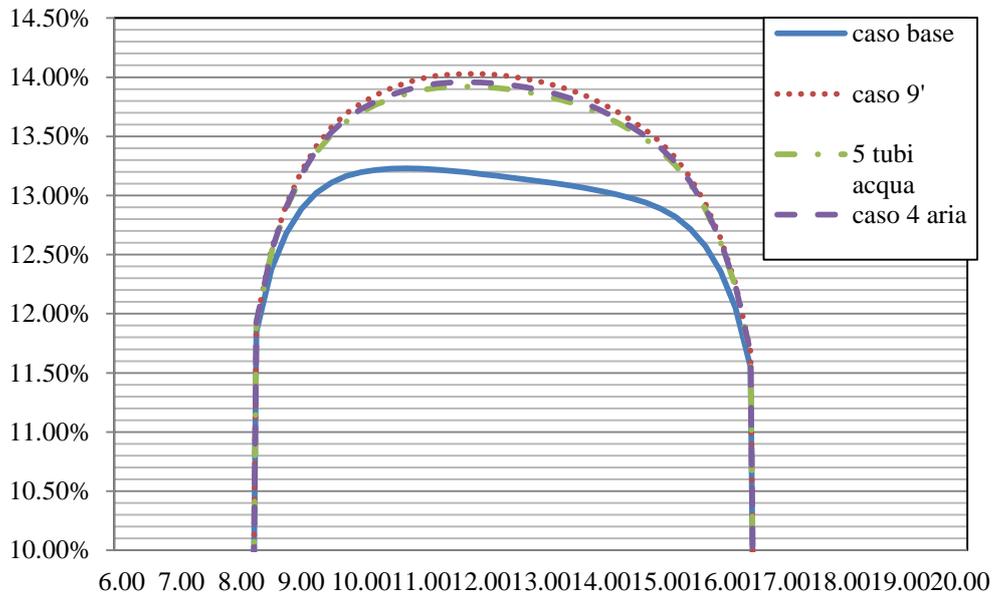


Figura 4. 60 - Andamento del rendimento per le quattro configurazioni considerate per una giornata serena invernale

Si nota che, anche in questo caso, i sistemi di raffreddamento presentano un andamento più o meno simile e, inoltre, il caso con fluido termovettore aria risulta di essere leggermente migliore di quello a cinque tubi utilizzando acqua.

#### *Giornata invernale nuvolosa*

In Figura 4. 61 è mostrato l'andamento del rendimento considerando una giornata invernale nuvolosa:

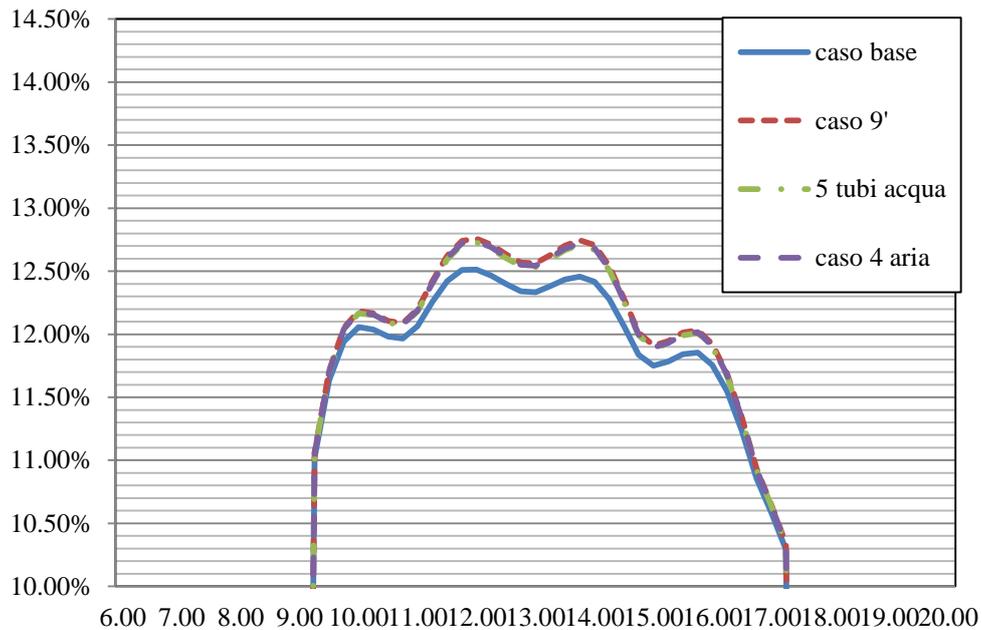


Figura 4. 61 - Andamento del rendimento per le quattro configurazioni considerate per una giornata nuvolosa invernale.

