

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

STUDIO DI UN IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE CON INTEGRAZIONE DI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE PER SERRE ADIBITE ALLA PRODUZIONE DI MICROALGHE



Relatore
Prof. Marco Masoero

Candidato
Alberto Bosia

Anno Accademico 2018/2019

INDICE

| | | |
|---------|---|----|
| 1. | INTRODUZIONE | 2 |
| 2. | I PCM | 6 |
| 2.1 | ACCUMULO | 7 |
| 2.1.1 | Sensibile | 8 |
| 2.1.2 | Latente | 10 |
| 2.2 | CARATTERISTICHE GENERALI..... | 14 |
| 2.2.1 | Proprietà termo-fisiche | 14 |
| 2.2.2 | Proprietà cinetiche | 15 |
| 2.2.3 | Proprietà chimiche..... | 15 |
| 2.3 | CLASSIFICAZIONE PCM..... | 16 |
| 2.3.1 | Organici | 17 |
| 2.3.2 | Inorganici..... | 19 |
| 2.3.3 | Eutettici..... | 21 |
| 2.4 | CONFRONTO TRA I DIVERSI TIPI DI PCM..... | 22 |
| 2.5 | TIPO DI CONFINAMENTO DEI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE .. | 24 |
| 2.5.1 | Microincapsulamento | 24 |
| 2.5.2 | Macroincapsulamento..... | 25 |
| 2.6 | MIGLIORAMENTO PROPRIETÀ TERMICHE PCM | 26 |
| 2.7 | UTILIZZO DEI PCM NEGLI EDIFICI..... | 27 |
| 2.7.1 | <i>Free cooling</i> | 27 |
| 2.7.2 | <i>Peak load shifting</i> | 28 |
| 2.7.3 | Sistemi di accumulo attivi | 29 |
| 2.7.3.1 | Integrazione nel sistema di ventilazione ed unità trattamento aria..... | 30 |
| 2.7.3.2 | Sistemi di raffrescamento ad assorbimento | 31 |
| 2.7.4 | Sistemi di accumulo passivo | 32 |
| 3. | CASO STUDIO: SERRA..... | 35 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.1 | PREMESSE | 35 |
| 3.2 | CARATTERISTICHE GENERALI..... | 36 |
| 3.3 | CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E STRUTTURALI | 37 |
| 3.4 | PROCESSO CHIMICO E COMPONENTI..... | 40 |
| 3.5 | PARAMETRI CLIMATICI | 44 |
| 3.6 | CONDIZIONI DI COMFORT RICHIESTE..... | 45 |
| 4. | SCELTE PROGETTUALI..... | 46 |
| 4.1 | RAFFREDDAMENTO EVAPORATIVO..... | 46 |
| 4.1.1 | Principio Di Funzionamento..... | 46 |
| 4.1.2 | Efficienza del sistema..... | 48 |
| 4.2 | INTRCOOLL | 50 |
| 4.2.1 | Componenti Chiave | 51 |
| 4.2.2 | Schema Funzionale..... | 52 |
| 4.2.2.1 | Diretto | 52 |
| 4.2.2.2 | Indiretto | 53 |
| 4.2.3 | Specifiche elettriche | 56 |
| 4.2.4 | Dimensioni unità | 58 |
| 5. | DIMENSIONAMENTO IMPIANTO | 59 |
| 5.1 | CASO ESTIVO | 59 |
| 5.1.1 | Ventilatore | 68 |
| 5.2 | CASO INVERNALE..... | 70 |
| 5.3 | PRIMAVERA/AUTUNNO..... | 74 |
| 6. | APPLICAZIONE AL CASO STUDIO..... | 75 |
| 6.1 | MATERIALE UTILIZZATO | 75 |
| 6.1.1 | Caratteristiche termiche..... | 75 |
| 6.2 | REQUISITI PCM NELL'EDILIZIA..... | 78 |
| 6.3 | SERRA: SCELTA DEL PCM ADOTATTO | 81 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.4 | SCENARIO 1- PCM INTEGRATO NELLA STRATIGRAFIA | 81 |
| 6.4.1 | Funzionamento PCM..... | 82 |
| 6.5 | SCENARIO 2- PCM INSERITO IN APPOSITI PANNELLI..... | 83 |
| 6.5.1 | Funzionamento PCM..... | 85 |
| 7. | ANALISI SPERIMENTALE | 87 |
| 7.1 | SCENARIO 1 | 88 |
| 7.1.1 | PCM 22..... | 89 |
| 7.1.2 | PCM 21..... | 92 |
| 7.1.3 | PCM 25..... | 95 |
| 7.1.4 | PCM 27..... | 98 |
| 7.1.5 | SCELTA PCM..... | 101 |
| 7.2 | SCENARIO 2 | 106 |
| 7.2.1 | SCELTA PCM..... | 106 |
| 7.3 | CONSIDERAZIONI FINALI | 110 |
| 8. | CONCLUSIONI..... | 112 |
| | BIBLIOGRAFIA | 116 |
| | SITOGRAFIA | 118 |
| | INDICE DELLE FIGURE..... | 119 |
| | INDICE DELLE TABELLE | 123 |
| | RINGRAZIAMENTI | 124 |

1. INTRODUZIONE

Nell'ultimo decennio l'uomo ha finalmente compreso in maniera chiara e inequivocabile il problema della tutela ambientale e del risparmio energetico.

In passato troppo spesso la ricerca verso l'innovazione tecnologica ha messo completamente da parte la sostenibilità ambientale portando severe conseguenze all'ecosistema.

Le eccessive emissioni di CO₂ hanno comportato l'aumento dell'effetto serra con conseguente variazione del normale equilibrio termico del pianeta, da cui ne è derivato un aumento della temperatura media terrestre con gravissimi danni per l'ambiente, come lo scioglimento dei ghiacciai e il conseguente aumento del livello del mare, ma anche modifiche irreversibili all'intero ecosistema mondiale.

Un aumento ulteriore della temperatura media globale porterebbe aree situate alle medie latitudini al fenomeno della desertificazione in virtù delle epocali variazioni climatiche: ondate di caldo e lunghi periodi caratterizzati da assenza di precipitazioni atmosferiche.

Nell'ultimo decennio la comunità mondiale ha compreso appieno i rischi che si corrono e ha cominciato ad attuare contromisure che mirano a rallentare questi tragici cambiamenti climatici. La sostenibilità ambientale è diventata vincolo imprescindibile per ogni nuova innovazione tecnologica; l'obiettivo è quello di arrivare il prima possibile ad uno sviluppo completamente sostenibile.

Uno dei contributi più significativi all'inquinamento ambientale è rappresentato dall'emissioni legate agli impianti di climatizzazione presenti nei complessi edilizi e nei capannoni industriali; pertanto la progettazione e la gestione degli impianti deve sempre più tenere in considerazione le stringenti direttive sulle emissioni.

Negli ultimi anni la ricerca di innovazioni tecnologiche per contenere i consumi e l'inquinamento ambientale in questo ambito hanno spinto gli specialisti del settore a ricercare nuove soluzioni applicative. La scoperta innovativa più premettente è rappresentata dai materiali a cambiamento di fase (PCM). Questi materiali rappresentano una nuova soluzione tecnologica nella progettazione di impianti di condizionamento e mirano a contenere i consumi energetici e ridurre la potenza termica richiesta dall'involucro edilizio.

In passato l'ambito in cui i materiali a cambiamento di fase hanno trovato maggiori applicazioni è principalmente in accumuli di energia termica; grazie alla loro attitudine di stoccare quantità di energia significative; durante il loro passaggio di fase possiedono un'elevata densità di accumulo di energia.

Inoltre, la loro ridotta variazione di temperatura rende questa tipologia di accumulo molto promettente: infatti è quella che attualmente catalizza la maggior parte degli interessi e degli sforzi della ricerca sul TES (*Thermal Energy Storage*).

Negli ultimi anni l'applicazione dei materiali a cambiamento di fase non si limita solo più agli accumuli termici ma sta trovando nuovi settori di impiego.

Come detto precedenza il più promettente è sicuramente quello dell'edilizia poiché la capacità dei PCM di accumulare calore per poi cederlo in una fase successiva può trovare un'utile applicazione in questo ambito.

L'utilizzo di questi materiali in ambito edilizio consente di ridurre il fabbisogno energetico, riducendo il fabbisogno di caldo in inverno e di freddo in estate, e inoltre permette di smorzare le fluttuazioni giornaliere della temperatura ambiente, riducendo i picchi di temperatura interna.

In questo tipo di applicazione è fondamentale utilizzare PCM non infiammabili o tossici, pertanto i composti più adottati sono quelli organici paraffinici e quelli inorganici.

L'obiettivo della tesi è proprio quello di valutare l'applicazione dei materiali a cambiamento di fase in ambito edilizio e verificare se avviene uno smorzamento delle fluttuazioni di temperatura all'interno dell'edificio analizzato e una riduzione e sfasamento temporale dei picchi di temperatura interna e di potenza termica richiesta.

La tesi è suddivisa in otto capitoli.

Nel secondo capitolo viene introdotto il funzionamento dei PCM e vengono presentati le varie tipologie di materiali a cambiamento di fase presenti sul mercato, soffermandosi sulle principali caratteristiche termiche di ognuno. Nella parte conclusiva del capitolo vengono descritti i possibili utilizzi di questa nuova innovativa tecnologia, analizzandone pregi e difetti.

Nel terzo capitolo si presenta il caso studio in esame riguardante la progettazione dell'impianto di condizionamento di una serra situata a Nimes, nel sud della Francia.

Il problema del cambiamento climatico è ormai una seria realtà da dover affrontare, la riduzione delle emissioni in ambiente è un obiettivo che ormai tutti gli Stati Nazionali devono perseguire in conformità al protocollo di Kyoto e alle direttive Europee, sempre più stringenti in ambito ambientale.

Nella serra vengono coltivate microalghe all'interno di appositi fotobioreattori.

Le microalghe sono organismi fotosintetici, che utilizzano l'anidride carbonica per produrre una vasta gamma di molecole, come i trigliceridi, i carboidrati e le proteine convertibili in carburanti per autotrazione.

I biocarburanti prodotti portano ad una significativa riduzione delle emissioni di CO₂ e monossido di carbonio rispetto ai carburanti di origine fossile. Inoltre, attraverso l'essiccazione delle alghe vengono prodotti mangimi per animali e fertilizzanti.

Nel quarto capitolo vengono presentate le scelte progettuali fatte per la progettazione dell'impianto di climatizzazione. Nell'area geografica dove si trova la serra è presente un clima mite e secco, pertanto la scelta progettuale è ricaduta su terminali che sfruttano il raffreddamento evaporativo per raffrescare l'ambiente nel periodo estivo. Il processo di raffrescamento presenta, oltre al classico raffreddamento evaporativo diretto, anche una fase indiretta che permette di raggiungere temperature di immissione dell'aria più basse.

Nel quinto capitolo viene affrontato il dimensionamento dell'impianto nel caso estivo, dove si verificano i carichi termici più gravosi, e nel caso invernale e viene illustrata la tipologia di impianto adottato. La progettazione viene eseguita senza l'integrazione del PCM nel sistema.

Nel capitolo numero sei viene presentata la tipologia del materiale a cambiamento di fase che viene adottato in questa applicazione soffermandosi sulle caratteristiche termiche del PCM.

In seguito, viene fatta una panoramica sulle possibili applicazioni in ambito edilizio, soffermandosi sui requisiti che i PCM devono avere per essere impiegati in questo ambito. Successivamente sono elencati i vantaggi e gli svantaggi che conseguono dalla loro applicazione.

Nella parte conclusiva del capitolo vengono illustrate le due applicazioni adottate nel caso in esame.

Nel primo scenario il PCM viene inserito all'interno della stratigrafia della serra, mentre nel secondo il PCM è integrato in appositi pannelli che vengono sospesi all'interno della serra.

Nel settimo capitolo vengono presentati e analizzati i valori ottenuti, focalizzando l'analisi sulla temperatura interna della serra e sulla potenza termica di raffrescamento che deve

essere fornita nel periodo estivo per garantire le richieste termo-igrometriche. Lo studio confronta gli andamenti della temperatura interna e della potenza di raffrescamento nel caso in cui il PCM venga integrato nel sistema e nel caso in cui ciò non avvenga. L'Analisi sperimentale è stata condotta tramite l'utilizzo di IDA *Indoor Climate and Energy* (IDA ICE), un software di simulazione dinamica degli edifici.

2. I PCM

Le richieste energetiche e la disponibilità di alcune fonti di produzione dell'energia sono caratterizzate da una forte variabilità su base giornaliera, settimanale, mensile e stagionale, risultando non sincrone tra loro. La necessità di coprire domande molto variabili porta all'utilizzo di sistemi di conversione abbastanza grandi al fine di poter sopperire anche alle richieste di picco molto elevate rispetto ai carichi di progetto, ciò comporta costi di investimento elevati e sistemi costretti a lavorare per la maggior parte del tempo con carichi inferiori rispetto a quelli nominali con conseguente minor efficienza del sistema.

L'integrazione di sistemi di accumuli dell'energia (ES) consentono l'utilizzo di sistemi di generazioni più piccoli e di operare a capacità prossime a quelle nominali per la maggior parte del tempo indipendentemente dalla richiesta energetica istantanea dell'utente; l'energia convertita in eccesso durante le ore di minor richiesta viene accumulata ed utilizzata successivamente nelle ore di picco.

L'utilizzo degli ES offre numerosi vantaggi:

- Riduzione dei costi energetici;
- riduzione dei consumi;
- aumento delle condizioni di comfort degli ambienti interni;
- aumento della flessibilità operativa;
- riduzione dei costi di investimento e di manutenzione;
- riduzione della taglia degli impianti;
- utilizzo più efficiente ed efficace degli impianti;
- conservazione delle fonti fossili, grazie ad un utilizzo finale dell'energia più efficiente;
- riduzione delle emissioni inquinanti.

Tuttavia, per massimizzare i benefici, è fondamentale una profonda conoscenza dei singoli sistemi di accumulo disponibili, delle loro caratteristiche tecniche e soprattutto del caso in esame.

I materiali a cambiamento di fase (*Phase Change Materials*, PCM) sono da qualche anno oggetto di particolare attenzione nell'ambito dei sistemi per l'accumulo di energia termica sia sensibile sia latente. Essi possono fornire un importante contributo all'uso efficiente ed alla conservazione di alcuni flussi energetici, come il calore di scarto negli impianti di

climatizzazione, i guadagni interni degli edifici o l'energia solare, mediante l'immagazzinamento di tale energia termica come calore latente utilizzabile in un ristretto intervallo di temperatura. Un minor differenziale di temperatura tra calore immagazzinato e rilasciato è un ulteriore vantaggio rispetto ai tradizionali sistemi di accumulo di tipo sensibile. Inoltre, l'utilizzo dei PCM può contribuire ad aumentare il comfort termico all'interno degli ambienti confinanti riducendo l'ampiezza delle oscillazioni di temperatura durante la giornata e riducendo e/o spostando i carichi di picco. [2, Bibliografia]

2.1 ACCUMULO

Qualsiasi sistema energetico è costituito da almeno due tipologie di sottoinsiemi: i "produttori" e i "consumatori" di energia.

Nelle applicazioni pratiche sono sempre interconnessi attraverso altri due sottosistemi: le reti di trasporto/distribuzione e gli accumuli di energia.

Le prime fanno fronte alla distanza fisica, i secondi al gap temporale tra produttori e consumatori. Gli impianti di produzione non generano energia in maniera costante nel tempo, come pure gli utilizzatori non richiedono energia in modo uniforme nel tempo. Il classico esempio è l'impianto fotovoltaico residenziale che produce energia in base alle condizioni climatiche e vede un consumo legato alle necessità dell'utenza.

Le reti di distribuzione, tradizionalmente, dovevano gestire solo un flusso unidirezionale di potenza proveniente dalla rete di trasmissione; la situazione attuale invece prevede che l'eventuale eccesso rispetto alla domanda debba essere contro-indirizzato verso la rete di trasmissione.

L'accumulo è una componente dell'impianto o un elemento del sistema che permette di far fronte, con potenze installate più ridotte, a carichi termici elevati e quindi di utilizzare in un altro momento un potenziale ingresso energetico sovrabbondante. Il termine accumulo di energia riguarda una grande molteplicità di tecnologie e di applicazioni anzitutto relativamente alla forma energetica interessata. Infatti, si possono avere accumuli di energia meccanica, caso più comune un volano, di energia elettrica, una batteria di un automobile, chimica, caso più comune un normale combustibile, e termica. L'accumulo di energia termica ricopre un ruolo di grande importanza in tutte le tecniche di climatizzazione, lo sviluppo degli accumulatori di energia ha avuto un ulteriore crescita con l'espansione del campo delle fonti rinnovabili di energia, caratteristicamente intermittenti.

Una prima distinzione fra gli accumuli è fra quelli passivi, come una parete ad alta capacità termica di un edificio, e quelli attivi, un accumulo per l'acqua sanitaria.

Un'altra distinzione importante è tra accumuli di tipo sensibile e accumuli di tipo latente. Nei primi viene fatta variare la temperatura di una massa liquida, di solito acqua, o solida, pietra, la cui capacità termica consente di accumulare energia con un aumento di temperatura in fase di carica e una diminuzione in fase di scarica. Negli accumuli di tipo latente la capacità di accumulo è prevalentemente dovuta al cambiamento di fase, normalmente da fase liquida a fase solida e viceversa. Il cambiamento di fase si manifesta per una determinata pressione ad un valore ben definito di temperatura che resta costante per tutto il tempo necessario a completare il cambiamento.

Gli accumuli sensibili possono essere costituiti da liquidi o da solidi, mentre gli accumuli latenti sono realizzati con un cambiamento di fase da solido a liquido o da liquido a vapore e viceversa. Il cambiamento di fase solido-liquido è certamente quello più diffuso.

2.1.1 Sensibile

Un accumulo sensibile (SHTES, *sensibile heat thermal energy storage*) è costituito da un materiale che nei processi di carica e scarica dell'accumulo stesso non cambia di fase. L'energia coinvolta in una variazione di temperatura da un valore iniziale T_i ad un valore finale T_f , validi per l'intero accumulo, si calcola sulla base della massa del materiale m e del suo calore specifico a pressione costante c_p :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m * c_p(T) * dT \quad [\text{J}]$$

Un materiale adatto per accumulare energia termica deve avere un elevato calore specifico, una buona conducibilità termica oltre alle consuete desiderate caratteristiche di bassa o nessuna tossicità e infiammabilità.

L'accumulo sensibile si può realizzare con materiali in fase liquida o solida. Nel campo della climatizzazione ambientale la sostanza più utilizzata è certamente l'acqua, eventualmente in miscela con glicole antigelo, in virtù della sua grande disponibilità, non tossicità, basso costo e relativamente alto calore specifico c_p . Nel campo delle temperature più elevate si utilizzano oli sintetici, sali fusi e metalli liquidi.

È consigliabile prevedere un adeguato isolamento termico per limitare le dispersioni termiche che risultano essere di particolare rilievo quanto più piccolo è il volume dell'accumulo.

L'acqua tende naturalmente, se non altrimenti disturbata, a disporsi in un serbatoio secondo strati orizzontali di densità decrescente e temperatura crescente con la quota nel serbatoio. È essenziale che questa naturale stratificazione non venga disturbata da turbolenze nel serbatoio, indotte dai sistemi di prelievo e di immissione. Ciò può avvenire con un'accurata realizzazione dei diffusori che nella parte superiore del serbatoio provvedono ad immettere l'acqua di ritorno dall'impianto o a prelevare l'acqua da raffreddare nel *chiller* e nella parte inferiore immettono l'acqua fredda o la prelevano per inviarla all'utenza. Nella Figura 2.1 viene rappresentato un serbatoio per un impianto solare per acqua sanitaria: si può notare la stratificazione termica con l'ingresso solare nella parte inferiore del serbatoio, la fornitura di energia ausiliaria nella parte superiore e una piastra anti-miscelazione sull'ingresso dell'acqua fredda.

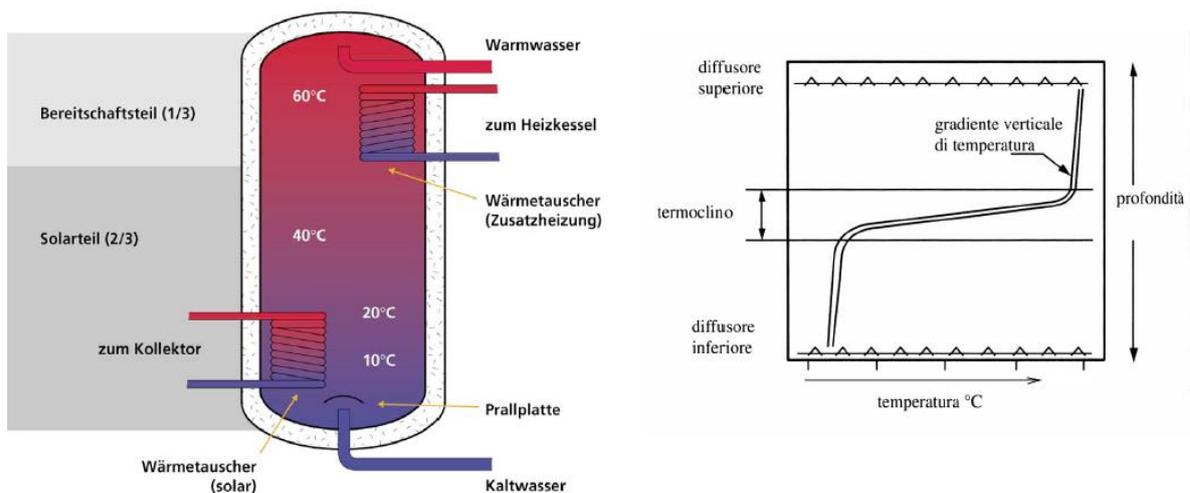


Figura 2.1-Gradiente di temperatura in un serbatoio d'acqua in funzione dell'altezza dal fondo con evidenziato il termoclino [9, Bibliografia]

In questo modo si può contare su una buona stratificazione all'interno dell'accumulo, nella quale il passaggio fra zona fredda e zona calda avviene in uno spessore il più possibile ridotto del serbatoio, indicato come *termoclino*. In una buona progettazione questo spessore può oscillare attorno a 30-100 cm.

Nel caso di materiali solidi si utilizzano ciottoli, mattoni, cemento, materiali refrattario.

Le problematiche dell'accumulo sensibile sono sostanzialmente legate alla relativamente bassa densità energetica e alla temperatura variabile del fluido nel corso della carica e della scarica dell'accumulo; inoltre vi è l'esigenza, non semplice da soddisfare, di conservare un adatto gradiente di temperatura all'interno dell'accumulo.

2.1.2 Latente

Un accumulo termico latente (LHTES, *latent heat thermal energy storage*) sfrutta prevalentemente il calore assorbito o rilasciato da un materiale durante il cambiamento di fase. I cambiamenti di fase possono riguardare il passaggio da una fase solida cristallina ad un'altra, ma più comunemente i passaggi solido-liquido o liquido-vapore e viceversa.

Il cambiamento di fase liquido-vapore presenta i più elevati valori di calore latente ma anche una grandissima variazione di volume fra le due fasi, mentre i sistemi solido-solido presentano un calore di transizione di fase minore e non sono facilmente integrabili nei materiali e nelle strutture da costruzione come cemento e cartongesso.

Per questo motivo il passaggio di fase prevalentemente utilizzato è quello fra solido e liquido e viceversa, dove, oltre ad avere un elevato calore latente, non subiscono significativi variazioni di volume durante il passaggio di fase.

I materiali impiegati vanno sotto il nome di *Phase Change Materials* ed indicati comunemente con l'acronimo PCM. I PCM possono immagazzinare o rilasciare significative quantità di energia entro volumi ridotti con ridottissime variazioni di temperatura e con modeste variazioni di volume.

Il confronto riportato in Figura 2.2 illustra il diverso comportamento di un accumulo sensibile liquido o solido con quello di un accumulo latente. Il materiale scelto cambia di fase alla temperatura di circa 27°C.

Partendo dalla temperatura di 20°C la capacità di accumulo sensibile cresce con una pendenza legata al calore specifico del materiale e risulta massima per l'acqua. Alla temperatura di cambiamento di fase si assiste ad un brusco incremento nella capacità di accumulo del PCM. Una volta che la sostanza è passata in fase liquida si ha ancora un incremento nella capacità di accumulo sensibile con una pendenza sempre inferiore a quella dell'acqua.