Si nota che, anche in questo caso, i sistemi di raffreddamento presentano un andamento più o meno simile e, inoltre, il caso con fluido termovettore aria risulta di essere leggermente migliore di quello a cinque tubi utilizzando acqua. I benefici maggiori si hanno nelle giornate serene dove le temperature raggiunte dalle celle fanno sì che il rendimento cali di molto. Questo fenomeno si presenta soprattutto nelle ore centrali quando la radiazione solare è maggiore. È interessante notare come il rendimento guadagna un punto percentuale nei casi di giornata estiva invernale e estiva. Benefici minori, invece, si registrano in caso di giornate nuvolose; in particolare per quanto riguarda l'inverno. Infatti, nel caso di giornata estiva nuvolosa il sistema risulta molto più vantaggioso rispetto ad una giornata nuvolosa invernale, questo perché influisce molto sulla temperatura di cella la temperatura ambiente, che risulta essere molto più elevata in estate che in inverno.

### Energia Prodotta

In Tabella 4. 16 sono riportati i risultati delle simulazioni annuali in termini di energia elettrica prodotta e, molto interessante, l'incremento percentuale ottenuto rispetto al caso di riferimento senza refrigerazione.

	base	acqua		aria	
	Energia Elettrica[Wh]	Energia Elettrica[Wh]	Incremento percentuale	Energia Elettrica[Wh]	Incremento percentuale
<b>gennaio</b>	12663	13138	3.76%	13163	3.95%
<b>febbraio</b>	16268	16968	4.30%	17004	4.52%
<b>marzo</b>	23208	24316	4.77%	24373	5.02%
<b>aprile</b>	24580	25808	5.00%	25872	5.25%
<b>maggio</b>	26891	28271	5.13%	28343	5.40%
<b>giugno</b>	28175	29748	5.58%	29829	5.87%
<b>luglio</b>	28468	30086	5.68%	30169	5.97%
<b>agosto</b>	27870	29474	5.75%	29557	6.05%
<b>settembre</b>	23549	24811	5.36%	24877	5.64%
<b>ottobre</b>	17940	18761	4.58%	18804	4.82%
<b>novembre</b>	14793	15410	4.17%	15442	4.38%
<b>dicembre</b>	13612	14138	3.87%	14165	4.07%

Tabella 4. 16 - Produzione elettrica mensile e incrementi percentuali.

L'energia elettrica totale annua e il rendimento di conversione medio annuo per i diversi casi è riportato nella seguente Tabella 4. 17.

	Energia elettrica annua [KWh]	Incremento di energia [%]	Rendimento medio annuo [%]
Caso base	258.17	----	12.04
Caso 9'	271.596	5.26	12.68
Acqua 5 tubi	270.929	5.00	12.65
Aria 4 canali	271.568	5.25	12.68

Tabella 4. 17 - Rendimento medio annuo, incremento di energia %, energia elettrica annua dei casi presi in esame.

Dai valori in riportati nelle tabelle precedenti emergono delle considerazioni interessanti. Si nota come il caso ad acqua a cinque tubi sia competitivo rispetto al caso 9' ( diciannove tubi, moto turbolento ). Le perdite, in termini di energia, rispetto al caso 9' sono esigue ed, inoltre, il sistema è stato di molto semplificato riducendo il numero dei tubi e aumentandone il passo. Ancora meglio per quanto riguarda l'aria. Nonostante le proprietà termiche dell'aria, peggiori rispetto all'acqua, le performance dell'impianto ad aria sono le stesse del sistema utilizzando acqua. La soluzione impiantistica utilizzando come fluido termovettore aria è sicuramente la migliore. Un altro grosso vantaggio è la semplicità del sistema di raffreddamento. Infatti, il sistema di circolazione non è dispendioso in termini di energia assorbita rispetto a quello ad acqua il quale, oltre al grande dispendio di energia, necessita di sistemi a tenuta stagna e deve essere in grado di garantire moto turbolento.