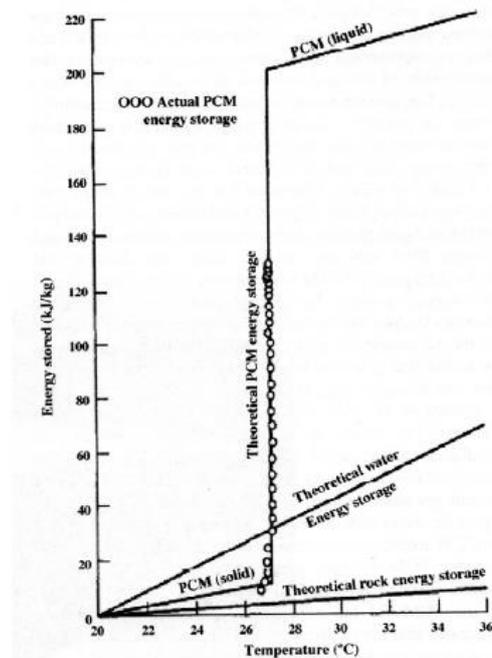


Figura 2.2-Confronto capacità accumulo [9, Bibliografia]

Il calore accumulato dal materiale a cambiamento di fase è prevalentemente dovuto alla variazione di entalpia, ΔH_m , che la massa m della sostanza presenta quando scambia calore durante il processo di cambiamento di fase. Il calore accumulato globalmente deve tener conto anche degli scambi di tipo sensibile che avvengono quando il materiale si trova in fase solida (da T_L a T_m con calore specifico c_{ps}) e liquida (da T_m a T_H con calore specifico c_{pl}):

$$Q = m \int_{T_L}^{T_m} c_{ps}(T) * dT + m * \Delta H_m + m \int_{T_m}^{T_H} c_{pl} * dT \quad [J]$$

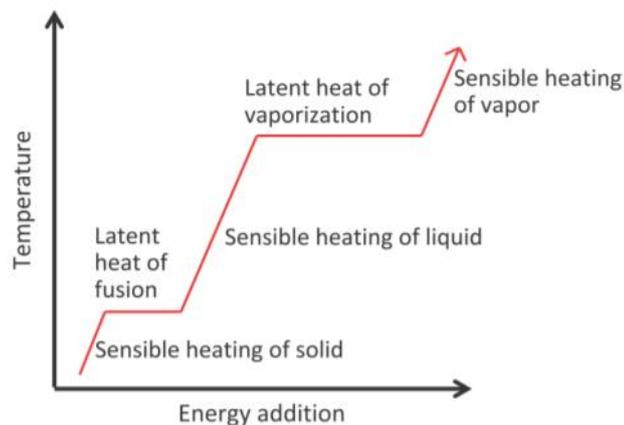


Figura 2.3- Curva riscaldamento di un materiale [5, Sitografia]

Una seconda modalità di classificazione riguarda la posizione della sostanza che accumula l'energia termica all'interno del sistema e la modalità con cui l'energia lo raggiunge. Si parla di sistemi di tipo attivo, passivo e ibridi. Nel primo caso il mezzo di accumulo termico circola attraverso uno scambiatore di calore e viene caricato/scaricato di energia mediante convezione forzata. In questa circostanza si possono distinguere sistemi attivi diretti che usano la sostanza come fluido di scambio termico e mezzo di accumulo, ad esempio l'accumulo integrato nei collettori solari a circolazione naturale, ed indiretti che invece utilizzano un mezzo di accumulo secondario, ad esempio un accumulo per l'acqua sanitaria. Nei sistemi passivi invece il mezzo di accumulo, tipicamente solido, rimane confinato nel sistema ricevendo (fase di carica) o cedendo (scarica) l'energia termica dal fluido di scambio termico. I sistemi ibridi combinano le due diverse modalità appena descritte con lo scopo di migliorare le caratteristiche dei sistemi di accumulo. Solamente gli accumuli di tipo sensibile e quelli a cambiamento di fase possono essere utilizzati come accumuli di tipo passivo negli edifici.

Infine, può risultare utile citare un'ulteriore modalità di classificazione che qualifica l'accumulo in funzione della sua capacità rapportata alla domanda o all'offerta di energia. Si parla di produzione istantanea di calore quando l'energia è immagazzinata solamente nel frangente temporale necessario a trasferirla dalla sorgente all'utilizzatore. L'accumulo può essere finalizzato a soddisfare una domanda che può andare da pochi minuti (il boiler per l'acqua calda sanitaria) o parecchie ore, fino anche a coprire intere giornate (accumuli integrati per impianti solari) o addirittura a soddisfare l'intera stagione (accumuli stagionali).

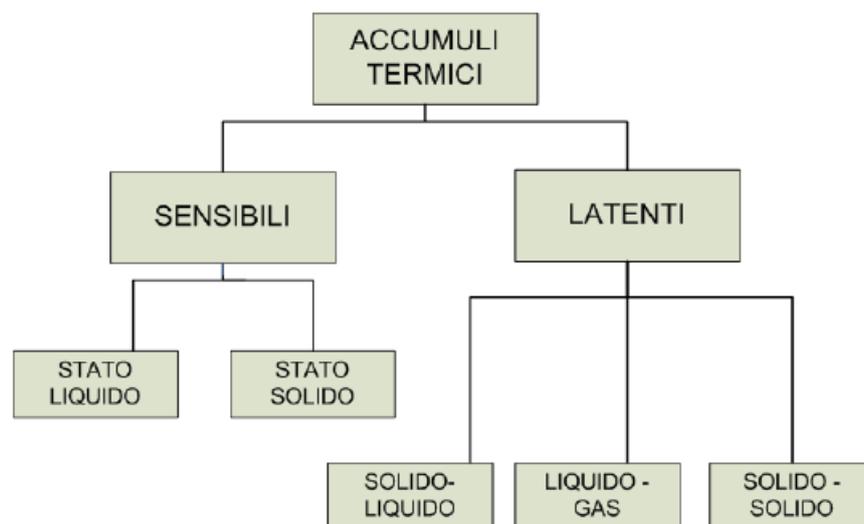


Figura 2.4-Classificazione accumuli termici

2.2 CAPACITA' DI ACCUMULO SERBATOIO DI TIPO SENSIBILE E LATENTE

Tradizionalmente i serbatoi di accumulo di energia termica di tipo sensibile sono progettati in modo tale da sfruttare la variazione di temperatura e la capacità termica totale del fluido in essi contenuti. Pertanto, l'energia accumulata sarà funzione non soltanto della variazione di temperatura ΔT ma anche del calore specifico c_p del fluido e della massa m . L'energia termica accumulata dal serbatoio è pari a:

$$E = \int_{T_i}^{T_f} m * c_p(T) * dT = m * c_p * (T_f - T_i) \quad [\text{J}]$$

Mentre gli accumuli di calore latente sono basati sull'assorbimento o il rilascio di calore nel momento in cui il mezzo di stoccaggio subisce un cambiamento di fase, senza significative variazioni della temperatura. L'energia accumulata durante il cambiamento di fase è pari a:

$$E = m * \lambda \quad [\text{J}]$$

Dove:

- λ : calore latente di fusione

Utilizzando un 1 kg di PCM inorganico con un calore di fusione pari a $200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, è possibile accumulare una quantità di energia pari a:

$$E = m * \lambda = 200 \text{ kJ}$$

Nel calcolo vengono trascurati i contributi sensibile della fase solida e liquida che comunque sono presenti e contribuiscono all'ulteriore accumulo di energia.

Mentre qualora si progettasse un accumulo termico sensibile (ad acqua) in grado di stoccare la medesima quantità di energia con un ΔT pari a 10°C sarebbe necessaria avere una massa pari a:

$$m = \frac{E}{c_p * \Delta T} = 4,8 \text{ kg}$$

Si nota come lo stoccaggio di calore latente abbia una densità di energia molto più elevata rispetto all'accumulo di tipo sensibile con una conseguente riduzione della massa di materiale richiesta e volumi di stoccaggio più piccoli a parità di energia accumulata.

L'elevata densità di accumulo dei PCM e la loro ridotta variazione di temperatura rendono questa tipologia di stoccaggio molto promettente: infatti è quella che attualmente catalizza la maggior parte degli interessi e degli sforzi della ricerca sul TES

2.2 CARATTERISTICHE GENERALI

I PCM sfruttano il cambiamento di fase di una sostanza per immagazzinare, quando disponibile in eccesso, grandi quantità di energia termica rispetto agli accumuli di tipo sensibile, per rilasciarla nei periodi in cui è richiesta. Ciò consente, quando utilizzati ad esempio all'interno dei materiali da costruzione (muri, isolanti), di contribuire a diminuire i picchi di carico termico sia di riscaldamento che di raffrescamento e quindi ridurre i fabbisogni ed aumentare il livello di comfort all'interno degli ambienti confinanti grazie ad una ridotta fluttuazione della temperatura dovuta all'aumento della capacità termica della struttura.

Il materiale a cambiamento di fase "ideale" dovrebbe idealmente soddisfare diversi criteri relativamente alle proprietà termo-fisiche, cinetiche e chimiche.

2.2.1 Proprietà termo-fisiche

- elevato calore latente di fusione per unità di volume e di massa e, possibilmente, elevato calore specifico, in modo da ridurre il volume e/o peso del sistema a parità di energia accumulata, ovvero incrementare la capacità di accumulo con i medesimi ingombri;
- temperatura di cambiamento di fase compatibile con il tipo di applicazione, considerando dove il PCM viene collocato nel sistema della struttura dell'edificio o dell'impianto, il clima esterno e le condizioni interne dell'ambiente;
- elevata conduttività e diffusività termica, al fine di massimizzare la velocità di trasmissione del calore attraverso il PCM stesso;
- bassa pressione di vapore alla temperatura di utilizzo in modo da minimizzare i rischi di rottura dei materiali di contenimento.

2.2.2 Proprietà cinetiche

- stabilità di cristallizzazione del materiale per un numero elevato di cicli di cambiamento di fase al fine di mantenere elevata nel tempo l'efficienza di accumulo;
- ridotto sottoraffreddamento ed elevato tasso di crescita dei cristalli solidi di materiale. Un elevato sottoraffreddamento modifica la temperatura di cambiamento di fase quando invece sarebbe gradito un valore unico e costante per questo parametro così da garantire la scelta ottimale del materiale in relazione all'applicazione.

2.2.3 Proprietà chimiche

- stabilità chimica e bassa corrosività al fine di massimizzare la durata del PCM e dei materiali con i quali può venire a contatto;
- non pericolosità o tossicità, al fine di minimizzare i rischi di emissione nocive in caso di rottura e conseguente fuoriuscita del PCM dal materiale di contenimento.

Il materiale ideale dovrebbe poi essere facilmente disponibile in grandi quantità ed a basso costo. È facile capire che nessuno dei materiali oggi disponibile soddisfa contemporaneamente tutti questi requisiti. Tuttavia, i più recenti sviluppi hanno aperto nuove possibilità di incremento delle prestazioni e della durata. [10, Bibliografia]

2.3 CLASSIFICAZIONE PCM

I PCM possono essere classificati in tre gruppi principali in funzione dell'intervallo di temperatura in cui avviene il cambiamento di fase. In tal senso, si parla di:

- PCM a bassa temperatura, in cui il cambiamento di fase avviene al di sotto dei 15°C. Applicazioni tipiche sono gli accumuli di freddo per il condizionamento dell'aria e per la refrigerazione;
- PCM a media temperatura (temperatura di cambiamento di fase compresa tra 15°C e 90°C). Sono i più diffusi perché sono utilizzati per l'accumulo di acqua calda negli impianti solari, come sistemi passivi negli edifici per il mantenimento del comfort e la climatizzazione ambientale e nel raffreddamento di elementi elettronici;
- PCM ad elevata temperatura (maggiore di 90°C) utilizzati in applicazione di tipo industriale, negli impianti solari di produzione di potenza, nelle applicazioni aerospaziali.

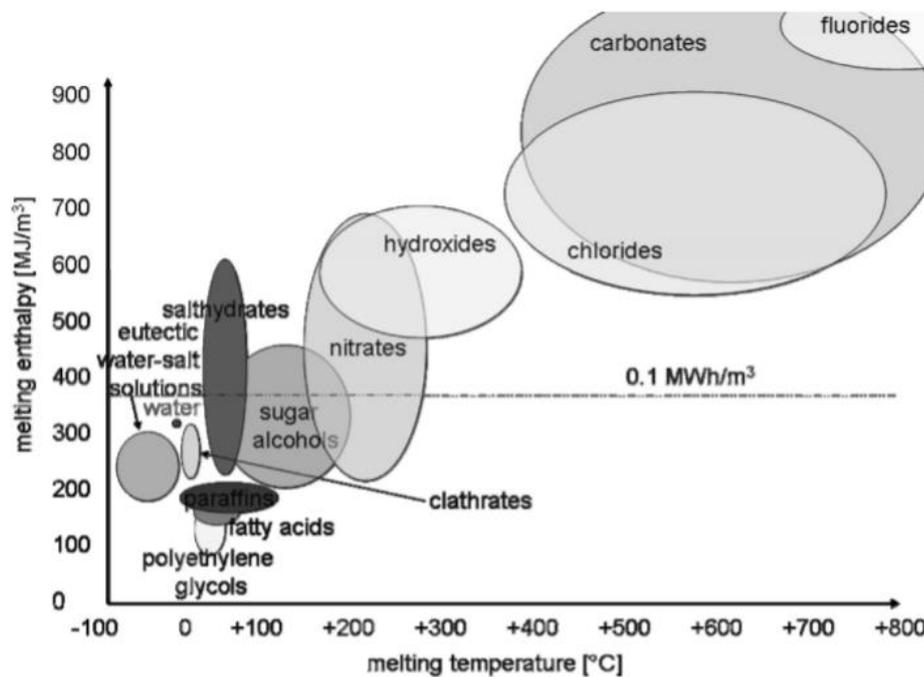


Figura 2.5-Classificazione materiali utilizzati come PCM [4, Bibliografia]

Come detto in precedenza i sistemi solido-liquido sono i più diffusi nelle applicazioni di accumulo termico in ambito edilizio in virtù del range di temperatura adeguato e della

relativa facilità di integrazione nei materiali da costruzione e nelle apparecchiature. In realtà presentano anche alcune criticità:

- I PCM organici possono fuoriuscire ed impregnare il materiale in cui sono immersi durante il cambiamento di fase;
- La maggior parte dei PCM presentano una bassa conduttività e diffusività termica
- Alcuni PCM risultano infiammabili e corrosivi.

Tale criticità possono tuttavia essere risolte attraverso l'incapsulamento del materiale, cioè il confinamento all'interno di uno specifico volume mediante opportuni materiali.

I PCM di tipo solido-liquido vengono suddivisi in organici, inorganici ed eutettici.

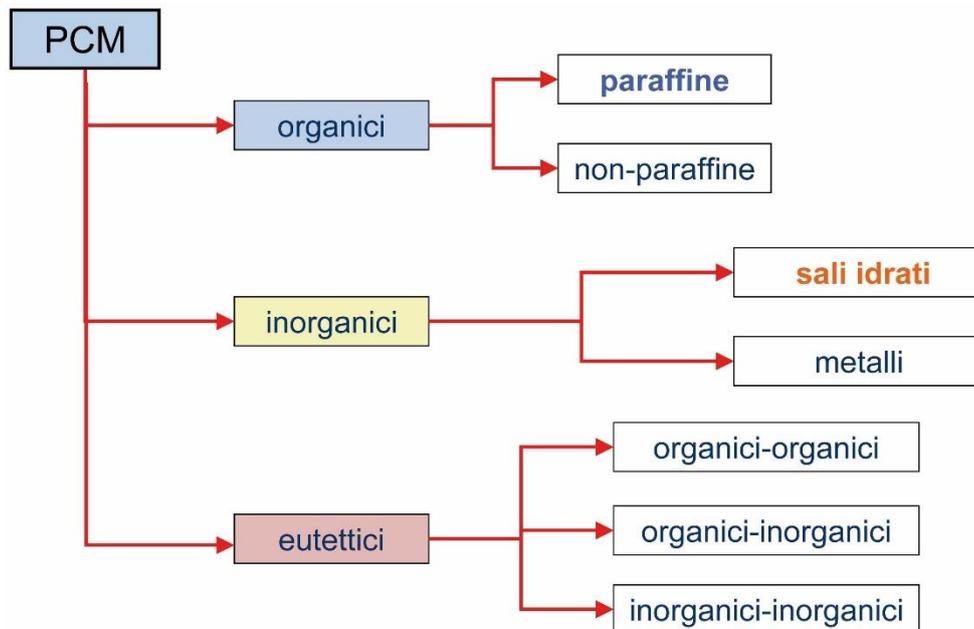


Figura 2.6-Classificazione PCM [7, Sitografia]

2.3.1 Organici

I PCM organici presentano un processo di fusione congruente con temperature pressoché costante (senza segregazione di fase) per un numero di cicli di fusione/solidificazione molto elevato; ciò garantisce che il calore latente di fusione si mantenga ai valori nominali per lungo tempo. Non presentano il problema del sottoraffreddamento, non sono corrosivi e sono commercialmente disponibili a costi ragionevoli.

I PCM organici si suddividono in cere paraffiniche e materiali non paraffinici (acidi grassi, alcoli e glicoli). Le paraffine sono degli idrocarburi saturi. La cristallizzazione della catena del CH₃ rilascia una grande quantità di calore latente e maggiore è la lunghezza della catena di idrocarburi (cioè maggiore il contenuto di atomi di carbonio), maggiore sarà la temperatura di cambiamento di fase ed il calore latente di fusione. Le paraffine hanno notevoli proprietà positive che fanno sì che siano tra i PCM attualmente più utilizzati: sono stabili, sicuri, relativamente economici, non corrosivi, con bassa tensione di vapore e disponibili in un ampio intervallo di temperatura. Possiedono tuttavia una bassa conduttività termica (circa $0,2 \frac{W}{mK}$), sono moderatamente infiammabili (indice compreso tra 15 e 50) e presentano un'elevata variazione di volume durante la liquefazione. La Tabella 1 riporta le proprietà salienti di alcune paraffine impiegabili per accumulare freddo o calore. Una soluzione per ovviare alla bassa conduttività termica è quella di impiegare strutture a matrice metallica: tubi alettati. La significativa variazione di volume nel cambiamento di fase richiede contenitori deformabili, di solito in plastica.

Il costo del materiale aumenta con il grado di purezza della paraffina. Le paraffine di grado tecnico sono miscele di molti idrocarburi e quindi il cambiamento di fase non avviene ad una ben precisa temperatura.

| Applicazione | Composto | temperatura di fusione (°C) | calore di fusione (kJ/kg) | c_p (kJ/(kgK)) - solido | λ (W/(mK)) | densità del liquido (kg/m ³) |
|----------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|--|
| raffreddamento | Paraffina C14 | 4,5 | 165 | - | - | - |
| | Paraffina C15-C16 | 8 | 153 | 2,2 | - | - |
| | Poliglicole E400 | 8 | 99,6 | - | 0,187 | 1125 |
| | DMS | 16,5 | 85,7 | - | - | 1009 |
| | Paraffina C17-C18 | 20-22 | 152 | 2,2 | - | - |
| | Poliglicole E600 | 22 | 127,2 | - | 0,189 | 1126 |
| | Paraffina C13-C24 | 22-24 | 189 | 2,1 | 0,21 | 760 |
| | 1-dodecanolo | 26 | 200 | - | - | - |
| riscaldamento | Paraffina C18 | 28 | 244 | 2,2 | 0,148 | 774 |
| | Paraffina C20-C33 | 48-50 | 189 | - | 0,21 | 769 |
| | Paraffina C22-C45 | 58-60 | 189 | 2,4 | 0,21 | 795 |
| | Cera Paraffinica | 64 | 173,6 | - | 0,167 | 790 |
| | Poliglicole E6000 | 66 | 190 | - | - | 1085 |
| | Paraffina C21-C50 | 66-68 | 189 | - | 0,21 | 830 |
| | 1-tetradecanolo | 38 | 205 | - | - | - |
| | Paraffina C16-C28 | 48-50 | 189 | - | 0,21 | 765 |
| | Bifenile | 71 | 119,2 | - | - | 991 |
| | Propionamide | 79 | 168,2 | - | - | - |
| Naftalene | 80 | 147,7 | 2,8 | 0,132 | 976 | |

Tabella 1- PCM organici [10, Bibliografia]

I materiali organici non paraffinici definiscono una categoria di PCM più ampia e per questo possiedono le proprietà più varie. Possono essere divisi in due sottogruppi: gli acidi grassi, composti del tipo $C_m H_n O_2$ dove m e n sono i numeri atomici, e gli altri PCM organici non paraffinici: esteri, alcoli e glicoli.



Figura 2.7-L'acido stearico fa parte degli acidi grassi [1, Sitografia]

A differenza delle paraffine, che godono di proprietà molto simili, ognuno di questi materiali presenta proprietà caratteristiche specifiche. In generale questa tipologia di PCM possiede:

- elevati calori latenti;
- bassa conduttività termica come le paraffine;
- basse temperature di infiammabilità
- vari livelli di tossicità;
- instabilità ad alte temperature;
- costo è superiore a quello delle paraffine.

2.3.2 Inorganici

I PMC inorganici comprendono i sali idrati, i composti inorganici e le leghe metalliche a base di bismuto, piombo, stagno o indio.

I sali idrati risultano essere la categoria più importante e più studiata. Si possono considerare delle leghe fra un sale inorganico ed acqua che realizzano un tipico solido cristallino (A) indicato da una formula generale $A \cdot nH_2O$. La liquefazione e la solidificazione del sale idrato sono in realtà una disidratazione e idratazione del sale. I cristalli idrati si scompongono in

sale anidro e acqua, o in uno meno idrato e acqua. Tra gli svantaggi derivanti dal loro utilizzo come accumuli a cambiamento di fase vi è la fusione incongruente e 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 maggiore densità i sali meno idrati vanno così a posizionarsi nella parte inferiore dell'accumulo rendendo nel tempo il cambiamento di fase sempre più irreversibile. Il sottoraffreddamento 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 a temperatura minore. Le 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, 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.

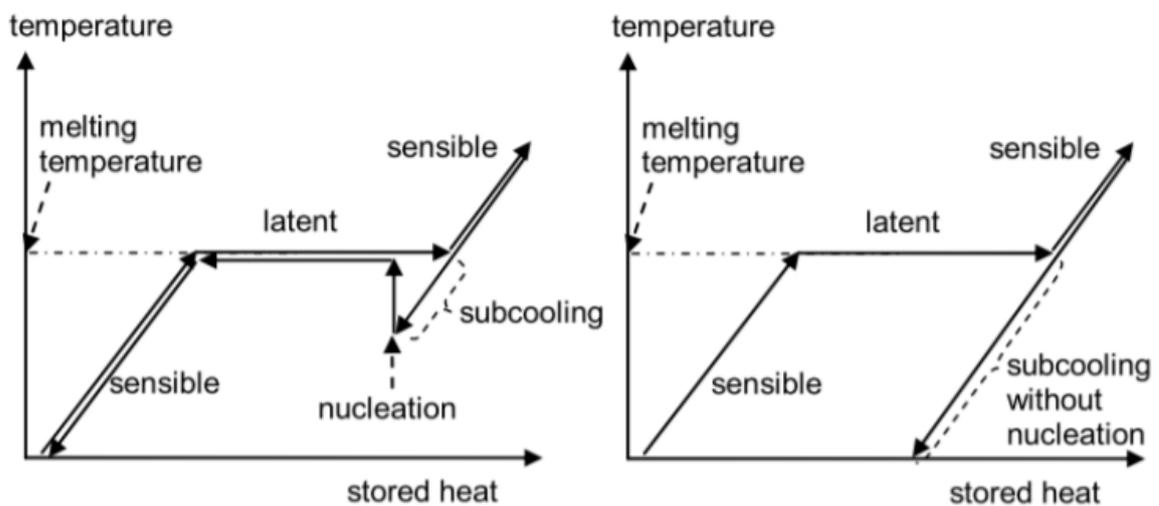


Figura 2.8-Effetto del sottoraffreddamento nel caso di accumuli termici latenti. A sinistra: piccolo subcooling con nucleazione. A destra: grande subcooling senza nucleazione [5, Sitografia]

La maggior parte dei sali idrati non sono adatti per applicazioni in ambito edilizio a causa del basso valore del calore latente, rispetto agli altri PCM, e della loro tossicità e pericolosità verso l'ambiente e la salute dell'uomo.

Alcuni metalli e leghe metalliche basso fondenti sono stati studiati per l'utilizzo come materiali di accumulo del calore poiché possiedono alcune caratteristiche favorevoli: elevata conduttività termica, bassa tensione di vapore, limitato coefficiente di variazione volumetrica durante il cambiamento di fase ed elevato calore latente per unità di volume (dovuto alle elevate densità) che ne hanno suscitato l'interesse per talune applicazioni: il raffreddamento di sistemi laser.

Tuttavia, l'elevato costo e un calore latente di fusione che tende a degradare nel tempo, ne limita attualmente la diffusione.