## **CONCLUSIONI**

È stato affrontato lo studio di un sistema di raffreddamento per un collettore fotovoltaico mirato a migliorarne l'efficienza. È stata affrontata, inoltre, un'analisi dell'evoluzione energetica ed è stata fatta una fotografia sulla situazione energetica mondiale e italiana. In questa si è

contestualizzato il ruolo delle tecnologie di produzione di energia alternative dando particolare risalto al ruolo della ricerca. Proprio in questa direzione mirava lo studio svolto. Infatti, molti studi sono stati intrapresi e fatti sui sistemi di raffreddamento dei pannelli fotovoltaici. Come è noto questo particolare sistema di produzione di energia elettrica non risulta essere competitivo, se non per incentivi statali e comunitari. Sviluppare e rendere efficiente il sistema fotovoltaico è un obiettivo che si sono dati molti ricercatori, in quanto avendo un'efficienza molto bassa, dell'ordine del 17% nei casi migliori, ha una forbice di miglioramento alta. Nell'analisi svolta sono stati messi a confronto due sistemi di raffreddamento: uno ad acqua ed uno ad aria. Si è visto come il telaio e i materiali delle condotte di raffreddamento hanno un ruolo fondamentale per quanto riguarda lo scambio termico. Sono stati esaminati, in riferimento al caso ad acqua, polietilene ed alluminio. Il primo per ragioni commerciali, esistono, infatti, in commercio già dei sistemi a tubi in polietilene, appunto, per il raffreddamento. Il risultato delle simulazioni, è stato usato un software ai volumi finiti di tipo multi – fisico in questo lavoro, ha evidenziato come questi sistemi plastici non sono adatti per lo scopo prefissato in questo lavoro. Non riescono a garantire un sufficiente raffreddamento del collettore, e quindi, delle celle. L'alluminio, d'altro canto, essendo un ottimo conduttore riesce a smaltire molto più calore, prestandosi bene allo scopo. Non sono stati analizzati diversi materiali per il sistema ad aria, perché non essendo l'aria un ottimo fluido termovettore il sistema, sicuramente, non sarebbe stato adatto allo scopo. Un ruolo di primo ordine, invece, svolgono per l'aria i setti divisorii dei canali, poiché aumentano la superficie di scambio termico e quindi migliora il trasferimento di calore. Il confronto delle due soluzioni impiantistiche è stato affrontato con un'analisi energetica utilizzando un ulteriore software. Questa volta si tratta di un software specifico: il TRNSYS. Le simulazioni hanno evidenziato come il sistema ad aria è risultato essere migliore di quello ad acqua. Presentando, infatti, un coefficiente di scambio termico globale più alto il sistema ad acqua riesce a smaltire più calore. Le simulazioni energetiche, infatti, evidenziano una maggiore produzione di energia elettrica, data dall'aumento di efficienza della cella dovuta alla sua temperatura, minore rispetto al caso privo di sistema di raffreddamento. Il sistema, inoltre, risulta essere vantaggioso anche d'inverno quando la temperatura esterna è bassa ed in caso di giornate nuvolose, quindi con forte variabilità dell'irraggiamento solare. Per completezza del lavoro sono state effettuate dei rilievi sperimentali della velocità al fine di validare il campo di moto imposto nelle condizioni al contorno del modello realizzando un modello reale del circuito di raffreddamento. Come detto, lo scambio termico convettivo, che è alla base del funzionamento dell'impianto di raffreddamento, dipende fortemente dalla velocità, ragion per cui si è condotta quest'ultima analisi. Dalle misurazioni effettuate sul modello reale è possibile confermare la validità del campo di moto imposto nel software.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] *Key World Energy Statistics 2012*, International Energy Agency IEA, Paris, France <http://www.iea.org/>;
- [2] *Rapporto annuale Efficienza energetici 2011*, ENEA Ente nazionale energia e ambiente, Roma, Italia <http://www.enea.it/it>;
- [3] *Gli scenari prossimi futuri del settore energetico*, The European House, Ambrosetti (2007), Milano, Italia <http://www.ambrosetti.eu/it>;
- [4] *Consiglio Europeo di Bruxelles 8-9- Marzo 2007*, Consiglio dell'unione europea, (2007) European Commission, Brussels (Belgium) <http://www.europa.eu> ;
- [5] *Bilancio Energetico Nazionale*, Ministero dello Sviluppo Economico, Roma, Italia <http://dgerm.sviluppoeconomico.gov.it/dgerm/>;
- [6] *Scenari energetici al 2040*, Exxon Mobil 2012, Exxon Mobil Corporation, Buffalo, USA, <http://www.exxonmobil.com>;
- [7] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma, Italia [www.isprambiente.gov.it](http://www.isprambiente.gov.it);
- [8] European Commission, Joint Research Centre, Brussels (Belgium) [www.europa.eu](http://www.europa.eu);
- [9] *Autorità per l'energia elettrica ed il gas*, Milano, Italia [www.autorita.energia.it/](http://www.autorita.energia.it/);
- [10] *INVENTARIO ANNUALE DELLE EMISSIONI DI GAS SERRA SU SCALA REGIONALE - Le emissioni di anidride carbonica dal sistema energetico*, Rapporto 2008, ENEA, Roma, Italia <http://www.enea.it/it>;
- [11] *Calcolo e valutazione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e definizione di scenari di riduzione per la città di Bolzano*, EURAC 2010, Bolzano, Italia, <http://www.eurac.edu>;