Nella Tabella 2 sono presentate le caratteristiche principali dei composti inorganici.

| Applicazione | Materiale | Composizione (%peso) | temperatura di fusione (°C) | calore di fusione (kJ/kg) |
|----------------|--|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| raffreddamento | $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 45+55 | 14,7 | 140 |
| | Trietiloetano+acqua+urea | 38,5+31,5+30 | 13,4 | 160 |
| riscaldamento | Trietiloetano+urea | 62,5+37,5 | 29,8 | 218 |
| | $\text{CH}_3\text{COONa} + 3\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_2\text{CONH}_2$ | 40+60 | 30 | 200,5 |
| | $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{NO}_3$ | 51,5+38,5 | 52 | 125,5 |
| | $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 58,7+41,3 | 59 | 132,2 |
| | $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{MgBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 59+41 | 66 | 168 |
| | $\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{NH}_4\text{Br}$ | 66,6+33,4 | 76 | 151 |

Tabella 2- PCM inorganici [9, Bibliografia]

2.3.3 Eutettici

Un eutettico è una miscela di sostanze basso-fondenti il cui punto di fusione è più basso di quello delle singole sostanze che lo compongono. In un materiale eutettico tutti i suoi elementi fondono e solidificano congruentemente e simultaneamente, senza segregazione. Questo genera il maggior vantaggio di queste sostanze rispetto agli altri tipi di PCM, e cioè la possibilità di “regolare” il punto di fusione agendo sulla ponderazione in massa dei componenti di fase, inoltre possiedono elevati valori di conduttività termica. Tuttavia, il calore latente di solidificazione ed il calore specifico hanno valori molto più limitati rispetto ai sali idrati ed alle paraffine. La Tabella 3 riporta una lista di alcuni eutettici sul mercato.

| Applicazione | Composto | temperatura di fusione (°C) | calore di fusione (kJ/kg) | cp (kJ/(kgK)) - solido | λ (W/(mK)) | densità (kg/m ³) |
|----------------|--|-----------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------|------------------------------|
| raffreddamento | LiClO ₃ ·3H ₂ O | 8,1 | 253 | 1,35 | - | 1720 |
| | KF·4H ₂ O | 18,5 | 231 | 1,84 | - | 1447 |
| | Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | 25,8 | 125,9 | - | 2,34 | 1800 |
| riscaldamento | CaCl ₂ ·6H ₂ O | 29 | 188 | 1,43 | 0,54 | 1562 |
| | LiNO ₃ ·3H ₂ O | 30 | 296 | - | 0,58 | 1780 |
| | Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O | 32-36 | 246,5 | 1,79 | - | 1442 |
| | Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O | 32,4 | 251 | 1,44 | 0,5-0,7 | 1420 |
| | Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | 36,4 | 147 | 1,34 | - | 2065 |
| | Na ₂ HPO ₄ ·7H ₂ O | 48 | 281 | 1,70 | 0,514 | 1520 |
| | Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O | 78 | 265,7 | - | 0,653 | 1937 |

Tabella 3- PCM eutettici [9, Bibliografia]

2.4 CONFRONTO TRA I DIVERSI TIPI DI PCM

Dal confronto tra le diverse tipologie di PCM solido-liquido emerge che:

- i materiali organici hanno il vantaggio di un minor sottoraffreddamento, la capacità di fondere in modo congruente, la capacità autonucleante, compatibilità con i più comuni materiali da costruzione, nessuna segregazione, stabilità chimica, elevato calore latente di fusione, sicurezza e non tossicità. Gli stessi organici presentano però anche degli svantaggi, come una bassa conduttività termica e densità, ed una non trascurabile infiammabilità;
- i vantaggi dei materiali inorganici comprendono: un'elevata densità di accumulo di energia, elevata conduttività termica, sono più economici, facilmente disponibili e non sono infiammabili. D'altro canto, presentano un non trascurabile sottoraffreddamento e segregazione di fase durante il cambiamento di stato.

La Tabella 4 riassume i principali vantaggi e svantaggi delle varie tipologie di PCM.

| Organici | | Inorganici | | Eutettici | |
|---|--|---|--|---|---|
| Vantaggi | Svantaggi | Vantaggi | Svantaggi | Vantaggi | Svantaggi |
| -No sottoraffreddamento -No segregazione di fase -Bassa pressione di vapore -Intervallo di temperatura ambiente -Compatibilità con i convenzionali materiali da costruzione -Stabilità chimica -Riciclabilità -Elevato calore latente di fusione | -Infiammabilità -Bassa conduttività -Bassa densità volumetrica di accumulo latente | -Elevata densità volumetrica di accumulo latente -Maggiore conduttività dei PCM organici -Basso costo -Non infiammabilità -Ben distinto cambiamento di fase | -Corrosività verso i metalli -Sottoraffreddamento -Segregazione di fase -Fusione Incongruente -Elevate variazioni volumetriche | -Punti di cambiamento di fase ben distinti -Le proprietà possono essere modificate per ottenere specifiche prestazioni | -Limitata disponibilità di dati sulle proprietà termo-fisiche di molti composti -Costi elevati |

Tabella 4- Vantaggi e svantaggi PCM [10, Bibliografia]

2.5 TIPO DI CONFINAMENTO DEI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE

Nel caso dei sistemi solido-liquido appena descritti il processo di confinamento del PCM risulta essere fondamentale per:

- contenere il materiale in fase liquida e in fase solida ed evitare perdite;
- prevenire cambiamenti nella sua composizione chimica (evitando interazioni con l'ambiente);
- aumentare la compatibilità del PCM con i materiali circostanti interni all'accumulo;
- migliorare la maneggiabilità de PCM;
- ridurre possibili variazioni esterne di volume;
- aumentare la superficie di scambio termico.

La stabilità del sistema PCM-contenitore è un fattore estremamente importante, quindi è opportuno in fase di analisi del PCM valutare e misurare le prestazioni dell'accumulo dopo vari cicli per verificare se è presente un peggioramento delle prestazioni.

In tal senso la compatibilità tra il PCM e l'involucro che lo contiene risulta essere di fondamentale importanza per garantire un elevato tempo di vita dell'accumulo. Le paraffine, in generale, presentino buona stabilità termica, mentre per gli acidi grassi ciò dipende molto dal grado di purezza. I sali idrati sono i PCM che presentano le maggiori criticità da questo punto di vista a causa delle già citate problematiche della segregazione e del sottoraffreddamento. Per contrastare tale svantaggio è stata testata l'introduzione di opportuni agenti nucleanti. In ogni caso, appare importante evidenziare come adeguati test di invecchiamento accelerato debbano essere previsti ai fini della verifica delle prestazioni nel tempo di questi materiali. Attualmente esistono due tipi di incapsulamento: il microincapsulamento e il macroincapsulamento. Il primo è il metodo più costoso ma consente alcuni vantaggi come di seguito descritto.

2.5.1 Microincapsulamento

Si tratta di una tecnica per cui il PCM viene avvolto in un numero elevato di piccolissime sfere di diametro compreso tra uno e qualche centinaio di micron. Il processo di inglobamento può avvenire per via fisica, tramite raffreddamento spray o essiccazione a spray, oppure per via chimica, tramite polimerizzazione interfacciale o coacervazione complessa. Nel secondo caso si possono raggiungere dimensione delle sfere anche inferiori

al micron (nano incapsulamento). Il materiale di contenimento utilizzato è tipicamente un polimero organico o gel di silice, anche se recentemente si sono studiati anche altri materiali come AlOOH e TiO₂. Il microincapsulamento consente un elevato coefficiente di scambio termico dato dall'elevato rapporto tra superficie di scambio e volume, una ridotta reattività con l'ambiente circostante ed una elevata possibilità di espansione del PCM senza interazione con la struttura circostante dovuta al piccolo diametro delle sfere. Quest'ultima caratteristica fa sì che il PCM possa essere prodotta sia in forma di polvere che disperso in un liquido.

In tal modo può essere aggiunto direttamente ai materiali da costruzione (cemento, cartongesso) senza rischio di perdite, a meno di verifiche sulle proprietà di resistenza meccanica degli stessi. In conclusione, il microincapsulamento si sta dimostrando negli ultimi anni come la tecnica più promettente per integrare il PCM nei materiali utilizzati nell'edilizia moderna, pur nella considerazione che l'aggiunta del materiale di contenimento ne riduce la capacità di scambio termico e quindi l'accumulo, sia per unità di volume che di massa.



Figura 2.9-Microcapsule di paraffina [4, Sitografia]

2.5.2 Macroincapsulamento

In questo caso l'inclusione del PCM avviene in qualche forma, come tubi, sfere, pannelli e altri recipienti che possono fungere direttamente da scambiatori o essere a loro volta incorporati negli elementi costruttivi dell'edificio o del serbatoio di accumulo negli impianti. È la forma di incapsulamento più utilizzata e avviene in contenitori di dimensioni maggiori di 1 cm. Se il PCM utilizzato ha bassa conduttività termica, un problema che può sorgere

con il macro-incapsulamento è la tendenza a solidificare/fondere nelle vicinanze del bordo, ciò produce un aumento della resistenza termica complessiva ed una conseguente riduzione dello scambio termico da cui ne deriva una non completa carica durante il giorno o scarica durante la notte. In ragione delle dimensioni, le macro-capsule devono essere protette da possibili danneggiamenti del materiale (tipicamente un materiale plastico come le poliolefine, più raramente un materiale metallico); risulta inoltre difficile l'integrazione nei materiali da costruzione e nelle strutture degli uffici. [10, Bibliografia]

2.6 MIGLIORAMENTO PROPRIETÀ TERMICHE PCM

Uno degli svantaggi che accumuna tutte le tipologie di PCM è la bassa conduttività termica che può limitare la capacità di scambio termico.

Si tratta di un grosso limite in quanto una bassa conduttività rallenta la velocità di trasmissione del calore ceduto o assorbito dal materiale al suo interno e quindi rende meno efficace lo scambio termico complessivo, con la conseguente possibilità di non sfruttare completamente la capacità di accumulo latente del materiale a cambiamento di fase. I PCM organici hanno una conducibilità intorno a $0,2 \frac{W}{m K}$ mentre i sali inorganici si attestano sui $0,5 \frac{W}{m K}$.

Una possibile soluzione al problema è l'inserimento, mediante inserti fissi, di materiali ad elevata conduttività (rame, alluminio, nichel, fibre di carbonio) dalle forme diverse (alette, a nido d'ape, a filamento, a schiuma). Alcuni studi svolti [13, Bibliografia] hanno dimostrato, utilizzando compositi in schiuma di grafite, un aumento della conduttività termica della struttura da 230 a 570 volte quella del PCM originale.

La creazione di materiali compositi tramite inserimento di PCM in materiali porosi metallici o inserimento di nano-materiali di grafite nei PCM ha come controindicazione una penalizzazione sulla capacità di accumulo latente specifica.

2.7 UTILIZZO DEI PCM NEGLI EDIFICI

Si possono individuare quattro principali applicazioni dei PCM nell'ambito edilizio:

- *free cooling*;
- spostamento del carico termico/frigorifero di punta (*peak load shifting*);
- sistemi di accumulo termico attivo;
- sistema di accumulo termico passivo.

2.7.1 *Free cooling*

Il *free-cooling* è ottenuto con l'immissione in ambiente di aria esterna, quando questa si trova in condizioni energetiche migliori rispetto all'aria ambiente, ovvero quando l'entalpia dell'aria esterna è inferiore all'entalpia dell'aria ambiente. Di solito ciò accade durante le ore notturne: favorendo l'ingresso dell'aria notturna più fresca, grazie all'ausilio di ventilatori meccanici, è possibile raffrescare l'ambiente interno. Molti autori hanno valutato l'effetto dell'utilizzo dei PCM in applicazioni di *free-cooling*, osservando come queste configurazioni possano determinare una riduzione dei carichi di ventilazione e raffrescamento [17, Bibliografia].

I sistemi di *free-cooling* sfruttano il cambiamento di fase del PCM durante il ciclo giornaliero; il materiale solidifica durante la notte cedendo calore all'aria esterna mentre durante le ore diurne, quando la temperatura esterna tende a salire, fonde assorbendo il calore dall'ambiente interno e migliorando quindi il comfort termico. Tali sistemi funzionano correttamente scegliendo un PCM che presenti una temperatura di cambiamento di fase che sia minore durante il giorno e maggiore durante la notte di quella dell'aria esterna.

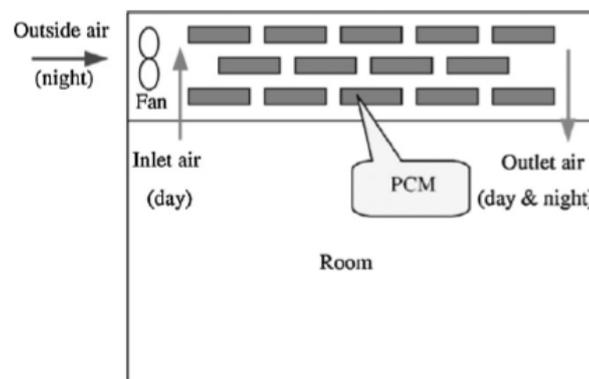


Figura 2.10-PCM sfruttato nei sistemi free cooling [17, Bibliografia]

2.7.2 Peak load shifting

È ben noto il vantaggio derivante dallo spostamento temporale (*shifting*) del carico di punta di un edificio dalle ore di picco alle ore di medio carico o meglio ancora alle ore vuote del sistema elettrico; si tratta di un vantaggio innanzitutto economico poiché le ore di picco sono le più costose in termini di euro al kilowattora ma anche energetico.

In effetti, poiché solitamente si fa riferimento al raffrescamento estivo ed all'utilizzo di macchine frigorifere a compressione elettrica condensate ad aria, le ore di picco del carico frigorifero coincidono con le ore di punta del sistema elettrico; la conseguenza è che tale strategia consente di ridurre la potenza frigorifera della macchina e produrre l'energia frigorifera necessaria durante le ore di minor temperatura dell'aria (quindi con EER maggiori). L'utilizzo dei PCM nell'ottica del *peak load shifting* può essere gestito secondo logiche differenti. Se il PCM è integrato nelle strutture edilizie, le strategie di controllo sono simili a quelle adottate nel caso di accumulo nella massa termica edificio: si sfrutta l'elevata inerzia termica delle strutture dell'edificio dovute alla sua massa al fine di ridurre il carico di picco nelle ore diurne.

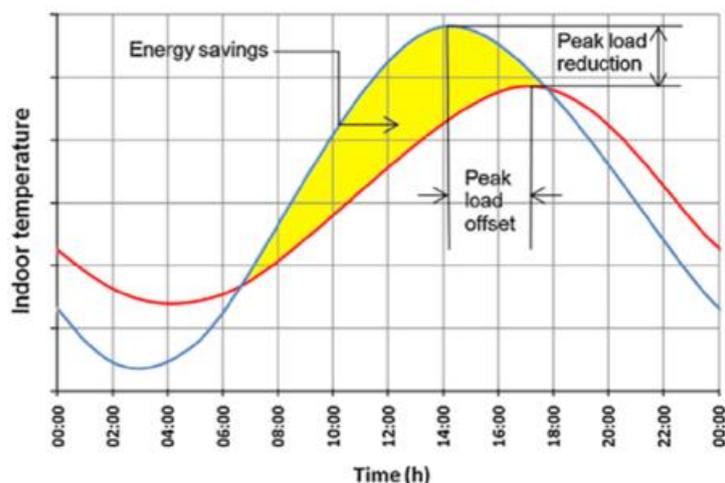


Figura 2.11-Riduzione e ritardo temporale nel carico di raffrescamento di picco [1, Bibliografia]

Se invece il PCM è integrato nell'impianto di climatizzazione, le strategie di controllo sono simili a quelle adottate nel caso di accumulo nei sistemi a serbatoio: in questo caso la macchina frigorifera lavora a potenza maggiore nelle ore più favorevoli (serali/notturne) per produrre il freddo da accumulare nel serbatoio, con i vantaggi prima richiamati (maggiore efficienza della macchina e minor costo dell'energia elettrica).

La Figura 2.12 illustra un ulteriore aspetto interessante dell'utilizzo dei PCM sia nei sistemi attivi che in quelli passivi: la possibilità di un maggior controllo del comfort termico negli ambienti indoor. I PCM inseriti nel sistema edificio/impianto contribuiscono a smorzare le fluttuazioni di temperatura interna, a patto che il materiale scelto cambi di fase ad una temperatura (o intervallo di temperature) compatibile con il range di comfort tipico degli ambienti indoor (20-26°C).

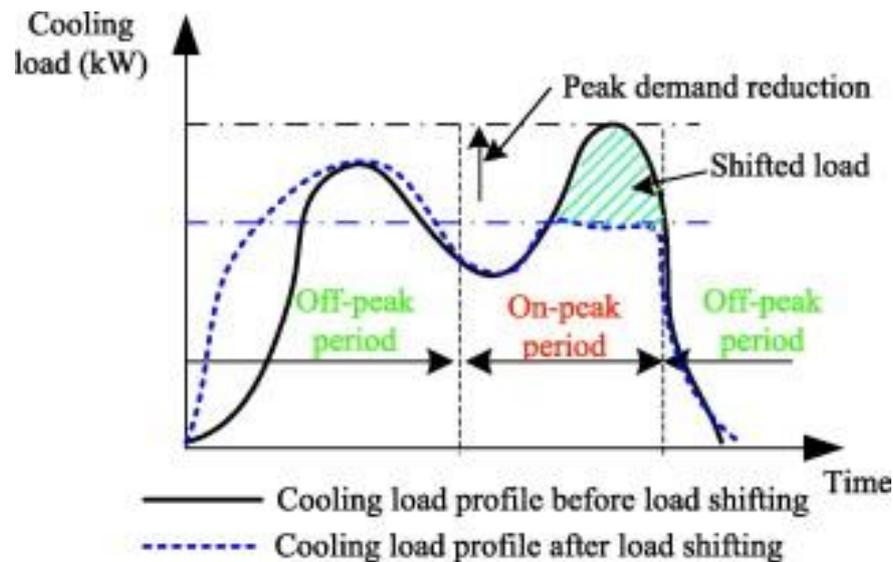


Figura 2.12-Carico termico di raffrescamento [15, Bibliografia]

Risulta quindi importante che il materiale riesca ad effettuare il processo di cambiamento di fase in modo completo: la totale solidificazione durante le ore notturne e la completa liquefazione durante le ore diurne. Questo è funzione ovviamente del tipo di materiale ma anche del clima, pertanto sono favoriti climi con escursioni termiche elevate durante le 24 ore. La maggior sensazione di comfort all'interno degli ambienti è dovuta alla minore fluttuazione di temperatura, alla riduzione del picco di temperatura ed alla maggiore uniformità tra temperatura dell'aria e delle superfici interne, ciò che riduce il discomfort dovuto agli scambi termici di tipo radiativo.

2.7.3 Sistemi di accumulo attivi

Come descritto precedentemente i sistemi di accumulo di tipo attivo prevedono che la sostanza che accumula l'energia termica circoli attraverso uno scambiatore di calore e che l'accumulo venga caricato/scaricato mediante convezione forzata. I principali sistemi di

accumulo di energia termica attivi integrati negli edifici sono inseriti nei controsoffitti, inseriti nei sistemi di ventilazione meccanica o nei sistemi fotovoltaici integrati nell'edificio.

2.7.3.1 Integrazione nel sistema di ventilazione ed unità trattamento aria

I sistemi di condizionamento dell'aria spesso operano in condizioni molto variabili a causa della forte variabilità delle condizioni climatiche e delle attività umane. Ciò si traduce in richieste di energie elettriche molto variabili e caratterizzate da picchi di potenza alternanti. Grazie all'ausilio dei PCM è possibile ridurre i carichi e spostarli nelle ore notturne quando le tariffe elettriche sono più basse. Inoltre, questo consente di ridurre le taglie degli impianti con conseguente minori costi per l'utente.

In questa tipologia di sistema di accumulo i PCM sono integrati su canali e tubazioni, nelle unità di recupero termico e trattamento d'aria o come batterie di scambio termico soprattutto per la ventilazione notturna ai fini della riduzione del carico di raffrescamento diurno.

Un esempio applicativo in questo senso è descritto da Etheridge [5, Bibliografia] e consiste in un dispositivo costituito da uno scambiatore a tubo di calore (*heat pipe*) a forma cilindrica in parte immerso in un PCM. Questo dispositivo è disposto in modo opportuno tale da beneficiare del movimento dell'aria innestato da un ventilatore a bassa prevalenza.

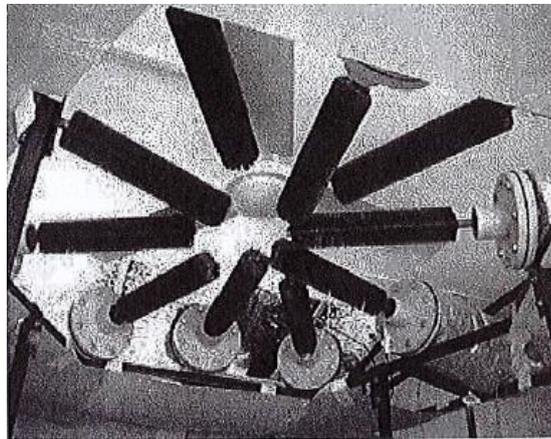


Figura 2.13-Unità prototipo disposte attorno al ventilatore [16, Bibliografia]

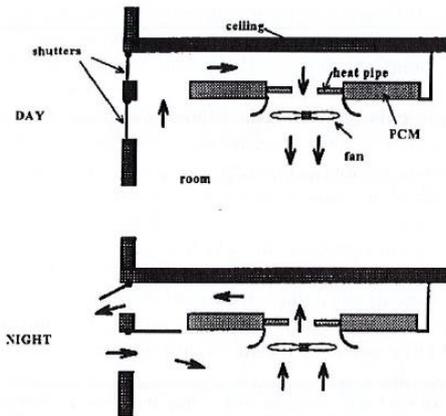


Figura 2.14-Rappresentazione schematica dell'installazione del sistema a tubo di calore con PCM [16, Bibliografia]

Durante le ore diurne il calore viene ceduto dall'aria dell'ambiente indoor alla sezione esposta del tubo di calore (evaporante) e trasferito quindi al PCM che avvolge la sezione condensante. Durante le ore notturne, viceversa, viene fatta circolare aria esterna più fresca attraverso la sezione esposta che funziona ora come sezione condensante, ed il calore viene ceduto dal PCM (che solidifica) nella sezione avvolta (evaporante). Il ruolo del tubo di calore è quello di incentivare lo scambio termico tra aria e accumulo di PCM che altrimenti risulterebbe estremamente penalizzato dalla non elevata conduttività termica di quest'ultimo.

2.7.3.2 Sistemi di raffrescamento ad assorbimento

I sistemi di *solar cooling* sfruttano l'abbinamento tra pannelli solari termici ed una macchina frigorifera e risultano essere una valida alternativa ai convenzionali sistemi di condizionamento dell'aria. Il solar cooling sfrutta il fatto che le ore delle giornate estive in cui c'è la maggiore richiesta di freddo per il condizionamento degli edifici coincidono con la massima disponibilità di radiazione solare. Vista la natura intermittente di questo sistema risulta essenziale la presenza di un accumulo termico. Ad oggi le prove pratiche riguardo questa applicazione sono poche, ma tra le poche applicazioni significative bisogna citare quella di Helm [7, Bibliografia]; il quale ha progettato e testato un sistema di raffrescamento ad adsorbimento con accumulo a calore latente a bassa temperatura. Il PCM utilizzato è un cloruro di calcio esaidrato ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) con range di fusione 27–29°C.

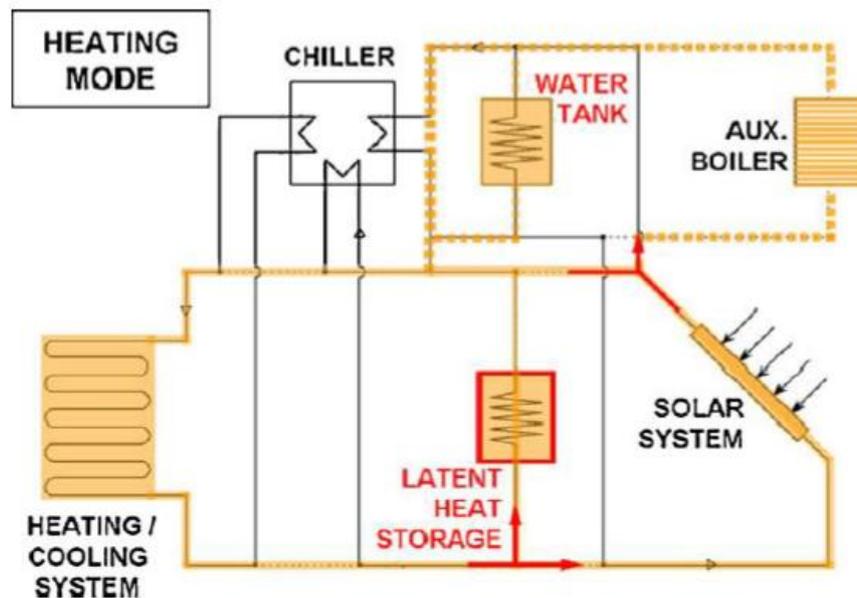


Figura 2.15-Sistema di raffreddamento ad adsorbimento con accumulo in PCM [7, Bibliografia]

Confrontandolo con un accumulo ad acqua, si è evidenziato come l'accumulo a PCM abbia una capacità di accumulo dieci volte maggiore rispetto a quello ad acqua. Inoltre, grazie all'integrazione dell'accumulo a PCM all'interno del sistema, la richiesta risulta spostata nelle ore fuori picco.

2.7.4 Sistemi di accumulo passivo

I sistemi di accumulo passivo negli edifici si riferiscono all'utilizzo di parti strutturali ai fini di accumulare energia termica e quindi incrementare la massa termica grazie alla capacità offerta dai PCM di accumulare il calore durante le ore più calde della giornata, proteggendo gli ambienti interni dal surriscaldamento diurno, tipico delle giornate estive. Lo scopo ultimo è quello di ridurre la necessità di produrre energia da fonti convenzionali e garantire e possibilmente migliorare le condizioni di comfort indoor. L'utilizzo dei PCM nei sistemi passivi di accumulo integrati negli edifici può sicuramente aiutare a raggiungere tali obiettivi. Si tratta di scegliere la temperatura di fusione del materiale, il tipo di materiale adeguato, la quantità, la posizione all'interno delle strutture, in funzione dei carichi termici endogeni ed esogeni. Vista la bassa conduttività termica dei PCM, se la quantità o la posizione del materiale non viene scelta in modo adeguato alle caratteristiche dell'edificio in questione, non potrà avvenire la completa fusione e poi successiva solidificazione del PCM con una penalizzazione sulle prestazioni energetiche e sul comfort interno dell'edificio. In base all'applicazione si determina il miglior materiale adatto, ciò avviene

tenendo in considerazione la temperatura di fusione, altri parametri termo-fisici e caratteristiche di sicurezza. Una volta scelta il PCM bisogna valutare come integrarlo nella struttura dell'edificio. Come già descritto precedentemente sono possibili vari metodi:

- inglobamento diretto: il PCM liquido o in polvere viene direttamente miscelato col materiale da costruzione come cartongesso, cemento o plastica.
- immersione: l'elemento costruttivo come il mattone, la lastra o il cartongesso o il blocco di cemento è immerso nel PCM liquido che quindi viene assorbito per capillarità in tempo nell'ordine delle ore.

Entrambi i metodi risultano essere economici, ma presentano alcuni svantaggi come le possibili perdite/trafilamenti di PCM dalla struttura dopo un elevato numero di cicli di carica/scarica e la possibile non compatibilità con i materiali da costruzione. Una tecnica innovativa che sta trovando sempre più interesse consiste nel cosiddetto PCM a forma stabilizzata. In questo caso il PCM viene fuso e miscelato a temperature adeguate assieme ad un materiale di supporto, polietilene. La miscela viene poi raffreddata formando un materiale composito solido che può contenere fino all'80% in peso di PCM e che presenta ottime proprietà termo-fisiche (elevato calore specifico e conduttività termica).

Come già detto precedentemente la soluzione più utilizzata è quella che consiste nell'incapsulamento, sia nelle modalità micro che macro.

Tra le varie applicazioni possibili lo studio condotto da Kuznik [8, Bibliografia] ha analizzato il comportamento energetico di un edificio leggero, posizionando PCM nella parte interna delle pareti perimetrali. I valori di temperatura e flusso radiativo sono ottenuti mediante simulazione dinamica, confrontando le grandezze misurate nel caso di parete con PCM integrato e non. I risultati hanno mostrato nel caso di utilizzo di PCM una riduzione dell'effetto del surriscaldamento dell'ambiente interno e un abbassamento della temperatura della superficie interna della parete, con conseguente aumento delle condizioni di comfort.

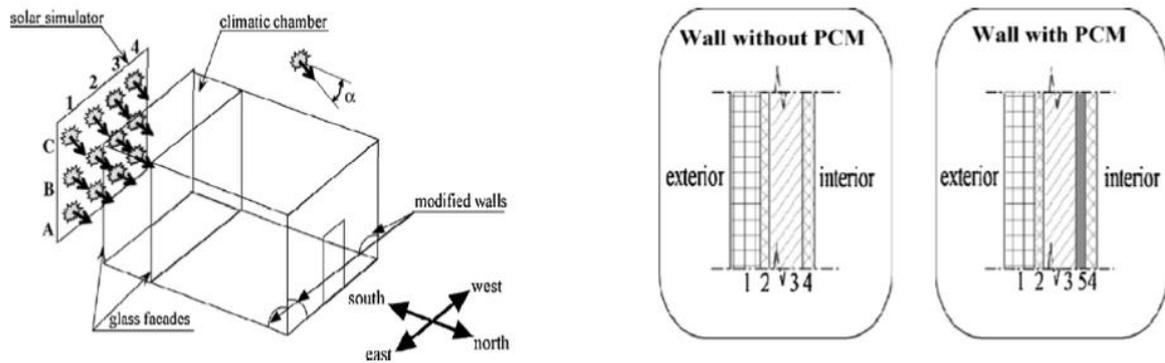


Figura 2.16-PCM inserito nella stratigrafia dell'edificio [8, Bibliografia]

Un'altra innovativa applicazione è stata compiuta da Horwath [8, Sitografia] nel Campus Universitario di Seattle; nell'edificio è stato inserito un PCM sotto forma di gel nell'intercapedine tra le mura e i soffitti. Il gel, che si solidifica durante la notte e si fonde con il calore durante l'arco della giornata, ha dimostrato di poter ridurre la quantità di energia necessaria per raffreddare gli spazi interni, con un risparmio energetico notevole e ridurre le oscillazioni della temperatura interna. Utilizzando un biogel con spessore di 1,25 cm si ottiene lo stesso risultato termico che si otterrebbe con una muratura in calcestruzzo o mattoni di spessore pari a 20-25 cm circa.

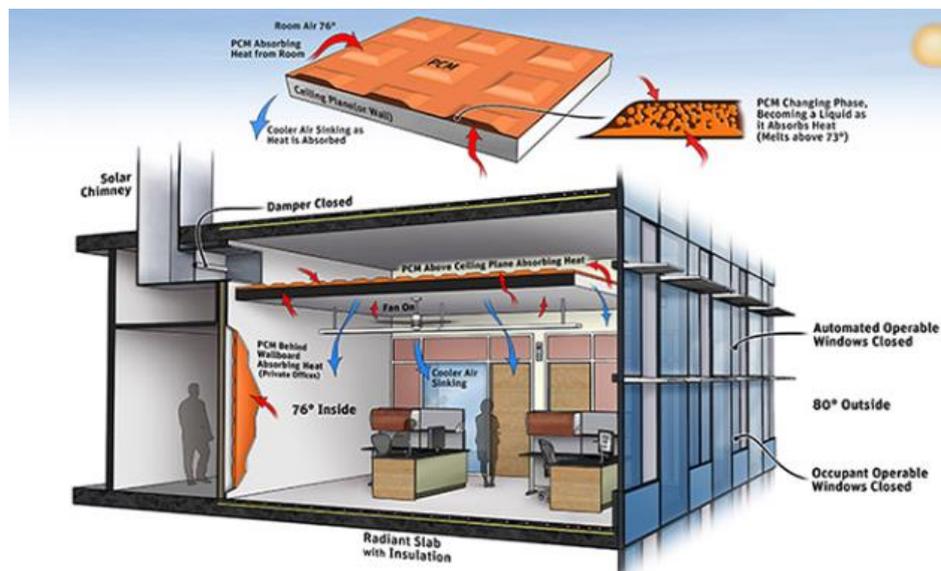


Figura 2.17-PCM utilizzato in edilizia per ridurre il fabbisogno energetico per raffreddare l'ambiente [8, Sitografia]

3. CASO STUDIO: SERRA

3.1 PREMESSE

Negli ultimi anni, una delle problematiche principali di interesse, non solo in ambito scientifico ma anche in ambito politico e sociale, è la progressiva riduzione delle riserve di combustibili fossili; fonte energetica fondamentale per l'uomo da sempre.

Ad oggi i combustibili contribuiscono per larga parte al fabbisogno energetico mondiale e non è possibile verificarne la stima esatta delle giacenze presenti, ma è evidente che, in futuro, queste saranno sempre più scarse: secondo i dati dell'International Energy Outlook della U.S. Energy Information Administration (EIA, <https://www.eia.gov/>) del 2017, l'offerta globale di petrolio greggio, altri idrocarburi liquidi e biocarburanti dovrebbe essere adeguata a soddisfare la domanda mondiale di combustibili liquidi fino al 2050. Ad oggi c'è comunque una sostanziale incertezza sui livelli della futura domanda e offerta di combustibile liquidi.

Una misurazione spesso citata, ma fuorviante, della disponibilità di risorse future è il rapporto riserve-produzione che viene calcolato dividendo il volume delle riserve certe provate per il volume del consumo annuale corrente.

In futuro le riserve globali aumenteranno, probabilmente con lo sviluppo tecnologico, ma è bene ricordare che negli ultimi anni si sono incontrate serie problematiche nelle operazioni di estrazione da nuovi pozzi.

Ai problemi di reperimento delle fonti fossili bisogna aggiungere la gravità dell'inquinamento che questi combustibili causano. L'aspetto più critico è la produzione di un'eccessiva quantità di gas serra che rappresenta la maggior causa del 'global warming', ovvero dell'innalzamento della temperatura media vicino alla superficie terrestre. I carburanti utilizzati nel settore dei trasporti terrestri contribuiscono in modo significativo alle emissioni globali. Il monitoraggio e la riduzione delle emissioni di gas serra prodotte nel ciclo di vita dei combustibili possono aiutare la Comunità Internazionale a raggiungere gli obiettivi prefissati di riduzione di tali gas tramite la decarbonizzazione dei combustibili da trasporto.

Oggi l'aumento delle temperature è arrivato a +1°C rispetto a metà Ottocento, procedendo di questo passo il limite di +1,5°C sarà raggiunto tra il 2030 e il 2052. Secondo l'Agenzia europea dell'ambiente (<https://www.eea.europa.eu/it>) entro il 2050 le emissioni globali devono essere ridotte del 50% rispetto ai livelli del 1990, per poi raggiungere, entro la fine del secolo, la neutralità carbonica.

Tale fenomeno ha comportato e comporterà cambiamenti climatici importanti come precipitazioni più intense e inondazioni più frequenti; lo scioglimento dei ghiacciai ha causato un aumento del livello dei mari con conseguente abbassamento del loro livello di pH e quindi gravi danni all'ecosistema marino. Da qui deriva la necessità di ridurre con urgenza l'impiego dei combustibili di origine fossile ancora prima dell'esaurimento dei relativi giacimenti.

Gli strumenti per soddisfare la crescente domanda di energia e la mitigazione dell'inquinamento ambientale e dei cambiamenti climatici sono il risparmio energetico, il miglioramento dell'efficienza energetica, la cattura e l'immagazzinamento della CO₂ e l'impiego di fonti energetiche rinnovabili.

Tra le fonti di energia alternativa con cui sostituire progressivamente quelle di origine fossile iniziano a rivestire un ruolo sempre più importante i biocarburanti, ovvero i combustibili prodotti a partire da biomasse, come il bioetanolo e il biodiesel. La direttiva 2009/30/ce del Parlamento Europeo stabilisce l'obiettivo di sostituire con i biocarburanti il 10% di benzina e gasolio entro il 2020.

La biomassa è un materiale vegetale o animale di origine recente, disponibile su base rinnovabile; a differenza delle fonti fossili presenta il vantaggio di avere una velocità di produzione confrontabile con quella di consumo e di assorbire la CO₂ durante la fase di crescita.

3.2 CARATTERISTICHE GENERALI

Il caso studio in esame riguarda una serra situata a Nimes, città vicino alla costa nel Sud della Francia. All'interno vengono coltivati in appositi contenitori (Fotobioreattori) microalghe, da cui vengono ricavati olio vegetale e pannelli secchi tramite una serie di processi chimici, i primi per la produzione di bio-carburante mentre i secondi per la produzione di mangimi per bestiame e fertilizzanti.

3.3 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E STRUTTURALI



Figura 3.1-Inquadramento territoriale: fonte Google Earth

| DIMENSIONE GEOMETRICHE SERRA | |
|------------------------------|-------|
| A [m] | 100 |
| B [m] | 200 |
| Altezza di colmo [m] | 6 |
| Altezza di gronda [m] | 5 |
| Superficie [m ²] | 21000 |

Tabella 5- Grandezze geometriche serra

Nelle Tabelle 6, 7, 8 sono riportate le stratigrafie relative rispettivamente al pavimento controterra, alle pareti esterne e alla copertura.

| Pavimento Controterra | | | | |
|-------------------------------|-------------|----------------|-----------------------------|------------------------|
| Strati e tipologia | Spessore[m] | lambda [W/m K] | Densità[kg/m ³] | U [W/m ² K] |
| Cls armato di sabbia e ghiaia | 0,1 | 1,51 | 1800 | 0,305 |
| Polistirene Espanso | 0,05 | 0,042 | 20 | |
| Barriera al Vapore | 0,01 | 0,5 | 1600 | |
| CA sabbia e ghiaia | 0,1 | 1,16 | 1500 | |
| Pietrame | 0,03 | 1,5 | 1500 | |

Tabella 6- Stratigrafia pavimento controterra

| Pareti esterne | | | | |
|---------------------------|-------------|----------------|-----------------------------|------------------------|
| Strati e tipologia | Spessore[m] | lambda [W/m K] | Densità[kg/m ³] | U [W/m ² K] |
| Foglio di cartongesso | 0,02 | 0,22 | 970 | 0,34 |
| Poliuretano | 0,06 | 0,023 | 35 | |
| Cls. | 0,12 | 1,7 | 2300 | |
| Intonaco gesso puro | 0,02 | 0,35 | 1200 | |

Tabella 7- Stratigrafia pareti esterne

| Copertura | | | | |
|---------------------------|-------------|----------------|-----------------------------|------------------------|
| Strati e tipologia | Spessore[m] | lambda [W/m K] | Densità[kg/m ³] | U [W/m ² K] |
| Intonaco gesso | 0,02 | 0,22 | 970 | 0,17 |
| Poliuretano espanso | 0,2 | 0,032 | 35 | |
| Cls. | 0,15 | 1,7 | 2300 | |
| Lastra grecata | 0,012 | 0,42 | 1020 | |

Tabella 8- Stratigrafia copertura

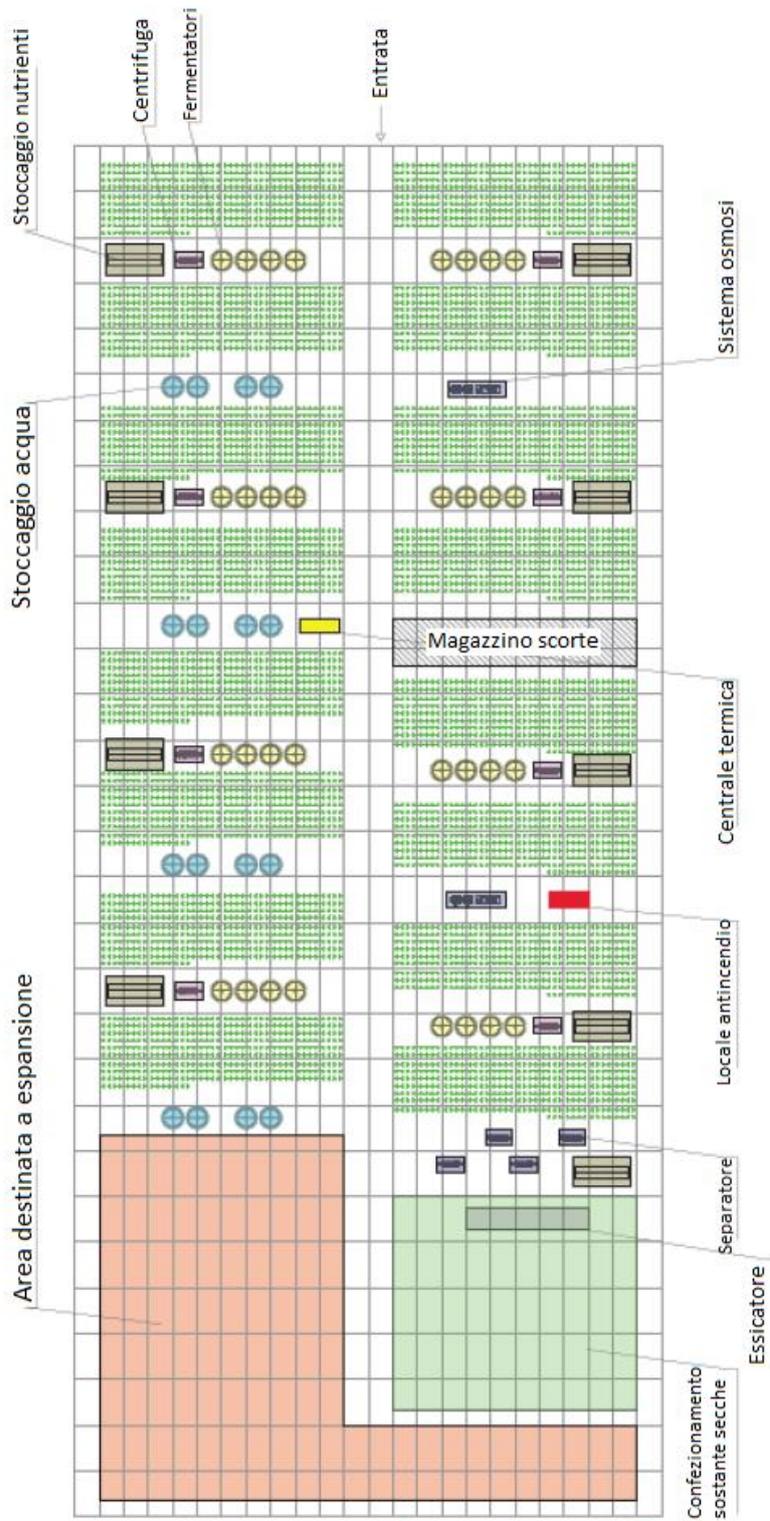


Figura 3.2-Pianta serra

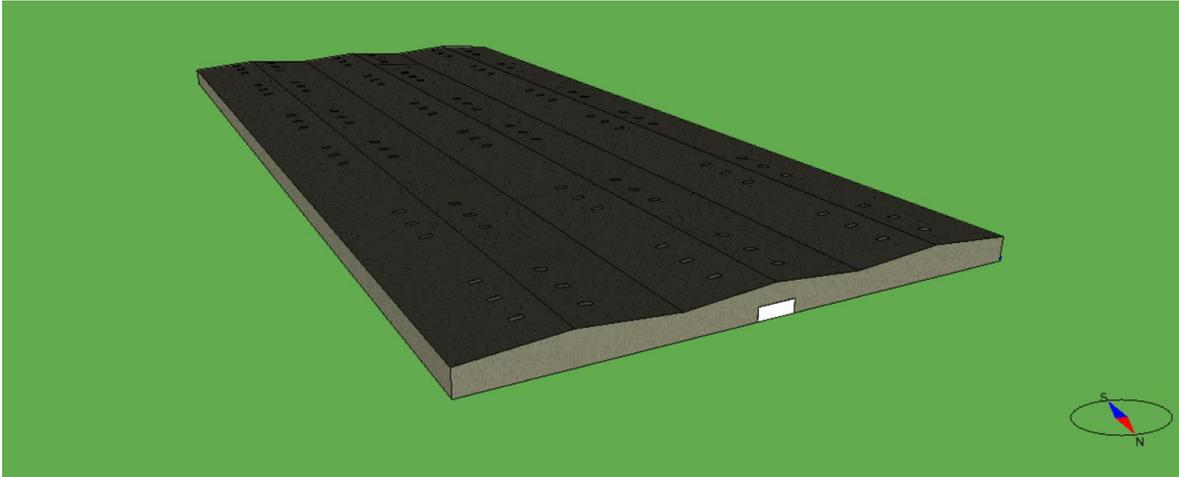


Figura 3.3-Rappresentazione serra su IDA ICE

3.4 PROCESSO CHIMICO E COMPONENTI

Come appena detto, la serra è adibita alla produzione di microalghe: organismi fotosintetici, che utilizzano l'anidride carbonica per produrre una vasta gamma di molecole, come i trigliceridi, i carboidrati e le proteine convertibili in carburanti per autotrazione. A partire dalle alghe è possibile, in seguito a particolari trattamenti chimici, ottenere olio vegetale, da cui tramite un ulteriore processo chimico, detto di transesterificazione, ricavare biodiesel, biocarburante di terza generazione.

L'utilizzo di biocarburante per il trasporto può portare ad una significativa riduzione delle emissioni di CO₂ in conformità con il protocollo di KYOTO 2020. Rispetto al gasolio, riduce le emissioni nette di monossido di carbonio (CO) del 50% circa e di diossido di carbonio del 78%.

La produzione della serra non si ferma all'olio vegetale, ma comprende anche mangimi per animali e fertilizzanti, entrambi ricavati da materiale secco (pannelli) ottenuto a seguito dell'essiccazione delle microalghe.

Le alghe si trovano all'interno di fotobioreattori (FBR) tubolari che sono costituiti da una serie di tubi paralleli, dritti e trasparenti, di materiale vetrato del diametro di 60 cm. All'interno della serra sono presenti 18 'isole' di coltivazione, ogni isola comprende 400 fotobioreattori. Le isole sono raggruppate a coppie, ogni coppia forma una linea di produzione.

I fotobioreattori permettono un controllo più accurato dei parametri operativi: pH, temperatura e livelli minimo e massimo di acqua all'interno; inoltre evitano contaminazioni con l'ambiente esterno e filtrano i raggi UV e IR che possono danneggiare le microalghe. Le

superfici dei FBR sono in grado di modificare l'assorbimento degli stessi della luce in base alle esigenze delle microalghe interne. L'intensità luminosa esterna cambia in base alle ore della giornata, pertanto durante la notte è fondamentale garantire luce alle alghe tramite illuminazione artificiale. L'esposizione ad una intensità luminosa eccessiva provoca effetti negativi sulle alghe che possono portare alla riduzione fino ad un quinto della normale produttività.

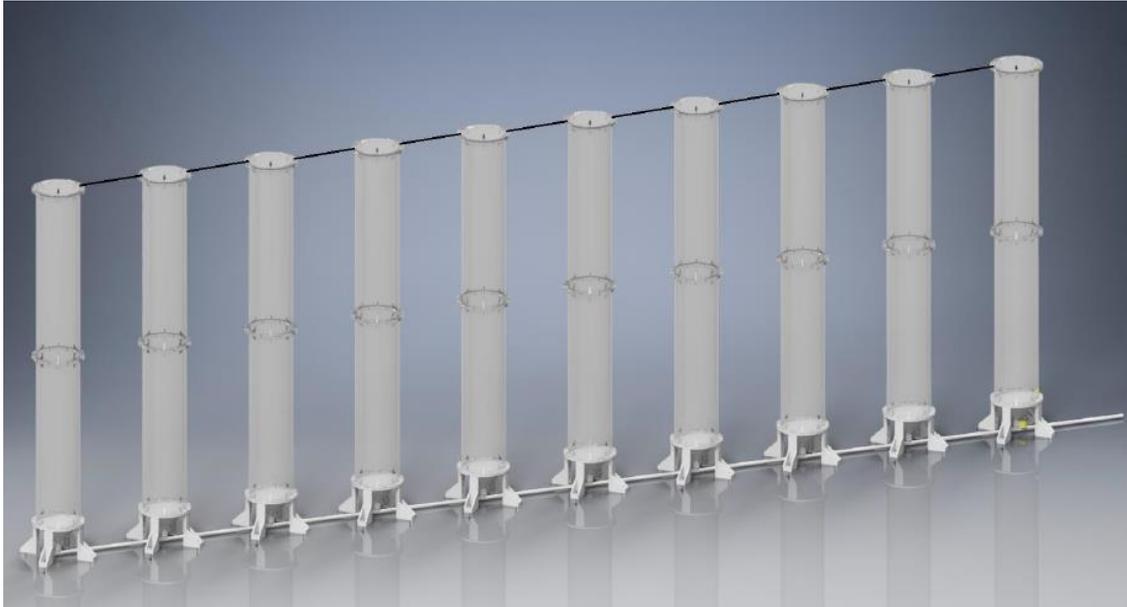


Figura 3.4-Fotobioreattori [14, Bibliografia]

Le componenti fondamentali per eseguire il processo di produzione di biodiesel sono: una zona di stoccaggio di materiale nutriente composto da zuccheri (glucosio), una centrifuga e fermentatori.

Inizialmente le alghe vengono poste nei FBR dove crescono in presenza di luce, CO₂ e acqua tramite il processo fotosintetico:



Successivamente la poltiglia formata da alghe e acqua viene separata dalla centrifuga che estrae dal miscuglio la maggior parte dell'acqua e invia ai fermentatori alghe secche e una modica quantità rimanente di acqua. Contemporaneamente vengono trasferiti gli zuccheri dalla zona di stoccaggio ai fermentatori.