- [12] *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, Green Roof 2008*, United States Environmental Protection Agency, Washington DC, USA, <http://www.epa.gov/>;
- [13] *T. Van Renterghem, D. Botteldooren, Numerical evaluation of sound propagating over green roofs*, Journal of Sound and Vibration, Volume 317, Issues 3–5, 11 November 2008, Pages 781-799;
- [14] *Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs*, Timothy Van Renterghem, Dick Botteldooren, Ghent University, Department of Information Technology, Belgium 2008;
- [15] *A Niachou, K Papakonstantinou, M Santamouris, A Tsangrassoulis, G Mihalakakou*, Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance, Energy and Buildings, Volume 33, Issue 7, September 2001, Pages 719-729;
- [16] *L'evapotraspirazione come sistema di smaltimento delle acque reflue*, Christian Barrella, Nicola G. Grillo, Geva edizioni, 2006;
- [17] *Issa Jaffal, Salah-Eddine Ouldboukhitine, Rafik Belarbi*, A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance, Renewable Energy, Volume 43, July 2012, Pages 157-164;
- [18] *Wong Nyuk Hien, Tan Puay Yok, Chen Yu*, Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate, Building and Environment, Volume 42, Issue 1, January 2007, Pages 25-54;
- [19] *Rakesh Kumar, S.C. Kaushik*, Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings, Building and Environment, Volume 40, Issue 11, November 2005, Pages 1505-1511;
- [20] *R. Fioretti, A. Palla, L.G. Lanza, P. Principi*, Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate, Building and Environment, Volume 45, Issue 8, August 2010, Pages 1890-1904;
- [21] *Assessment of green roof performance for sustainable buildings under winter weather Conditions* - Mingjie Zhao, J. Srebric, Journal of Central South University March 2012, Volume 19, Issue 3, pp 639-644;

- [22] *Fabricio Bianchini, Kasun Hewage*, Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach, *Building and Environment*, Volume 58, December 2012, Pages 152-162;
- [23] *Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto*, Doug Banting, Dr. James Li, Paul Missios, Dept. of Architectural Science, Ryerson University, Ontario, 2005;
- [24] *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde*, UNI 11235, UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia;
- [25] *Quaderni del Manuale di Progettazione Edilizia, Le Chiusure Orizzontali*, Gottfried Arie, Hoepli, 2010;
- [26] Giardini pensili: la posa della guaina antiradice, Napoli, Italia, <http://www.habitage.it/>;
- [27] *Giardini pensili. Copertura a verde e gestione delle acque meteoriche*, Paolo Abram, Sistemi editoriali, 2004;
- [28] *D.J. Sailor, D. Hutchinson, L. Bokovoy*, Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S., *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 7, 2008, Pages 1246-1251;
- [29] *Gabriel Pérez, Anna Vila, Lidia Rincón, Cristian Solé, Luisa F. Cabeza*, Use of rubber crumbs as drainage layer in green roofs as potential energy improvement material, *Applied Energy*, Volume 97, September 2012, Pages 347-354;
- [30] Optima Giardini Pensili srl, Pescara, Italia, <http://www.optimagiardinipensili.it/>;
- [31] *Ekaterini Eumorfopoulou, Dimitris Aravantinos*, The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece, *Energy and Buildings*, Volume 27, Issue 1, February 1998, Pages 29-36;
- [32] *Elena Palomo Del Barrio*, Analysis of the green roofs cooling potential in buildings, *Energy and Buildings*, Volume 27, Issue 2, April 1998, Pages 179-193;
- [33] *Eleftheria Alexandri, Phil Jones*, Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results, *Building and Environment*, Volume 42, Issue 8, August 2007, Pages 2835-2849;
- [34] *D.J. Sailor*, A green roof model for building energy simulation programs, *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 8, 2008, Pages 1466-1478;