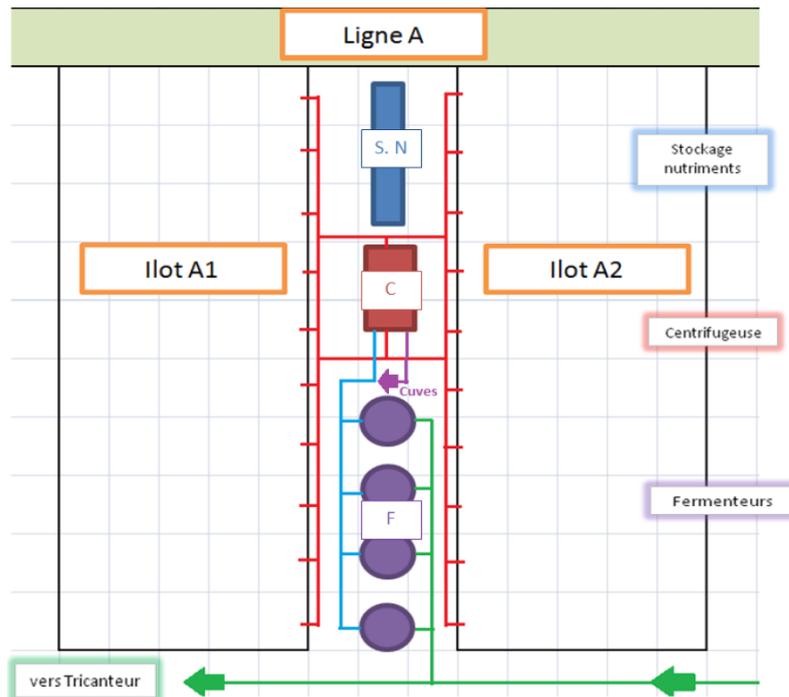
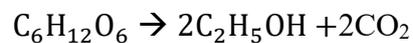


Figura 3.5-Linea di produzione A [14, Bibliografia]

All'interno di questi ultimi avviene la fermentazione alcolica durante la quale il glucosio viene convertito in etanolo e CO₂, in mancanza di O₂, secondo la seguente reazione:



La peculiarità delle microalghe combustibili è che hanno una quantità di lipidi doppia rispetto alla media di quelle oggi sul mercato, questo permette una maggiore produzione, a parità di alghe coltivate, di olio vegetale (circa il 25% in più) grazie al processo di fotosintesi combinata con la fermentazione.

Nella Figura 3.6 viene illustrato il diagramma generale di flusso che riassume il processo di produzione di biodiesel e olio vegetale a partire dalle microalghe.

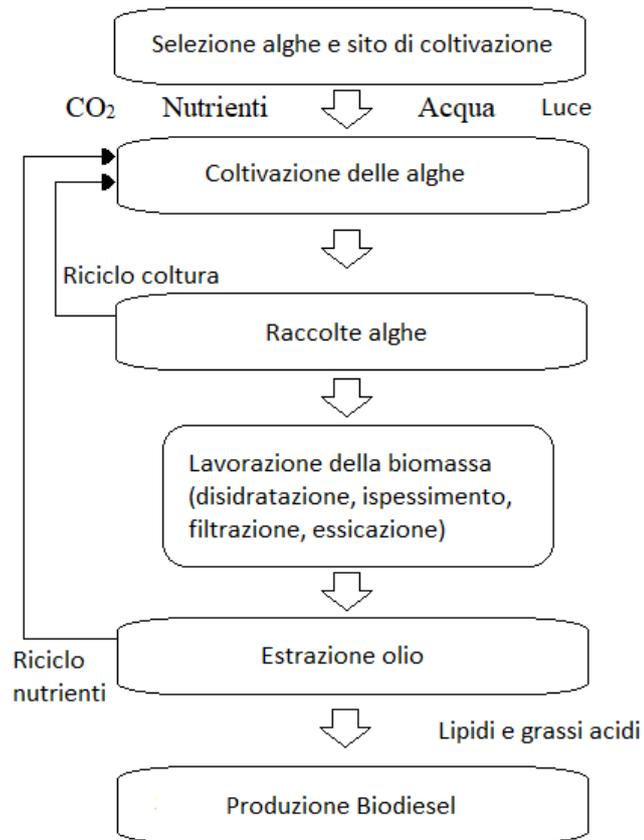


Figura 3.6-Stadi di lavorazione per la produzione di biodiesel a partire da biomassa algale

Successivamente i fermentatori vengono svuotati e il materiale inviato al separatore che divide il miscuglio in: olio vegetale, alghe umide e acqua. L'ultimo passaggio consiste nell'essiccazione delle alghe, processo nel quale vengono eliminati i residui di acqua, da cui si ottengono pannelli secchi che verranno poi sfruttati per la produzione di mangimi per bestiame e fertilizzanti.

3.5 PARAMETRI CLIMATICI

Per la realizzazione dell'analisi è stato utilizzato il file climatico relativo alla località Nimes presente nel database del software IDA *Indoor Climate and Energy* (IDA ICE).

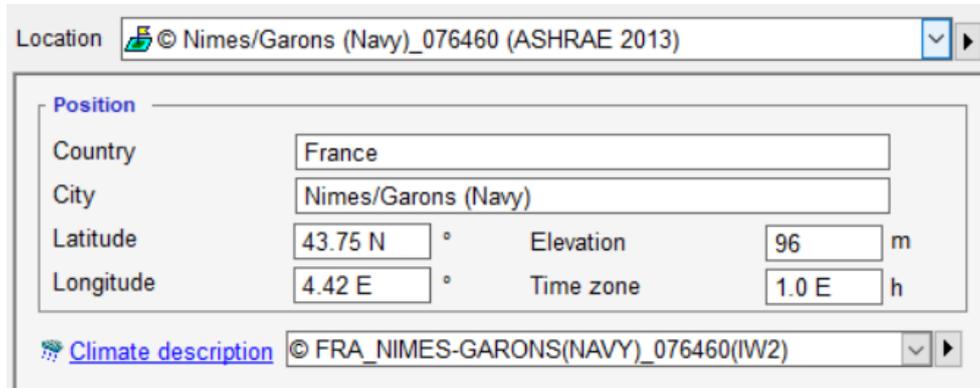


Figura 3.7-Parametri geografici

Nella Figura 3.8 è riportato l'andamento della temperatura di bulbo secco per l'intero anno passato (2018).

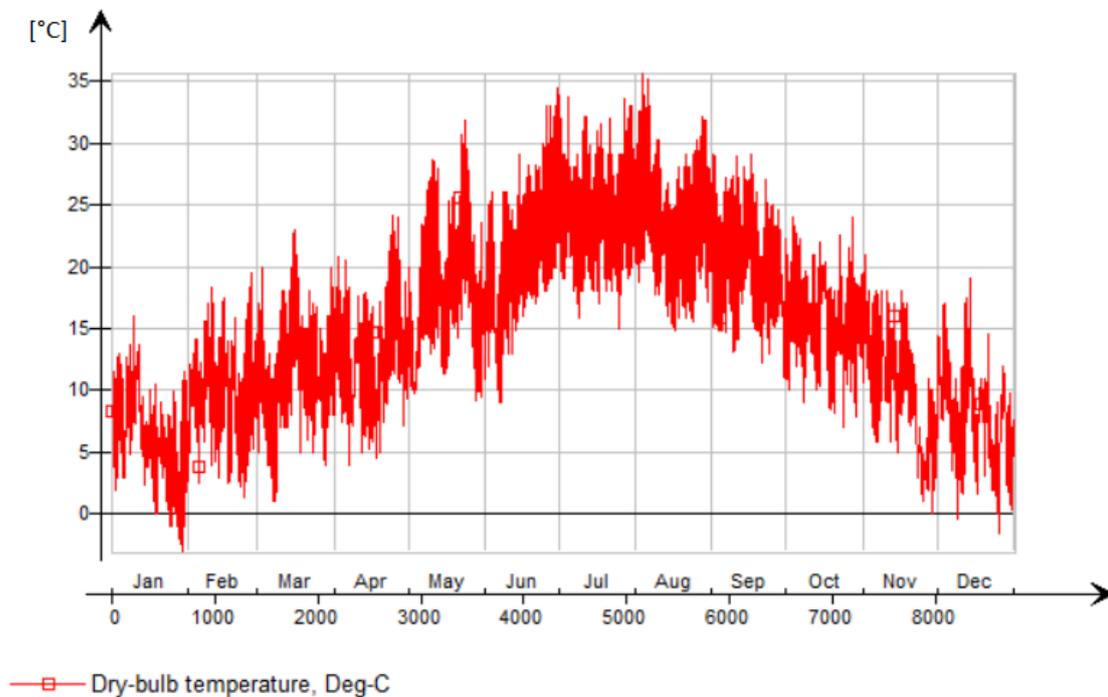


Figura 3.8-Andamento temperatura esterna anno 2018

3.6 CONDIZIONI DI COMFORT RICHIESTE

La produzione di microalghe necessita di stringenti condizioni interne di temperatura, un'eccessiva temperatura porterebbe al danneggiamento delle microalghe, mentre l'umidità relativa non influenza o modifica il processo chimico che avviene nella serra.

Nella stagione estiva bisogna garantire una temperatura interna di almeno 23 °C, mentre in quella invernale di minimo 18 °C. La zona dove avviene il confezionamento del materiale secco e l'essiccazione delle alghe non viene climatizzata ma soltanto ventilata con ventilatori di estrazione.

4. SCELTE PROGETTUALI

La serra in esame, come detto in precedenza, si trova a Nimes, città vicina alla costa nel sud della Francia.

Il clima risulta essere temperato e secco, con picchi di temperatura nella stagione estiva mai superiore ai 32-33 °C, mentre nella stagione invernale la temperatura non scende mai al di sotto dei 5 °C. Dovendo garantire una temperatura interna massima di 23 °C nei mesi più caldi e non avendo vincoli ristretti sull'umidità interna si è optato per installare un sistema che sfruttasse il raffrescamento evaporativo, particolarmente adatto ai climi secchi e per edifici industriali e commerciali di grandi dimensioni.

4.1 RAFFREDDAMENTO EVAPORATIVO

Il raffrescamento evaporativo, chiamato in alcuni casi anche raffrescamento adiabatico, si basa su un semplice principio fisico conosciuto da centinaia di anni e utilizzato in diverse forme.

L'avvento della tecnologia, la disponibilità di materiali più duttili e resistenti e soprattutto l'introduzione dell'elettronica, ha permesso lo sviluppo di apparecchiature sempre più pratiche ed efficienti per utilizzare al meglio questo principio fisico che fornisce come effetto un raffrescamento del tutto "naturale", e quindi senza l'utilizzo di fluido frigorifero, con consumi energetici bassissimi, necessitando esclusivamente di pochissima energia elettrica necessaria al funzionamento di un semplice ventilatore e di una piccola pompa di distribuzione dell'acqua.

4.1.1 Principio Di Funzionamento

Il raffrescamento evaporativo utilizza una delle proprietà fisiche dell'aria la quale è in grado di assorbire, e quindi contenere, una certa quantità di vapore acqueo (acqua) in funzione della sua temperatura. Il rapporto tra la quantità effettiva di vapore acqueo contenuto in un dato momento ed il valore massimo che questa può contenere definisce la percentuale di umidità relativa (U.R.) dell'aria in questione.

Più l'aria è secca e più vapore acqueo è in grado di assorbire, mentre più è umida, meno è in grado di riceverne altro. La quantità assoluta di vapore acqueo che l'aria può contenere dipende dalla sua temperatura: più l'aria è calda e più è in grado di assumere vapore acqueo e viceversa. Questa caratteristica fisica dell'aria è espressa con chiarezza sul diagramma psicrometrico che riporta le diverse condizioni e caratteristiche tipiche dell'aria umida.

Il raffrescamento evaporativo consente di aggiungere all'aria la quantità di vapor acqueo mancante per renderla satura (o molto prossima alla saturazione), quindi con un'umidità prossima al 100 %. L'assorbimento del vapor acqueo da parte dell'aria è possibile grazie al calore contenuto nell'aria, che consente di fare evaporare una certa quantità di acqua che si trasforma appunto in vapor acqueo. Questo calore "di evaporazione" viene prelevato alla stessa aria, che quindi aumenta la sua percentuale di umidità relativa perdendo contemporaneamente parte del suo calore, e quindi abbassando la sua temperatura.

In termini energetici la riduzione di temperatura dell'aria non comporta una variazione del contenuto entalpico, in quanto la riduzione di energia sensibile (temperatura dell'aria) è compensata con l'aumento di vapor acqueo assorbito, da ciò ne deriva il concetto di raffrescamento adiabatico; processo che avviene a entalpia costante del fluido.

La Figura 4.1 mostra il processo di raffrescamento evaporativo sul diagramma psicrometrico. L'aria in ingresso (punto A) si è umidificata (punto B) e contemporaneamente raffreddata (punto C). Questo raffreddamento è tanto più sensibile quanta più acqua è in grado l'aria di fare evaporare per raggiungere la saturazione e quindi quanto più quest'ultima è secca inizialmente.

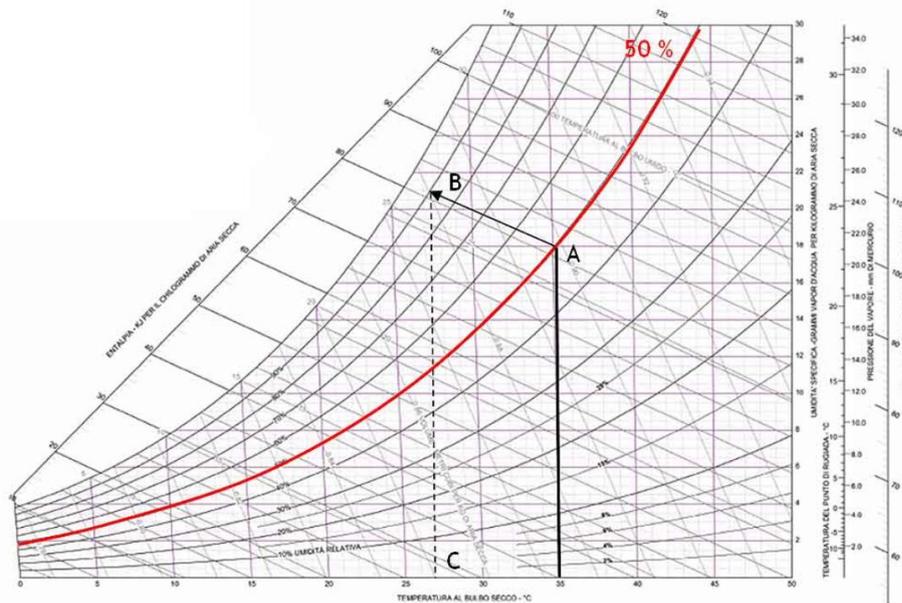


Figura 4.1-Raffrescamento adiabatico

Le apparecchiature di raffrescamento evaporativo sono costruite per utilizzare al meglio questo principio: raffreddare l'aria esterna umidificandola e quindi inviarla all'interno degli

edifici che percepiranno come effetto un flusso d'aria più o meno fredda rispetto all'esterno in funzione della temperatura e dell'umidità dell'aria esterna.

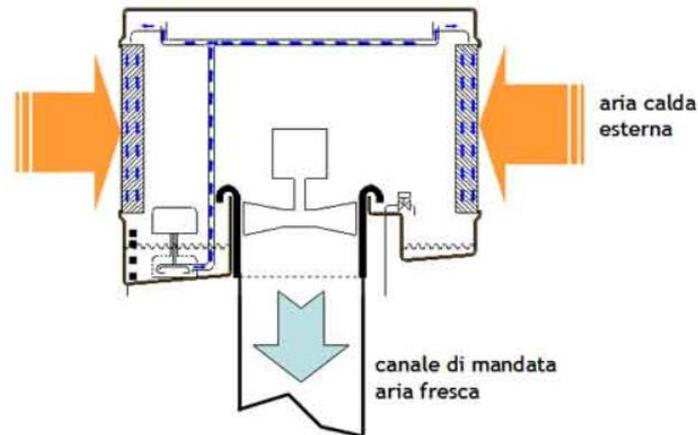


Figura 4.2-Schema Raffreddamento evaporativo [2, Sitografia]

4.1.2 Efficienza del sistema

L'effetto di raffrescamento ottenibile non può essere paragonato ad un sistema di condizionamento "tradizionale" ottenuto per mezzo di macchinari che producono un effetto di raffreddamento utilizzando un fluido refrigerante in un circuito chiuso. Il raffrescamento evaporativo, come già detto, dipende in buona parte:

- dalle condizioni di temperatura e U.R. dell'aria esterna, che viene trattata ed inviata all'interno dell'edificio;
- dal grado di saturazione ottenibile dalla macchina di raffrescamento utilizzata. Maggiore è la capacità di saturazione, maggiore sarà il raffreddamento dell'aria in uscita dall'apparecchio verso il locale da raffrescare.

Una possibile criticità che il raffreddamento evaporativo può dover affrontare è quando, durante il periodo estivo, possono presentarsi giornate molto calde e afose. Normalmente all'aumentare della temperatura dell'aria, la sua umidità relativa in percentuale diminuisce, in quanto l'aria ha una maggiore capacità di assorbimento del vapore acqueo. Quindi nelle ore più calde della giornata si hanno le percentuali di U.R. più basse. La Figura 4.3 mostra le umidità relative e le temperatura misurate a Milano nel mese di luglio. In corrispondenza

delle giornate più calde le umidità relative sono più contenute rispetto a giornate con temperature più miti.

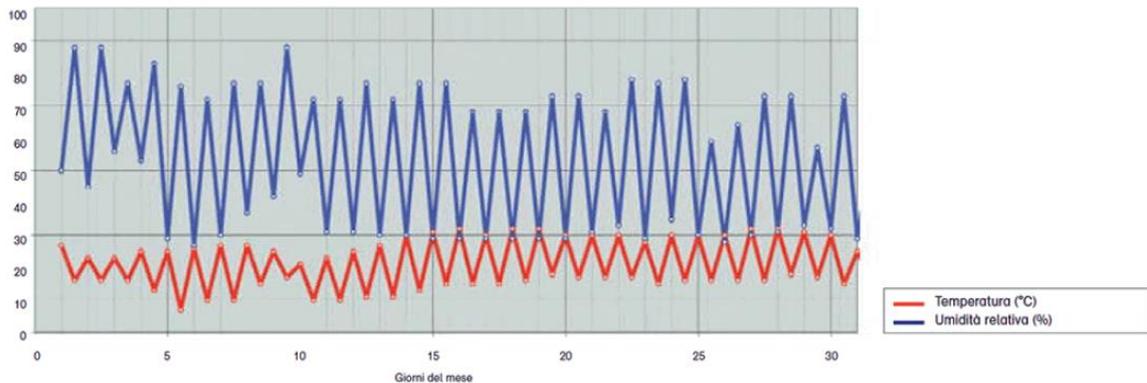


Figura 4.3-Andamento condizioni esterne [2, Sitografia]

Alcune giornate possono comunque essere particolarmente calde e afose. In questo caso il metodo del raffreddamento evaporativo trova grandi difficoltà ed è meno efficiente, poiché non potendo aumentare l'umidità dell'aria esterna, già di per sé molto umida, non può garantire un benessere termo-igrometrico accettabile all'interno dell'edificio. Bisogna però considerare come le persone percepiscono la combinazione di temperatura e umidità al variare di entrambe.

Il diagramma di Stedman esprime il concetto di "calore percepito", mettendo in relazione i valori di temperatura e umidità relativa dell'aria, l'intersezione di questi due parametri genera una percezione da parte di una persona media, simile ad una temperatura dell'aria più elevata. Tanto è maggiore l'umidità nell'aria, tanto maggiore sarà la temperatura percepita. Inoltre, il diagramma fornisce un ulteriore elemento significativo: man mano che la temperatura dell'aria diminuisce, diminuisce anche l'influenza dei valori di umidità sulla percezione. Pertanto, se il processo di raffreddamento evaporativo è in grado, anche nelle giornate più calde e afose, di fornire una temperatura dell'aria di immissione inferiore ai 27°C, l'aumento di umidità generato dalla trasformazione sarà del tutto trascurabile ai fini del comfort ambientale. Nelle fresche giornate primaverili e autunnali l'umidità dell'aria può essere anche molto alta, ma questa non influisce sul benessere grazie alla bassa temperatura dell'aria.

4.2 INTRCOOLL

Per migliorare il microclima estivo all'interno di un locale di grandi dimensioni e raggiungere un adeguato livello di benessere occorre ventilare l'ambiente con aria raffreddata e garantire ricambi d'aria nuova sufficienti per neutralizzare tutti gli apporti di calore.

Il rinnovo continuo dell'aria dell'ambiente impedisce l'accumulo di calore all'interno dell'edificio ed evita l'eccessivo aumento della temperatura interna.

Il rinnovo dell'aria consente, inoltre, di migliorare il livello di igiene ambientale, per smaltire eventuali odori e garantire un migliore benessere termo-igrometrico, condizione fondamentale per migliorare la salute e produttività delle persone presenti.

Il terminale Intrcooll, adottato nella serra, raffredda l'aria riducendo il calore sensibile in essa contenuto.

La riduzione del calore sensibile è dovuta al processo di evaporazione dell'acqua che entra in contatto con l'aria trattata: l'aria calda prelevata dall'esterno passa attraverso pannelli in alluminio marine-grade bagnati d'acqua cedendo parte del suo calore durante il processo di evaporazione dell'acqua ed abbassando la sua temperatura. Questo metodo può essere utilizzato sia per il raffreddamento adiabatico che per l'umidificazione dell'aria.

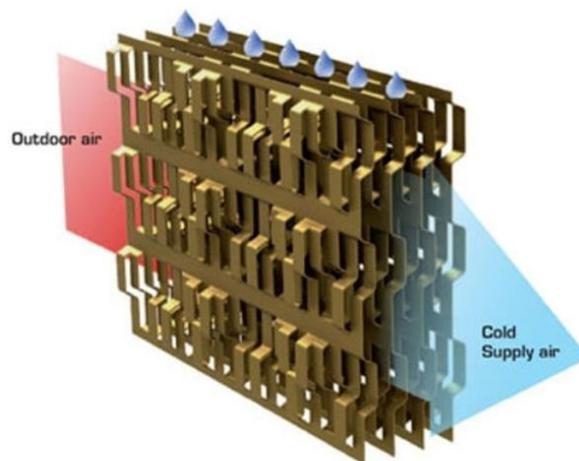


Figura 4.4-Pannello in alluminio marine-grade [6, Sitografia]

Un ventilatore, incorporato nel terminale, provvede ad immettere in ambiente l'aria raffreddata.

L'aria proveniente dai raffrescatori tende a scendere verso il pavimento e a spingere in alto quella più calda. La zona di influenza che ci interessa è quella dove sono collocati i fotobioreattori, quindi il volume da raffrescare è quello compreso tra il pavimento e una quota di diffusione dell'aria raffrescata.

4.2.1 Componenti Chiave

- Sistema evaporativo costituito da una sorta di pannello in alluminio marine-grade in grado di trattenere l'acqua, il rivestimento è resistente alla corrosione e garantisce durabilità al sistema.
- Filtri in grado di trattenere le impurezze contenute nell'aria esterna ed evitare che possano entrare nel sistema.
- Scambiatore di calore alimentato con acqua fredda per ottenere un raffreddamento molto potente nelle giornate più calde.
- Due batterie calde per riscaldare l'aria esterna nelle giornate invernali.
- Ventilatori assiali (EC) a velocità variabile per immettere l'aria all'interno dell'edificio dopo essere stata trattata.
- Pompa ad immersione di ricircolo dell'acqua con pale radiale.
- Sterilizzatore di acqua ad ozono per eliminare tutti i batteri e i virus che si generano nell'acqua.
- Sensore idrico per il monitoraggio costante della qualità dell'acqua.

Come detto in precedenza il processo del raffreddamento evaporativo può presentare criticità durante la stagione estiva, quando la temperatura e l'umidità sono relativamente alte. Pertanto, per rendere efficiente il sistema anche in queste condizioni Intracool sfrutta un raffrescamento evaporativo indiretto e diretto a due fasi. La prima fase indiretta utilizza acqua fredda rimessa in circolazione per pre-raffrescare l'aria prelevata dall'ambiente esterno. L'aria in uscita dallo scambiatore di calore presenta una temperatura di bulbo secco e di bulbo umido inferiore rispetto all'aria esterna mantenendo la stessa umidità specifica che presentava all'ingresso. Nella seconda fase di raffrescamento diretto, è possibile refrigerare ulteriormente l'aria per mezzo del sistema di raffrescamento evaporativo.

4.2.2 Schema Funzionale

4.2.2.1 Diretto

Tra i raffreddamenti evaporativi quello diretto è il metodo più elementare. Il flusso d'aria, proveniente dall'esterno, viene a contatto con la superficie tampone in alluminio marine-grade bagnata. L'aria attraversa la superficie e assorbe il vapor acqueo con conseguente umidificazione e raffreddamento. In seguito, il vapor acqueo ancora contenuto nello strato limite torna nel suo stato naturale saturo e viene raccolto nel contenitore (sump) posto sotto la superficie tampone. Il flusso di aria cede calore sensibile all'acqua, permettendone il cambiamento di fase, e come conseguenza riduce la sua temperatura.