- [35]. *FASST Vegetation Models*, S. Frankenstein, g. Koenig, Engineer research and Development Center (2004);
- [36] *Issa Jaffal, Salah-Eddine Ouldboukhitine, Rafik Belarbi*, A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance, *Renewable Energy*, Volume 43, July 2012, Pages 157-164;
- [37] *Salah-Eddine Ouldboukhitine, Rafik Belarbi, Issa Jaffal, Abdelkrim Trabelsi*, Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model, *Building and Environment*, Volume 46, Issue 12, December 2011, Pages 2624-2631;
- [38] *Chi Feng, Qinglin Meng, Yufeng Zhang*, Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs, *Energy and Buildings*, Volume 42, Issue 6, June 2010, Pages 959-965;
- [39] *C.Y. Jim, S.W. Tsang*, Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issue 6, June 2011, Pages 1341-1350;
- [40] *Paulo Cesar Tabares-Velasco, Jelena Srebric*, A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions, *Building and Environment*, Volume 49, March 2012, Pages 310-323;
- [41] *N.H Wong, D.K.W Cheong, H Yan, J Soh, C.L Ong, A Sia*, The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore, *Energy and Buildings*, Volume 35, Issue 4, May 2003, Pages 353-364;
- [42] “*Assessment of green roof performance for sustainable buildings under winter weather Conditions*” - Mingjie Zhao, J. Srebric, Department of Architectural Engineering, The Pennsylvania State University, USA, (2012)
- [43] *Rabah Djedjig, Salah-Eddine Ouldboukhitine, Rafik Belarbi, Emmanuel Bozonnet*, Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 39, Issue 6, July 2012, Pages 752-761;
- [44] *Efficient Prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of layer of vegetation*, J. W. Deardorff, *Journal of geophysical research* (1978);
- [45] *Inclusion of a simple vegetation layer in terrain temperature model for thermal infrared signature prediction*, L.K. Balik, R.K. Link, *Transactions on geosciences and remote sensing* GE 19 ( 1981);
- [46] *A statistical Dynamical parameterization of interception and land surface atmosphere interaction*, A. Ramirez, S. Seranath, *Journal of climate* 13 ( 2000);

- [47] *A new formula for latent heat of vaporization of water as a function of temperature*, B. Henderson-Sellers, Quarterly Journal of Royal metallic Society 110 (1984);
- [48] *Smart Weapons Operability Enhancement (SWOE) Joint Test and Evaluation (JT and E) program: Final report*, G. G. Koenig, SWOE Report 10 (1994);
- [49] “*Design Builder 2.1 User’s Manual*” – Design Builder Software (2009)
- [50] “*Modeling Evapotranspiration for Three-Dimensional Global Climate Models*” - Dickinson, Climate Processes and Climate Sensitivity, Amer. Geophys. Union, Geophys. Monogr. 29, (1984)
- [51] “*A new formula for latent heat of vaporization of water as a function of temperature*” – B. Henderson-Sellers, Quarterly Journal of Royal metallic Society 110 (1984);
- [52] *Università degli Studi della Calabria, Appalto Concorso per la concessione della realizzazione della nuova sede della Università degli Studi della Calabria, Relazione strutture Cubo 3d* – Bonifati Spa Costruzioni generali;
- [53] *Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo*, UNI EN ISO 6946 2007, UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia;
- [54] “*DesignBuilder EnergyPlus Simulation Documentation for DesignBuilder v2.3*”;
- [55] *Impianti aerulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d offerta, l offerta, l ordine e la fornitura*, UNI 10339, 2012, UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia;
- [56] *Prestazioni energetiche degli edifici*, UNI TS 11300, 2009, UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia;
- [57] *TRNSYS 17, TRaNsient SYstem Simulation program*” - Volume 4, Mathematical Reference;
- [58] <http://www.cosenzameteo.it/bulbo-umido-e-neve/>;
- [59] [www.arpacal.it](http://www.arpacal.it);
- [60] <http://www.cosenzameteo.it/bulbo-umido-e-neve/>;
- [61] [www.arpacal.it](http://www.arpacal.it);