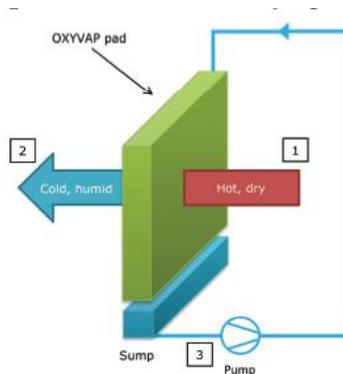


Figura 4.5-Schema raffreddamento evaporativo diretto [11, Bibliografia]

1. Aria calda in ingresso.
2. Aria fresca e umida in uscita.
3. Acqua fredda riutilizzata per bagnare la superficie metallica tampone.

Teoricamente la più bassa temperatura raggiungibile con questo metodo è la temperatura di bulbo umido dell'aria in ingresso, in realtà è leggermente più alta a causa dell'efficienza di saturazione della superficie tampone.

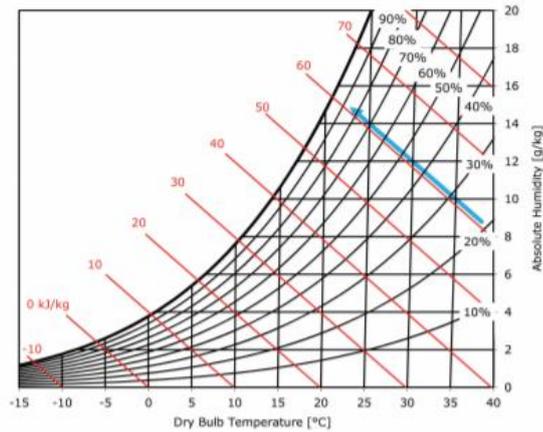


Figura 4.6-Raffreddamento evaporativo diretto [11, Bibliografia]

4.2.2.2 Indiretto

Il raffrescamento evaporativo diretto produce non solo aria raffreddata in prossimità della sua temperatura di bulbo umido ma anche acqua refrigerata, poiché il vapor acqueo che condensa nel contenitore è in equilibrio termodinamico con il flusso d'aria che ha attraversato il pannello (prossimo alla temperatura di bulbo umido). Inoltre, IntrCooll sfrutta anche uno scambiatore aria-acqua per preraffreddare l'aria prelevata dall'esterno.

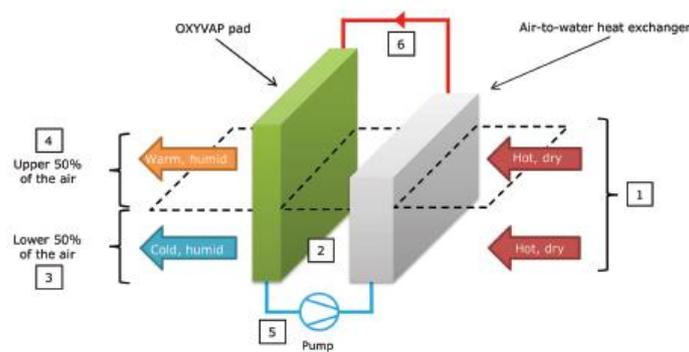


Figura 4.7-Schema raffreddamento evaporativo diretto-indiretto [11, Bibliografia]

1. Aria calda e secca in ingresso.
2. Aria preraffreddata.
3. Aria fredda e umida.
4. Aria calda e umida.
5. Acqua refrigerata mandata allo scambiatore aria-acqua.
6. Acqua calda ritorna al pannello OXYVAP.

L'acqua refrigerata viene mandata allo scambiatore per preraffreddare l'aria esterna prima che giunga al pannello OXYVAP, la trasformazione in questione è chiamata raffreddamento evaporativo indiretto.

In seguito, l'aria subisce lo stesso trattamento del raffreddamento evaporativo diretto: passa attraverso il pannello dove viene raffreddata e umidificata, nel frattempo l'acqua bagna la superficie metallica ed avviene uno scambio di calore con l'aria che attraversa il pannello, come descritto nel paragrafo del raffreddamento evaporativo diretto.

Il processo di raffreddamento non scambia energia con l'ambiente esterno, per questo viene definito adiabatico. La combinazione del raffreddamento evaporativo diretto dell'aria e del preraffreddamento dell'aria esterna tramite uno scambiatore porta la temperatura dell'aria a subire una sostanziale riduzione della sua temperatura.

A fine processo la quota parte dell'aria che presenta una entalpia media superiore a quella dell'aria aspirata viene direttamente espulsa mentre la parte di aria raffreddata e umidificata viene mandata nell'ambiente da climatizzare. La Figura 4.8 illustra il processo di raffreddamento evaporativo indiretto e diretto dell'IntrCooll.

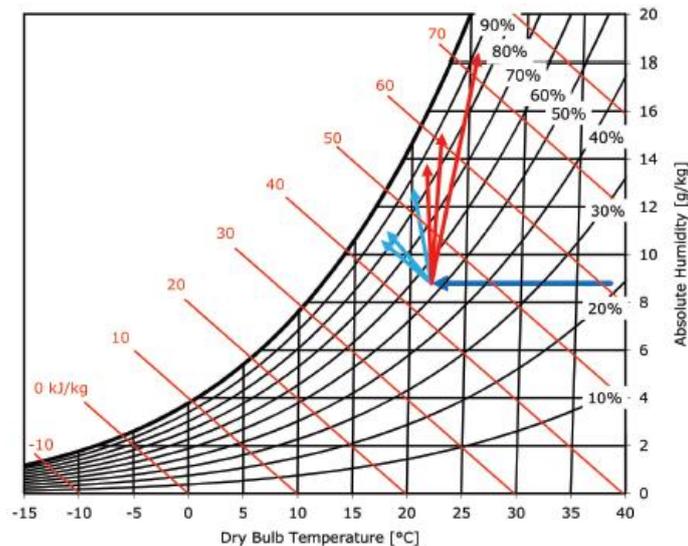


Figura 4.8-Raffreddamento evaporativo indiretto [11, Bibliografia]

- La linea blu scuro rappresenta il pre-raffreddamento dell'aria a umidità specifica costante.
- Le linee blu chiaro rappresentano il passaggio attraverso il pannello OXYVAP.
- Le linee rosse rappresentano l'aria passante attraverso la parte superiore del pannello e che verrà espulsa.

La Figura 4.9 mostra il classico raffreddamento evaporativo diretto (1-3-2), raffrescamento a singola fase, e quello a doppia fase, indiretto e diretto (4-5-6). Partendo dalle stesse condizioni iniziali quest'ultimo metodo sfrutta la trasformazione 4 per raffreddare l'aria grazie allo scambio termico con l'acqua refrigerata senza cambiarne l'umidità specifica. In seguito, avviene il raffreddamento evaporativo (5) con umidificazione e raffreddamento ulteriore dell'aria. Il raffreddamento a singola fase attua subito il raffreddamento evaporativo diretto (1), quindi in caso di giornate calde e afose quest'ultimo metodo trova forti limitazioni e basse efficienze. Il raffrescamento evaporativo a due fasi può quindi garantire un punto di immissione dell'aria in ambiente interno a temperatura e umidità relativa inferiore rispetto al raffrescamento a singola fase e può essere impiegato anche in condizioni ambientali umide e tropicali garantendo lo stesso un benessere ottimale all'interno dei locali.

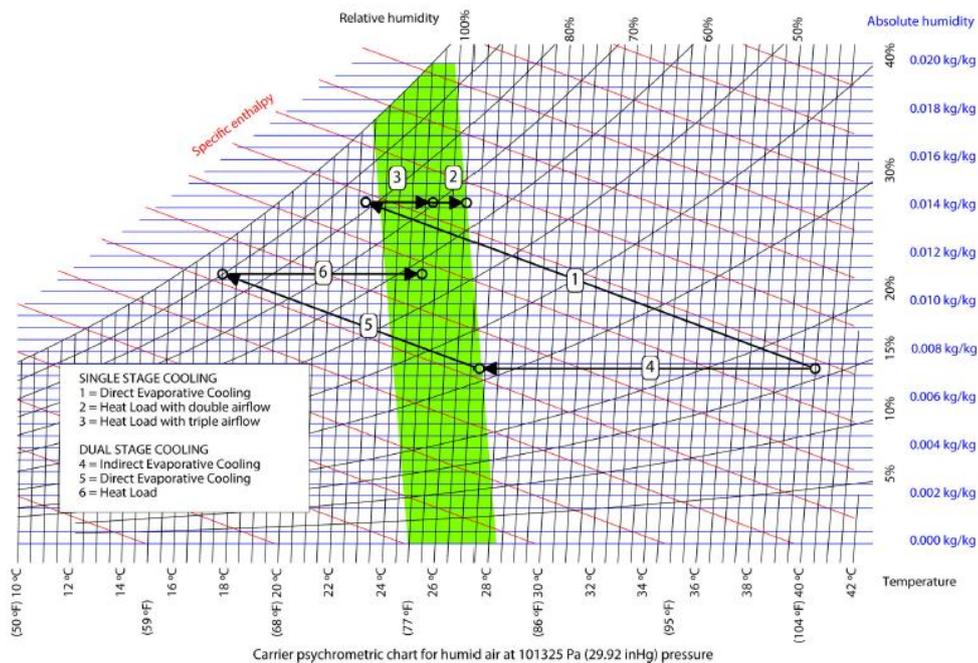


Figura 4.9-Raffreddamento evaporativo diretto-indiretto sul diagramma psicrometrico [6, Sitografia]

4.2.3 Specifiche elettriche

Alimentazione elettrica: trifase, 380 V- 400 V, CA 50 Hz.

Potenza nominale 3.07 kW.

Intracool dispone di un inverter in grado di variare la frequenza e la tensione di alimentazione del motore asincrono trifase a cui è collegato il ventilatore assiale che immette l'aria in ambiente.

Il risparmio energetico ottenibile con gli "inverter" si riscontra in quasi tutti le applicazioni destinate ai settori industriale e civile ma è particolarmente rilevante nel caso di macchine quali pompe centrifughe e ventilatori. Un motore asincrono trifase collegato direttamente alla rete, per sua natura girerà costantemente alla velocità nominale.

Nel caso in cui fosse utilizzato per azionare una pompa o un ventilatore e le esigenze dell'impianto richiedessero di operare a portata variabile, sarebbe necessario prevedere un sistema di regolazione meccanico per controllare la portata del fluido; la regolazione della portata dei fluidi è ottenibile normalmente attraverso l'ausilio di dispositivi di tipo meccanico/idraulico a perdita di carico: valvole di strozzamento, serrande, sistemi di bypass. Utilizzando un inverter per comandare il motore, è possibile regolare la portata di aria immessa in ambiente agendo direttamente sulla velocità del motore attraverso la variazione della frequenza.

Se si considera un ciclo produttivo che richieda alla pompa o al ventilatore di dimezzare la portata, automaticamente l'inverter dimezzerà la velocità del motore e, ricordando che la potenza richiesta dal carico varia con il cubo della velocità, l'assorbimento energetico scenderebbe dal 100% a solo un ottavo di quello nominale.

La Figura 4.10 mostra lo schema elettrico adottato: l'inverter necessita in ingresso una corrente continua e, visto che la rete di alimentazione è in corrente alternata, viene inserito un raddrizzatore per convertire la corrente.

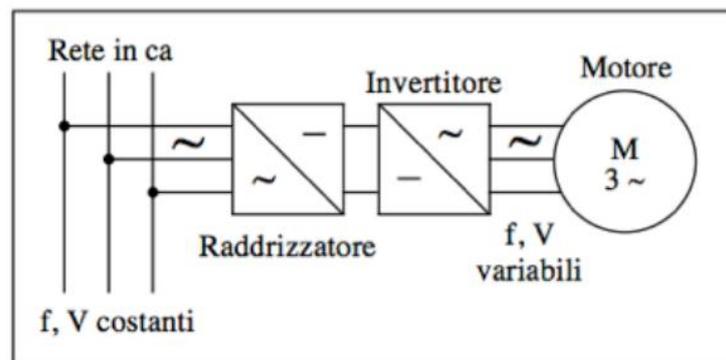


Figura 4.10-Schema impianto elettrico

L'inverter regola in modo proporzionale frequenza e tensione sulla base del comando esterno impartito dall'utilizzatore del sistema (ventilatore), in questo modo consente di sfruttare appieno le caratteristiche del motore mantenendo costante il flusso magnetico e fa sì che la coppia rimanga costante all'albero del motore in quasi tutto l'arco della sua variazione di velocità.

Inoltre, l'utilizzo dell'inverter permette, oltre che di rallentare la velocità nominale del motore, anche di aumentarla oltre i valori di targa generando frequenze maggiori di 50 Hz. Quando l'inverter raggiunge la frequenza nominale contemporaneamente raggiunge la tensione della rete di alimentazione. Dopo tale punto è ancora possibile incrementare la frequenza per ottenere velocità maggiori, ma non è più possibile aumentare la tensione. L'inverter, infatti, non può incrementare la tensione ad un valore più alto di quello con cui viene alimentato e anche se fosse possibile si danneggerebbero gli avvolgimenti del motore. Aumentando la frequenza oltre a quella di targa, l'inverter non rispetta più la legge di proporzionalità fra f e V , entrando nella zona di indebolimento del flusso magnetico, che comporta un progressivo calo della coppia motrice per il motore. [3, Bibliografia]

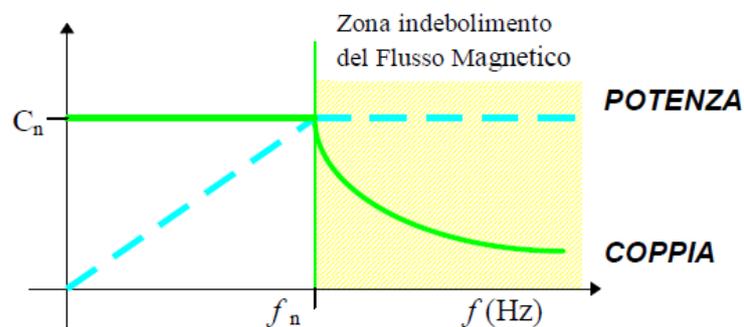


Figura 4.11-Andamento potenza e coppia in funzione frequenza [3, Bibliografia]

I benefici ed i vantaggi che si possono ottenere con l'utilizzo di un inverter possono essere così riassunti:

- risparmio di energia considerevole, in funzione delle condizioni di carico, quando la corrente del motore scende almeno del 30% rispetto a quella nominale o il $\cos\phi$ sia inferiore al 50%;
- risparmio sulla potenza installata e in tutte le apparecchiature che stanno a monte del variatore di velocità (es. trasformatori, gruppi elettrogeni, contattori, ecc.);

- risparmio sugli oneri di gestione e manutenzione;
- riduzione della corrente di spunto e delle cadute di tensione in linea;
- eliminazione dei colpi d'ariete e delle sovrappressioni;
- riduzione del "rumore" nei circuiti idraulici.

4.2.4 Dimensioni unità

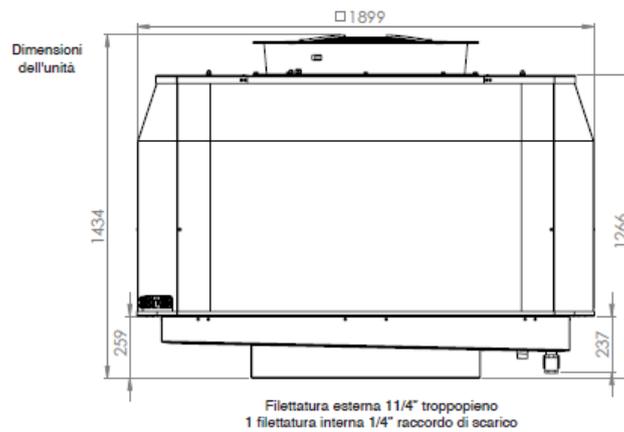


Figura 4.12-Vista laterale del terminale [6, Sitografia]

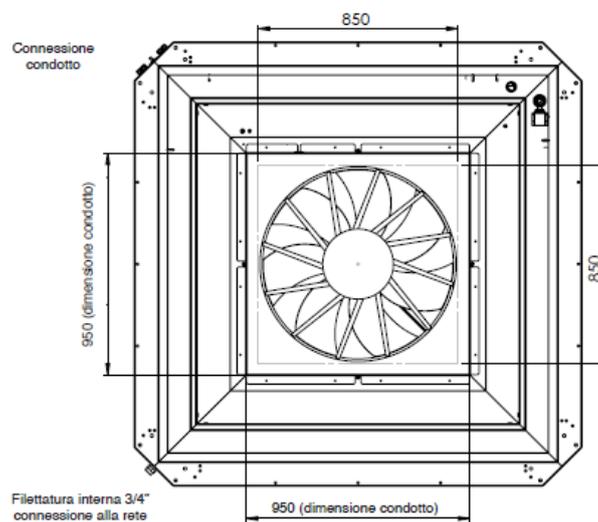


Figura 4.13-Vista dall'alto del terminale [6, Sitografia]

5. DIMENSIONAMENTO IMPIANTO

Per il dimensionamento dell'impianto si sono valutati i carichi termici da soddisfare. La scelta sulla tecnologia da adottare è stata fatta in base alle condizioni climatiche esterne e alle richieste termo-igrometriche da garantire all'interno della serra.

Il terminale IntrCool è in grado di assicurare le condizioni richieste sia nella stagione estiva sia in quella invernale.

5.1 CASO ESTIVO

Il caso estivo è quello più complicato da gestire per gli elevati carichi termici e per la bassa temperatura da garantire all'interno della struttura.

Tramite il seguente bilancio termico è stato possibile ricavare il massimo carico termico gravante sulla serra:

$$Q_i + Q_t + Q_v + Q_s + Q_{raffr} = 0 \quad [W]$$

- Q_i : carichi interni generati da occupanti, illuminazione ed altre apparecchiature;
- Q_s : apporto solare attraverso le superfici vetrate;
- Q_t : carichi interni trasmessi attraverso le pareti esterne, il tetto e le superfici vetrate;
- Q_v : carichi termici legati alla ventilazione e alle infiltrazioni di aria esterna;
- Q_{raffr} : potenza da sottrarre per raffrescare l'ambiente.

I carichi che devono essere bilanciati sono quelli di ventilazione, trasmissione attraverso l'involucro, gli apporti solari e i carichi interni. La componente vetrata è costituita in plexiglass pertanto al fine di ridurre, per quanto possibile questo apporto, si è optato per la scelta di un materiale con un valore di trasmittanza di energia solare (g) contenuto, 0.7.

I carichi interni includono unicamente quelli generati dall'impianto di illuminazione; il contributo fornito dalle apparecchiature interne e dagli occupanti sono trascurabili. I fotobioreattori presenti nella serra gestiscono direttamente la temperatura dell'acqua presente al loro interno e producono un contributo di calore di modesta entità, mentre il contributo delle persone è nulla poiché la serra è totalmente automatizzata e non necessita della presenza diretta di operai specializzati.

Le alghe vengono poste nei FBR dove crescono in presenza di luce, pertanto nelle ore notturne è necessario mantenere acceso l'impianto di illuminazione per permettere che

avvenga la reazione di fotosintesi e talvolta anche nelle giornate nuvolose si rende necessario non spegnere completamente tutto l'impianto, nel caso in cui il contributo solare non sia sufficiente.

Il grafico in Figura 5.1 mostra come viene sfruttato l'impianto di illuminazione durante una giornata nella stagione estiva.

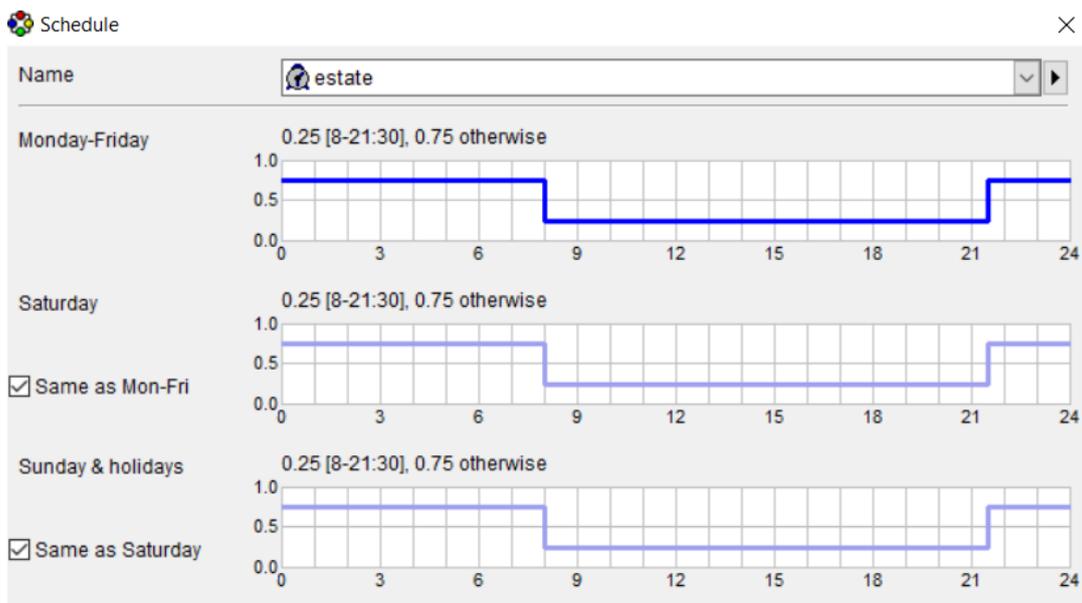


Figura 5.1-Schedulazione impianto elettrico

Il sistema di illuminazione adottato è composto da plafoniere a LED che arriva a fornire un'efficienza luminosa pari a 200 lumen/Watt, ciò comporta un netto risparmio energetico sui consumi.

Durante la notte l'impianto, come già detto, rimane acceso per permettere il processo chimico della fotosintesi.

Il carico di ventilazione viene gestito direttamente dal terminale, garantendo un ricambio d'aria pari a 0,2 vol/h.

DIAGRAMMA PSICROMETRICO
($P = 101,325 \text{ kPa}$)

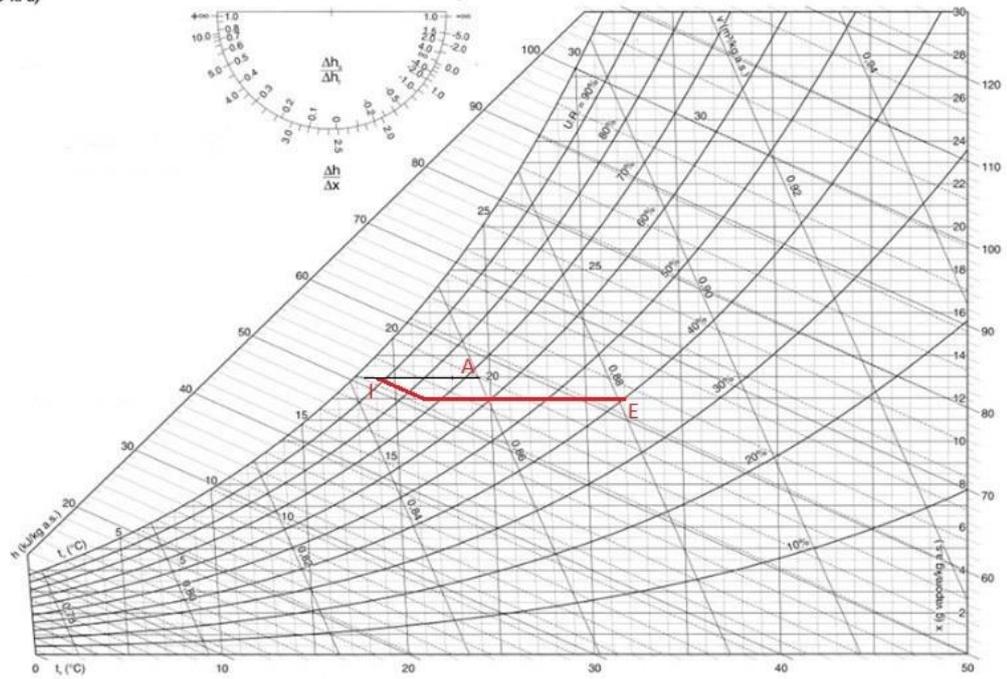


Figura 5.2-Caso estivo

Le condizioni esterne di progetto estive sono $T=32^{\circ}\text{C}$ e $UR=40\%$.
La temperatura di immissione dell'aria è fissata a 19°C .