- [62] *Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi*, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Issue 2, February 2009, Pages 318-345;
- [63] *Ahmet Sari*, *Thermal reliability test of some fatty acids as PCMs used for solar thermal latent heat storage applications*, *Energy Conversion and Management*, Volume 44, Issue 14, August 2003, Pages 2277-2287;
- [64] *G.J. Suppes, M.J. Goff, Shailesh Lopes*, Latent heat characteristics of fatty acid derivatives pursuant phase change material applications, *Chemical Engineering Science*, Volume 58, Issue 9, May 2003, Pages 1751-1763;
- [65] *L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández*, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 3, April 2011, Pages 1675-1695;
- [66] *Feldman, D., Shapiro, M., Banu, D. and Fuks, C. J.*, Fatty acids and their mixtures as phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials* 1989;18: 201-216;
- [67] *Ana M. Borreguero, M. Luz Sánchez, José Luis Valverde, Manuel Carmona, Juan F. Rodríguez*. Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content. *Applied Energy* 2011; 88: 930–937;
- [68] *C.K. Halford, R.F. Boehm*. Modeling of phase change material peak load shifting. *Energy and Buildings* 200; 39 : 298–305;
- [69] *N. A. Yahaya, H. Ahmad*. Numerical investigation of indoor air temperature with the application of PCM gypsum board as ceiling panels in buildings. *Procedia Engineering* 2011;20: 238 – 248;
- [70] *M.A. Izquierdo-Barrientos, J.F. Belmonte, D. Rodríguez-Sánchez, A.E. Molina, J.A. Almendros-Ibáñez*. A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM). *Applied Thermal Engineering* 2012; 47:73-85;
- [71] *Luisa F. Cabeza, Cecilia Castello'n, Miquel Nogue's, Marc Medrano, Ron Leppers, Oihana Zubillaga*. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings* 2007: 39: 113–119;
- [72] *Kuznik F, Virgone J., Johannes K*. In situ of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard. *Renewable Energy* 2011; 36: 1458-1462;

[73] S. Scalat, D. Banu, D. Hawes, J. Parish, F. Haghghata, D. Feldman, Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 44, Issue 1, 30 October 1996, Pages 49-61;

[74] *Ly Shilei, Zhu Neng, Feng Guohui*, Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter, *Energy and Buildings*, Volume 38, Issue 1, January 2006, Pages 18-24;

[75] *Frédéric Kuznik, Joseph Virgone, Jean-Jacques Roux*, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation, *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 2, 2008, Pages 148-156;

[76] Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison, TRNSYS, Version 17;

[77] TESS – Thermal Energy System Specialists, LLC, TessLibs 3 – Mathematical Reference, 2012;

[78] *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*, 2007 (2008), UNI 15251, UNI — Ente Nazionale di Unificazione, Milano;

[79] *Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*, 2006 , UNI 7730, UNI — Ente Nazionale di Unificazione, Milano;

[80] *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici.*, 2012 , UNI 10349, UNI — Ente Nazionale di Unificazione, Milano;

[81] Solar Photovoltaic. Competing in energy sector. EPIA European Photovoltaic Industry Association Belgium September 2011;

[82] Global Market Outlook 2013-2017. EPIA European Photovoltaic Industry Association Belgium;

[83] RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES. IRENA, International Renewable Energy Agency United Arab Emirates June 2012;

[84] *Ingegneria solare*, Mario A. Cucumo, Valerio Marinelli, Giuseppe Oliveti, Pitagora Editrice Bologna 1994;

[85] Krauter S., Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2004; 82; pp. 131–7;

[86] Amery M., Abdolizadeh M., Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells. *Renewable Energy* 2009; 34; pp. 91–6;

[87] B.J. Brinkworth, Optimum depth for PV cooling ducts, *Solar Energy*, Volume 80, Issue 9, September 2006, Pages 1131-1134;

[88] Probes Air speed Manual, SI® Company, 2005;

### **RINGRAZIAMENTI:**

*La presente tesi è cofinanziata con il sostegno della Commissione Europea, Fondo Sociale Europeo e della Regione Calabria. L'autore è il solo responsabile di questa tesi e la Commissione Europea e la Regione Calabria declinano ogni responsabilità sull'uso che potrà essere fatto delle informazioni in essa contenute.*