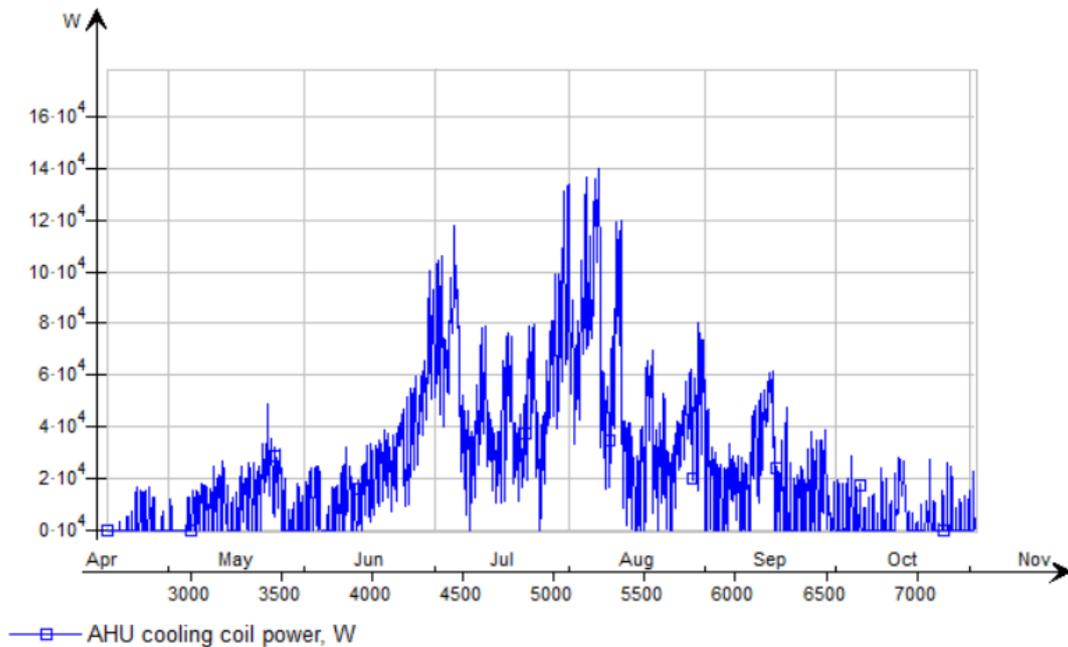


Figura 5.3-Andamento potenza termica di raffreddamento senza l'integrazione di PCM nel sistema

La potenza termica da garantire nelle condizioni più critiche nel caso estivo è pari a 145 kW

$$Q = G_i * (h_i - h_A) \quad [\text{W}]$$

Ne consegue che la portata di aria da immettere in ambiente è pari a:

$$G_i = \frac{Q}{(h_i - h_A)} = 36,25 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Dove:

- Q : potenza termica di raffrescamento;
- h_i : entalpia dell'aria immessa in ambiente;
- h_a : entalpia dell'aria in ambiente.

Ogni terminare è in grado di immettere una portata di aria di progetto pari a $5,1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$, e quindi necessario installare 8 Intrcooll. Una parte della serra subirà una futura espansione con l'installazione di ulteriori fotobioreattori, pertanto in fase di progettazione si predispone l'installazione di un Intrcooll in più.

Nella Figura 5.4 viene illustrato il funzionamento nel caso estivo durante le giornate secche, l'aria esterna, dopo essere stata filtrata, entra nel sistema e viene raffrescata tramite un raffreddamento diretto per poi essere mandata in ambiente grazie alla presenza del ventilatore assiale, mentre l'aria recuperata dall'ambiente viene espulsa verso l'esterno.

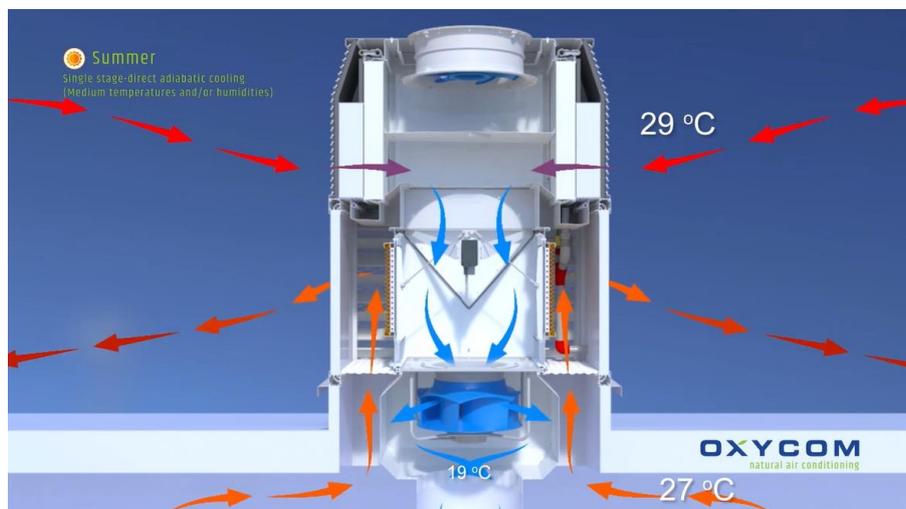


Figura 5.4- Funzionamento impianto nelle giornate estive [6, Sitografia]

Invece, in caso di giornate estive particolarmente calde e afose, oltre al raffrescamento diretto viene sfruttato anche quello indiretto. Tramite l'ausilio di uno scambiatore l'aria esterna viene raffrescata sfruttando l'acqua proveniente dal processo di raffrescamento evaporativo diretto, la trasformazione avviene a umidità specifica costante. L'aria in uscita dallo scambiatore di calore presenta una temperatura inferiore rispetto all'aria esterna. Nella seconda fase del processo avviene il consueto raffrescamento diretto che permette di ridurre ulteriormente la temperatura dell'aria a valori molto bassi. Anche in questa circostanza l'aria prelevata dall'ambiente viene espulsa totalmente all'esterno.

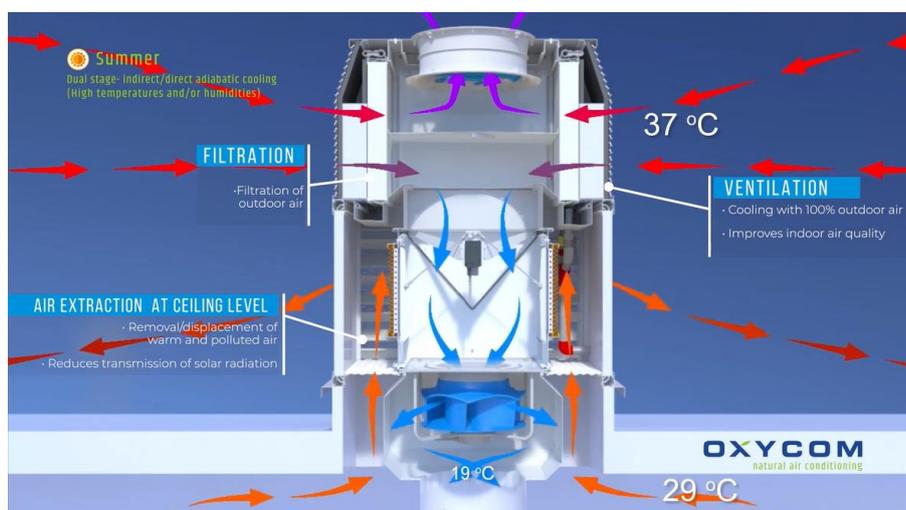


Figura 5.5- Funzionamento impianto nelle giornate estive afose [6, Sitografia]

Il terminale adottato, sfruttando il raffreddamento evaporativo, varia la sua efficienza in base alle condizioni climatiche esterne, nel caso di giornate relativamente umide il processo evaporativo non riesce a raffreddare sufficientemente la temperatura dell'aria fino al valore di temperatura di immissione di progetto.

Pertanto, è necessario integrare nell'impianto una serie di batterie di raffreddamento alimentate ad acqua.

Utilizzando il software fornito dall'azienda produttrice di Intrcooll è possibile, una volta inserito il luogo di installazione dei terminali, ottenere una tabella oraria nella quale vengono riassunti la temperatura che è in grado di raggiungere il raffreddamento evaporativo in base alle condizioni esterne di temperatura e umidità.

L'analisi fatta per il caso in esame si è concentrata nella stagione estiva (fine maggio-inizio giugno).

| Temperatura aria esterna | Umidità relativa | Durata | Temperatura uscita Intrcooll | Frequenza relativa | Frequenza cumulata |
|-----------------------------|---------------------|--------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| [°C] | [%] | [ore] | [°C] | [%] | [%] |
| 20,6 | 36 | 44 | 10,8 | 1,7 | 1,7 |
| 22,5 | 34 | 259 | 11,8 | 10,0 | 11,7 |
| 28,5 | 17 | 207 | 12,1 | 8,0 | 19,7 |
| 20,5 | 49 | 134 | 13,0 | 5,2 | 24,8 |
| 24,5 | 35 | 3 | 13,3 | 0,1 | 24,9 |
| 22,5 | 48 | 70 | 14,4 | 2,7 | 27,6 |
| 26,5 | 34 | 227 | 14,9 | 8,8 | 36,4 |
| 28,4 | 32 | 183 | 15,7 | 7,1 | 43,4 |
| 24,5 | 48 | 94 | 16,0 | 3,6 | 47,1 |
| 20,5 | 69 | 2 | 16,1 | 0,1 | 47,1 |
| 30,5 | 31 | 89 | 16,9 | 3,4 | 50,6 |
| 22,4 | 68 | 203 | 17,6 | 7,8 | 58,4 |
| 26,5 | 49 | 103 | 17,9 | 4,0 | 62,4 |
| 32,5 | 32 | 18 | 18,6 | 0,7 | 63,1 |
| 28,5 | 47 | 115 | 19,1 | 4,4 | 67,5 |
| 24,4 | 67 | 176 | 19,4 | 6,8 | 74,3 |
| 20,5 | 89 | 41 | 19,4 | 1,6 | 75,9 |
| 34,3 | 31 | 1 | 19,5 | 0,0 | 75,9 |
| 36,2 | 27 | 91 | 19,6 | 3,5 | 79,4 |
| 30,4 | 46 | 150 | 20,4 | 5,8 | 85,2 |
| 20,4 | 98 | 10 | 20,4 | 0,4 | 85,6 |
| 26,3 | 66 | 82 | 20,9 | 3,2 | 88,7 |
| 22,4 | 88 | 78 | 21,2 | 3,0 | 91,8 |
| 32,3 | 44 | 3 | 21,4 | 0,1 | 91,9 |
| 22,0 | 98 | 99 | 22,0 | 3,8 | 95,7 |
| 34,0 | 42 | 32 | 22,2 | 1,2 | 96,9 |
| 28,4 | 64 | 60 | 22,4 | 2,3 | 99,2 |
| 24,1 | 86 | 5 | 22,4 | 0,2 | 99,4 |
| 30,2 | 63 | 15 | 23,7 | 0,6 | 100,0 |

Tabella 9- Intrcooll

La terza colonna della tabella rappresenta per quante ore si ripetono le condizioni esterne di temperatura e umidità relativa nell'arco della stagione estiva, in base a questi due valori il terminale è in grado di portare la temperatura dell'aria ad un valore riportato nella colonna "Temperatura uscita Intrcooll". Nel caso in cui la temperatura sia superiore a quella di immissione dell'aria in ambiente stabilita è necessario raffreddarla ulteriormente per mezzo di una batteria ad acqua, posta tra il terminale Intrcooll e il punto di immissione.

La batteria è dimensionata utilizzando un metodo statistico: la frequenza cumulata. Inizialmente si calcolano le frequenze relative: per quante ore rispetto all'intera stagione

estiva si ripetono le medesime condizioni esterne, e questo viene ripetuto per ogni temperatura di uscita dall'Intrcooll.

La frequenza cumulata consiste nel sommare la frequenza relativa di ogni evento (Temperatura uscita Intrcooll) alle frequenze relative degli eventi che lo precedono.

Quando la frequenza cumulata di un evento raggiunge almeno un valore pari al 95%, la corrispondente temperatura in uscita dal terminale viene presa come temperatura più sfavorevole.

Nel caso in esame la batteria viene dimensionata considerando come temperatura massima in uscita dall'Intrcooll pari a 22°C. Così facendo si evita di dimensionare la batteria per temperature che avranno luogo per poche ore durante l'estate ottimizzando così la progettazione senza rischiare di avere intervalli temporali significativi nei quali l'impianto non è in grado di garantire le condizioni di comfort interno richieste.

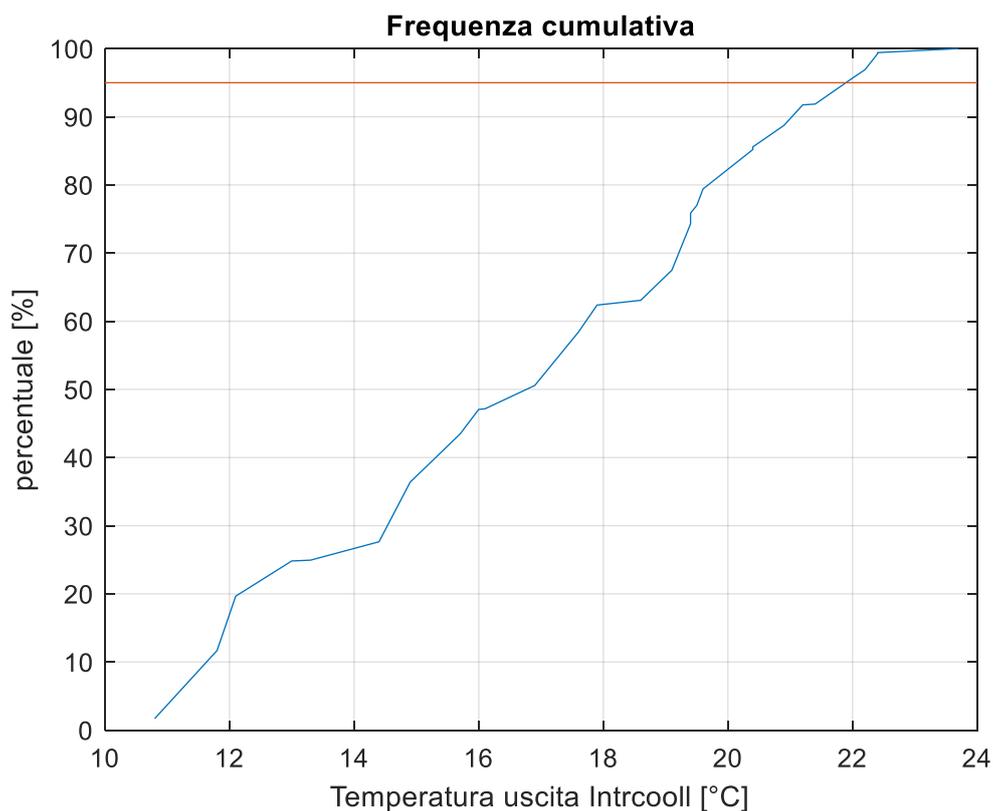


Figura 5.6-Andamento frequenza cumulata

La batteria fredda integrata ad ogni terminale sarà in grado di fornire una potenza di raffreddamento pari a:

$$Q = G_i * c_p * (T_i - T_{u,Intrcooll}) \quad [\text{W}]$$

Dove:

- G_i : portata d'aria di progetto immessa da ogni terminale;
- T_i : temperatura aria immissioni in ambiente (19°C);
- $T_{u,Intrcooll}$: temperatura in uscita dal terminale (22°C).

La potenza della batteria per ogni terminale risulta pari a: 15,3 kW.

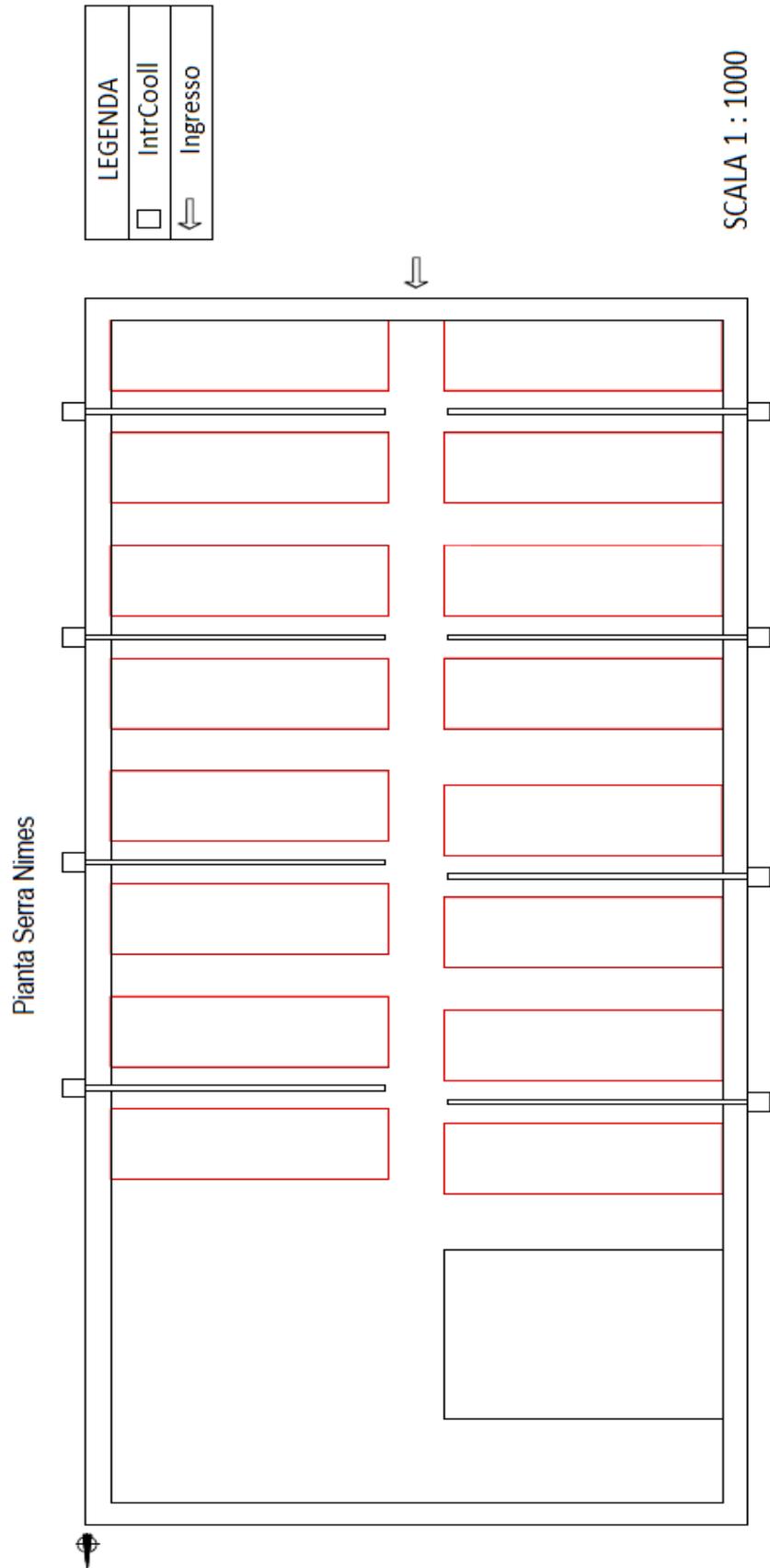


Figura 5.7-Schema funzionale pianta serra

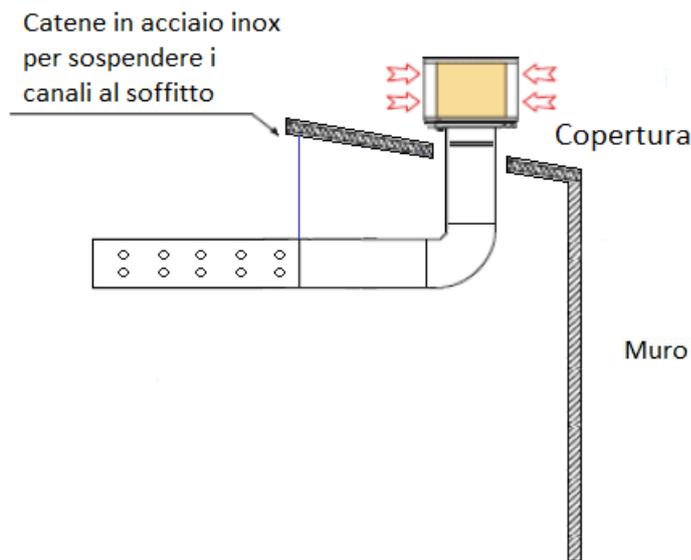


Figura 5.8-Vista laterale terminale di immissione

5.1.1 Ventilatore

All'interno del terminale adottato è presente un ventilatore assiale che provvede ad immettere in ambiente l'aria raffreddata.

L'immissione in ambiente avviene tramite un tubo microforato ($\varnothing = 800 \text{ mm}$) in acciaio inox.

L'applicazione di questa tipologia di rete di distribuzione fa sì che l'aria ambiente venga completamente coinvolta e miscelata nel giro di pochi minuti, consentendo un'estrema omogeneità delle temperature sia in senso orizzontale che verticale.

La portata di progetto che il terminale immette in ambiente è pari a $4,25 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, mentre, tenendo in considerazione le perdite concentrate, distribuite e le perdite di carico relative alla tipologia di diffusore scelto, la perdita di carico totale è pari a 120 Pa. La potenza del ventilatore è calcolata con la seguente formula:

$$W = \frac{p \cdot Q}{\eta} = 1000 \text{ W}$$

Dove:

- p : perdita di carico totale [Pa]

- Q : portata di aria espressa in $\frac{m^3}{s}$;
- η : rendimento.

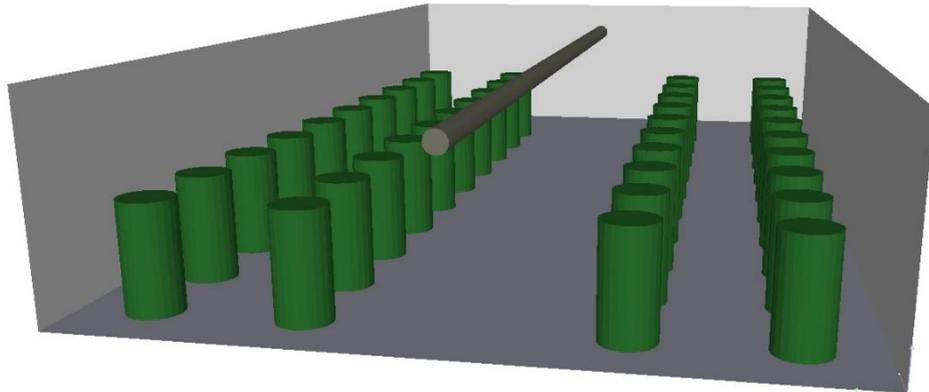


Figura 5.9-Modello 3d rappresentante la rete di distribuzione in una linea di produzione della serra (1) [Software Dialux]

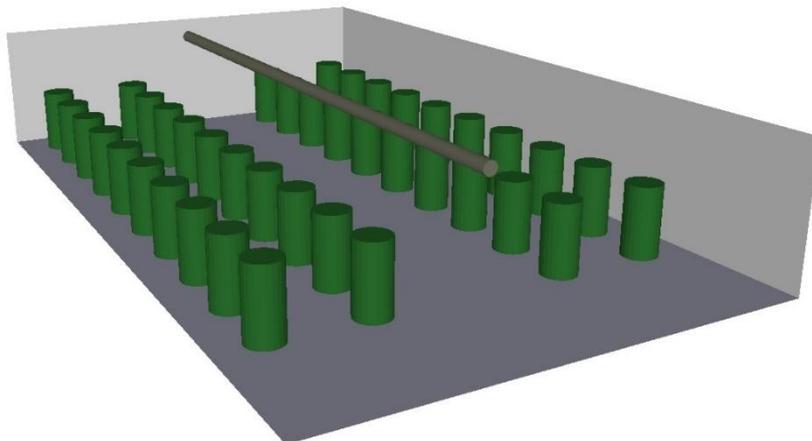


Figura 5.10-Modello 3d rappresentante la rete di distribuzione in una linea di produzione della serra (2) [Software Dialux]

5.2 CASO INVERNALE

Nella stagione invernale il fabbisogno termico richiesto per la serra si ottiene applicando il primo principio della termodinamica all'involucro. Il bilancio termico dell'aria racchiusa in un ambiente ad un dato istante è espresso dalla seguente equazione:

$$Q_d + Q_i + Q_v + Q_{risc} = 0 \text{ [W]}$$

- Q_d : potenza termica persa attraverso le pareti disperdenti e le superfici vetrate;
- Q_i : apporti interni gratuiti;
- Q_v : potenza termica dovuta alle portate d'aria di ventilazione ed infiltrazione;
- Q_{risc} : potenza termica da fornire attraverso i terminali.

Si considerano nulli tutti gli apporti interni. Ne consegue che la potenza termica da fornire bilancia la potenza termica persa per trasmissione e la potenza termica dovuta alle portate d'aria di ventilazione.

L'aria esterna, dopo essere stata filtrata, viene mescolata con quella proveniente dall'ambiente interno (portata ricircolata), la miscela che ne risulta dal processo di miscelamento, che è adiabatico, viene ulteriormente riscaldata da due batterie, alimentate da un fluido caldo, fino alla temperatura di immissione in ambiente pari a di 23°C.

Lo stato termodinamico a cui si porterà la miscela può essere ricavato applicando l'equazione di continuità ed il primo principio della termodinamica.

Bilancio di massa:

$$G_i = G_r + G_e \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Dove:

- G_i : portata di aria immessa in ambiente;
- G_r : portata di aria ricircolata;
- G_e : portata di aria esterna.

Bilancio di energia:

$$G_r * h_a + G_e * h_e = G_i * h_i \quad [J]$$

Dove:

- h_a : entalpia aria ambiente;
- h_e : entalpia aria esterna;
- h_m : entalpia aria miscelata.

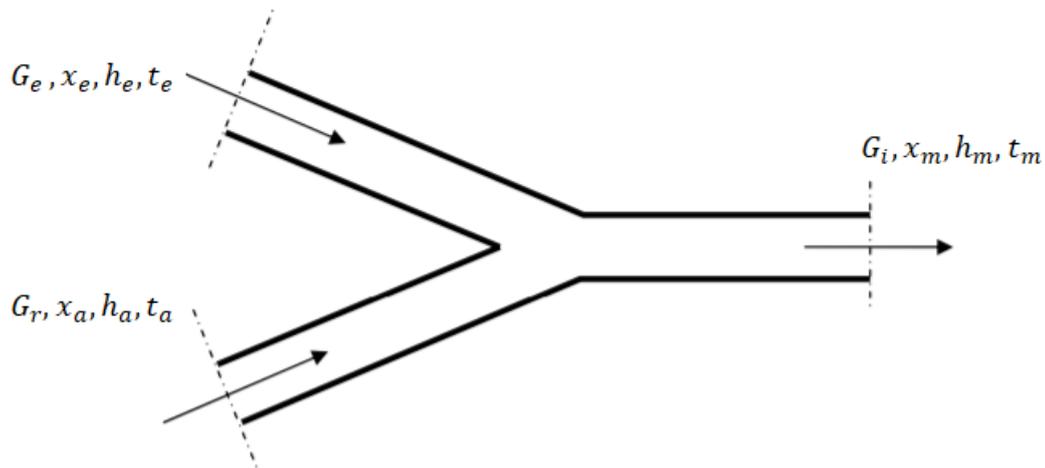


Figura 5.11-Miscelamento adiabatico

Sapendo le condizioni esterne (punto E) di temperatura e umidità relativa e quelle interne (punto A), si può dedurre che il punto di immissione si trova sulla congiungente dei punti E-A. Il punto di immissione si può ricavare risolvendo l'equazione di continuità e bilancio energetico, da cui si ottiene:

$$h_m = \frac{G_r * h_a + G_e * h_e}{G_r + G_e} \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

La portata di aria ricircolata è pari al 90% della portata di aria immessa.

Le condizioni della miscela si trovano sul segmento congiungente i punti rappresentativi delle condizioni interne e esterne; il punto di miscela sarà più vicino al punto rappresentativo della portata maggiore, ovvero quella ricircolata (condizioni ambiente).

Le condizioni esterne invernali di progetto (Nimes) sono $T=5^{\circ}C$, $UR=50\%$, mentre all'interno della serra la temperatura richiesta è pari a $18^{\circ}C$.

La temperatura di immissione dell'aria è fissata a $23^{\circ}C$.

In ogni terminale sono integrate due batterie calde, che riscaldano l'aria dal punto M fino al punto d'immissione in ambiente (I).

$$Q_{MI} = G_i * (h_i - h_m) \quad [\text{W}]$$

Dove:

- G_i : portata di immissioni di progetto ($5,1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$)
- Q_{MI} : potenza termica fornita dalla batteria calda
- h_i : entalpia aria immissione

Ogni batteria calda fornisce una potenza pari a 17 kW.

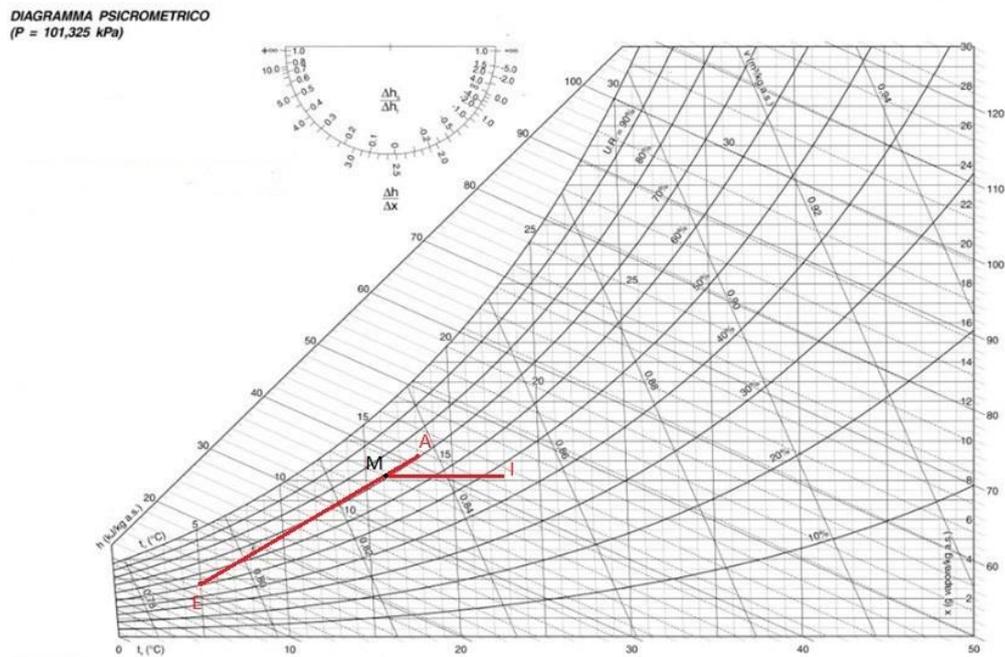


Figura 5.12-Caso invernale

L'impianto di condizionamento adottato nella serra è un impianto a portata variabile (VAV, *Variable Air Volume*), perciò è in grado di adattarsi alla variazione del fabbisogno di riscaldamento richiesto variando la portata immessa in ambiente.

La velocità angolare del ventilatore presente nel terminale è regolata da un inverter che, modificando la frequenza e la tensione di alimentazione del motore asincrono trifase, è in grado di agire sulla portata di aria immessa.

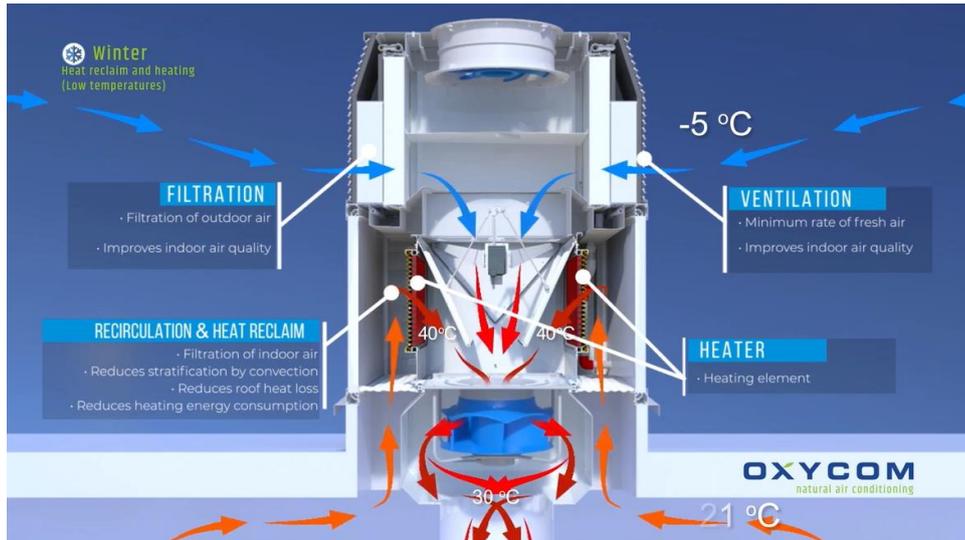


Figura 5.13-Funzionamento impianto caso invernale [6, Sitografia]

5.3 PRIMAVERA/AUTUNNO

Le stagioni primaverile e autunnale presentano condizione esterne miti, pertanto è sufficiente adottare un *free cooling* per raffrescare l'edificio e garantire un ambiente interno salubre.

L'aria esterna viene semplicemente filtrata e direttamente immessa in ambiente. L'aria interna estratta viene interamente espulsa, così facendo si può garantire un continuo rinnovo di aria pulita dall'esterno con conseguente maggiore benessere all'interno della serra.

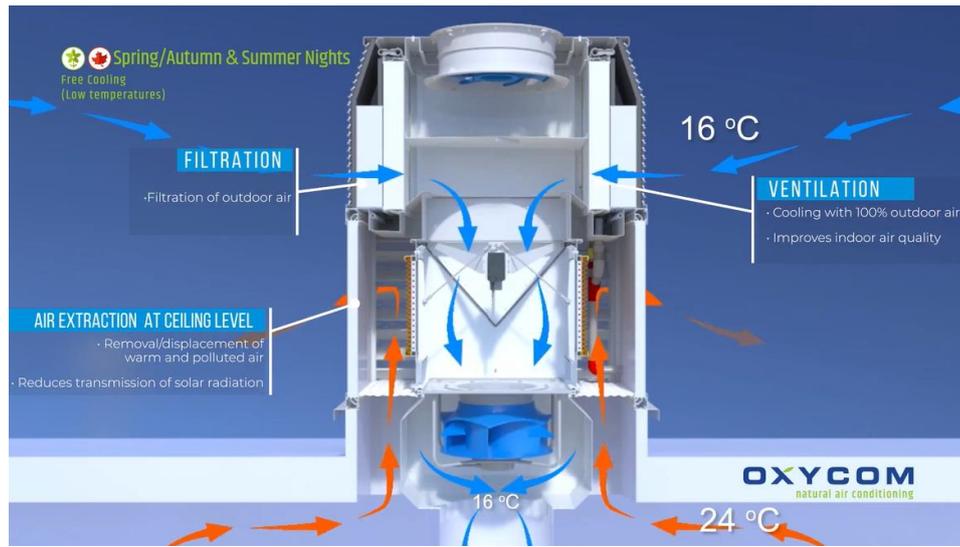


Figura 5.14- Funzionamento impianto stagione primavera-autunno [6, Sitografia]

6. APPLICAZIONE AL CASO STUDIO

6.1 MATERIALE UTILIZZATO

Infinite R è il materiale a cambiamento di fase utilizzato in questa applicazione.

Il PCM è inorganico, di origine minerale, macroincapsulato in un film plastico ignifugo. La composizione chimica del materiale è riassunta nella Tabella 10.

| NOME DEL COMPOSTO | % |
|---|----------|
| Cloruro di Calcio | 45-60 |
| Cloruro di Potassio | <3 |
| Magnesio Alluminio Silicato Idratato | 10-25 |
| Sodio di calcio Alluminio Silicato Idratato | 1-5 |
| Acqua | 35-60 |

Tabella 10- Composizione PCM

Il PCM scelto è composto da materiali completamente ecologici. Come tutti i PCM di tipo inorganico non è né tossico né infiammabile.

6.1.1 Caratteristiche termiche

La difficoltà maggiore nell'implementare questo materiale nei software è dovuta alla sua caratteristica principale: il cambiamento di fase.

Tra le grandezze termiche del PCM quella più significativa è il calore specifico, il quale presenta un valore per la fase solida, uno per quella liquida e uno per la transizione di fase.

L'approssimazione adottata per il calore specifico è rappresentata in Figura 6.1: la zona in cui avviene il cambiamento di fase presenta un valore molto elevato e superiore rispetto alla zona liquida o solida, questo proprio per la caratteristica del materiale a cambiamento di fase di accumulare calore latente sfruttando il suo cambiamento di fase mantenendo costante la propria temperatura.

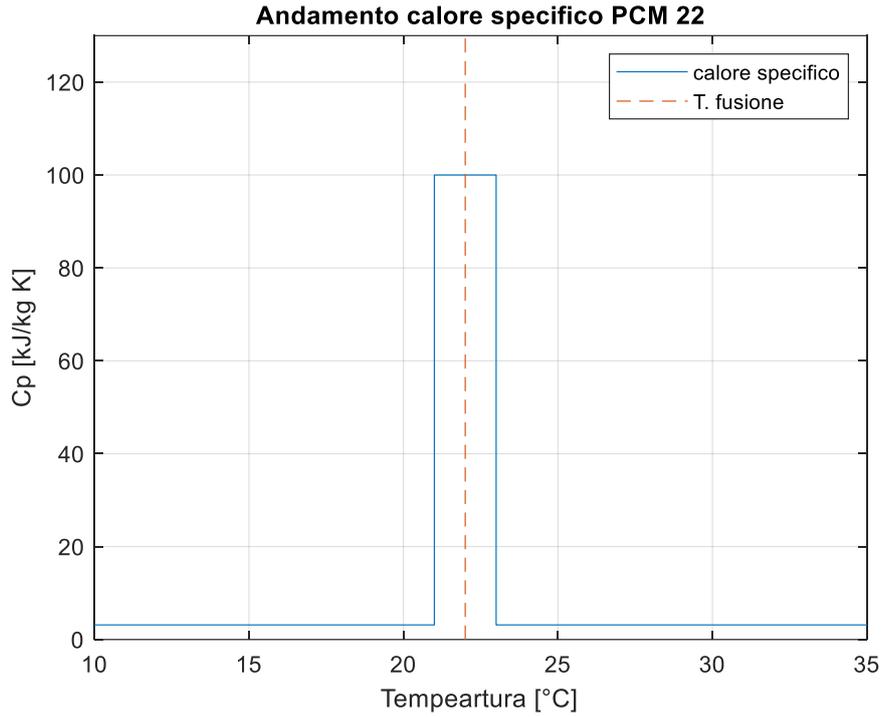


Figura 6.1-Andamento calore specifico PCM 22

La capacità di accumulo del PCM comprende una fase sensibile, quando il materiale si trova in fase solida o liquida, e una fase latente quando avviene il cambiamento di fase.

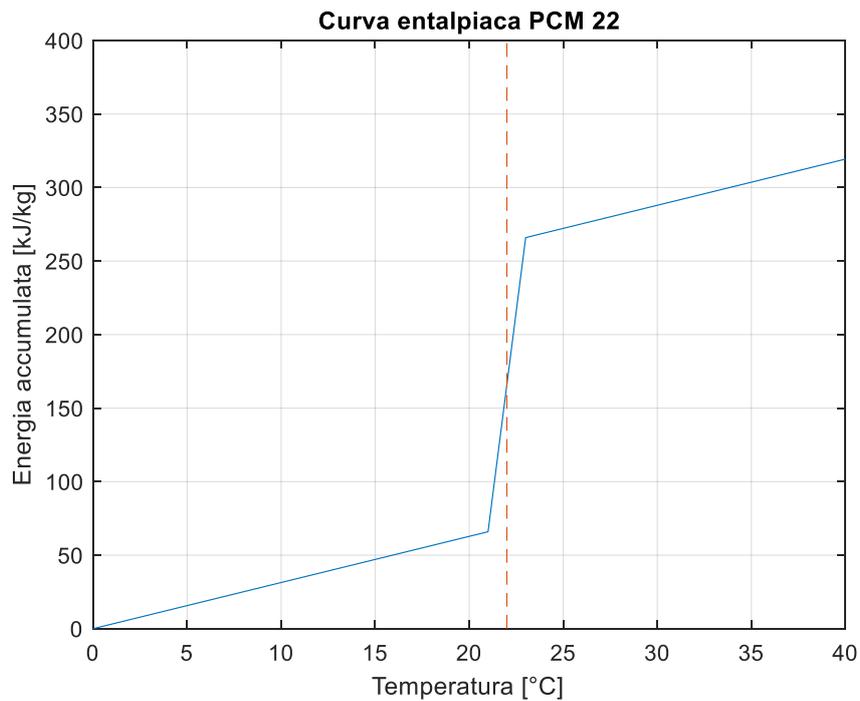


Figura 6.2-Grafico curve entalpiche PCM 22

Il cambiamento di fase avviene in un range di temperatura di 3°C, in prossimità del quale il PCM presenta un incremento significativo della capacità di accumulo.

| Name | Value | Unit | Description |
|-----------------|--------------------|----------|---|
| N | 3 | items | Number of temperature coordinates |
| NM1 | 2.0 | items | Number of partial enthalpies (N-1) |
| RHOSOL | 815.0 | kg/m3 | Layer density (solid) |
| CPSOL | 3140.0 | J/(kg K) | Layer specific heat (solid) (J/(kg K)) |
| LAMBDA SOL | 1.09 | W/(m ... | Layer heat conductivity (solid) (W/(m K)) |
| CPLIQ | 3140.0 | J/(kg K) | Layer specific heat (liquid) (J/(kg K)) |
| LAMBDA LIQ | 0.54 | W/(m ... | Layer heat conductivity (liquid) W/(m K) |
| C0 | 300.0 | J/(kg K) | Specific heat during reversing (c0 <= min(cpSol... |
| TH[1:3] | {21 22 23} | °C | Temperatures at which melting/solidifying enthal... |
| DHDTMELT[1:2] | {100000.0 10000... | J/(kg K) | Partial enthalpies between temperature coordin... |
| DHDT SOLID[1:2] | {100000.0 10000... | J/(kg K) | Partial enthalpies between temperature coordin... |

Figura 6.3- Impostazione parametri del materiale a cambiamento di fase (PCM22) sul software IDA ICE

6.2 REQUISITI PCM NELL'EDILIZIA

I materiali a cambiamento di fase rappresentano una soluzione tecnologica innovativa nella progettazione di impianti di condizionamento, in quanto costituiscono un nuovo metodo per smorzare le fluttuazioni giornaliere della temperatura ambiente attraverso la riduzione dei picchi di temperatura interna, e quindi i consumi energetici necessari alla climatizzazione degli ambienti. I requisiti che i PCM dovrebbero possedere per poter essere impiegati nel campo dell'edilizia e negli impianti correlati, sono:

- Temperatura di fusione intorno ai 25°C;
- Elevato calore di transizione di fase;
- Basso costo;
- Atossicità, non corrosivi o igroscopici;
- Disponibilità sul mercato in quantità tali da poter essere incorporati nei normali materiali edilizi.

I vantaggi che l'applicazione dei PCM in edilizia possono garantire sono:

- Con spessori molto ridotti offrono una capacità di accumulo termico paragonabile ad un muro in mattoni di spessore maggiore;
- Peso ridotto, i sistemi di involucro edilizio contenenti questi materiali garantiscono uno smorzamento ed uno sfasamento temporale nella trasmissione del calore, nonostante siano dotati di una ridotta massa frontale;
- Innalzano il comfort interno perché si riducono i picchi di temperatura;
- Abbassano il fabbisogno di freddo in estate: si possono così evitare i climatizzatori o comunque sottodimensionarli perché i carichi di picco vengono abbassati. Ne risultano costi di investimento e di esercizio ridotti, e quindi un risparmio energetico ed economico. [6, Bibliografia]

Grazie alla loro capacità di accumulo e rilascio in un momento successivo del calore, i PCM possono essere utilizzati per migliorare le prestazioni estive degli edifici dotati di scarsa inerzia termica svolgendo la funzione di "inerzia artificiale". Ad oggi l'impiego in edilizia è stato limitato prevalentemente ad interventi sperimentali, quindi non sono disponibili dati su un elevato numero di edifici. Grazie ai PCM è possibile interrompere il trasferimento di

calore dall'esterno verso l'interno quando la temperatura della parete sale oltre la temperatura di fusione T_m del PCM; il rilascio dell'energia accumulata avviene nelle ore notturne quando è possibile asportare il calore in eccesso con la ventilazione dell'edificio.

I PCM forniscono all'edificio una massa termica artificiale basata non sulle capacità di accumulo inerziale, come nei materiali tradizionali, ma sul calore latente.

Nella strategia passiva l'involucro edilizio non viene più visto come un elemento immutabile, ma diventa un componente stesso del sistema energetico in grado di interagire con continuità con l'ambiente circostante. Il PCM applicato agli edifici è in grado di assorbire il calore durante il giorno passando dalla fase solida alla fase liquida compiendo una reazione endotermica, ovvero immagazzinando il calore in eccesso che altrimenti surriscalderebbe l'ambiente. Durante la notte, al calare della temperatura, il materiale si solidifica nuovamente, cedendo il calore accumulato, ed è quindi pronto a compiere un nuovo ciclo il giorno successivo.

In estate i PCM lavorano principalmente per smorzare l'onda di calore durante il giorno, il carico frigorifero viene spostato così dalle elevate temperature diurne al periodo notturno, diminuendo i picchi operativi dei dispositivi refrigeranti. Per la rigenerazione del PCM si hanno diverse possibilità: ventilazione manuale a finestra effettuata dall'utente, ventilazione automatizzata con aria notturna estiva in caso sia presente un impianto di ventilazione, o raffreddamento degli strati del PCM mediante feltri integrati negli strati e raffreddati ad acqua.

Il funzionamento invernale è invece basato sull'accumulo di calore durante il giorno e sul suo rilascio di notte, quando le temperature esterne più basse imporrebbero un carico termico per il riscaldamento maggiore.

I PCM consentono quindi di stabilizzare la temperatura interna degli ambienti, riducendone l'ampiezza dell'oscillazione nell'arco della giornata.

Di contro presentano ancora alcune criticità:

- Non assicurano sempre la necessaria stabilità durante i ripetuti cicli di carico e scarico e quindi una non sempre certezza funzionale all'invecchiamento;
- È richiesta una maggiore complessità nella fase di progettazione e realizzazione;
- Necessità di particolari condizioni termiche che consentano ai materiali di cambiare fase e quindi complicato scegliere la temperatura di fusione più adatta;

- Possibile surriscaldamento nel periodo estivo quando la temperatura notturna non scende sotto quella dei materiali, impedendone la solidificazione;
- Con il passare del tempo l'efficienza del cambiamento di fase va peggiorando.

Il parametro chiave da scegliere in fase di progetto è la temperatura di fusione del PCM, in prima analisi è fondamentale considerare per quale scopo il complesso edilizio verrà utilizzato e quale temperatura è richiesta all'interno della struttura. Una temperatura del PCM troppo alta di fusione porterebbe ad avere un surriscaldamento della stagione estiva, mentre una temperatura eccessivamente bassa complicherebbe la fase di scarica nelle ore notturne, poiché il cambiamento di fase avverrebbe a temperature superiori o troppo prossime rispetto alla temperatura esterna notturna; ne conseguirebbe una fase di scarica poco efficace. Altra componente da tenere in considerazione è la temperatura esterna durante il periodo diurno che funge da sollecitazione termica per il PCM.

Qualora si voglia mantenere la temperatura interna nella fascia centrale della zona di comfort è opportuno scegliere un PCM con temperatura di fusione intorno ai 23°C.

Se invece l'obiettivo è contribuire al raffrescamento passivo ed i carichi termici non sono troppo elevati si possono scegliere temperature di fusione attorno ai 21°C. [12, Bibliografia] Pertanto, in fase di progettazione, è opportuno quindi considerare le caratteristiche della zona climatica nella quale si opera e il periodo dell'anno in cui si vuole sfruttare il PCM.

Nella Figura 6.4 viene riportata la quantità di calore accumulata e rilasciata dal PCM in funzione della temperatura di fusione.

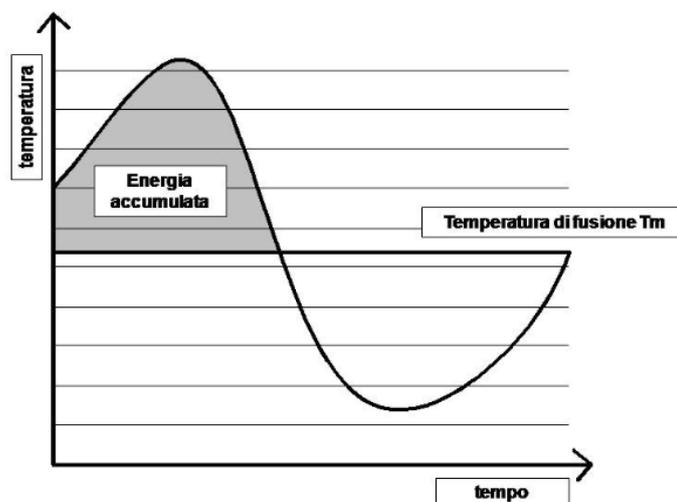


Figura 6.4-Calore accumulato in funzione della temperatura di fusione del PCM [12, Bibliografia]

Una corretta scelta della temperatura consente di sfruttare a pieno le capacità termiche del materiale, l'area del grafico sopra la temperatura di fusione è l'energia accumulata mentre quella sotto quella ceduta dal PCM. Bisogna fare in modo che durante la fase di scarica, tutta l'energia accumulata venga ceduta dal PCM; così facendo la fase successiva di carica potrebbe nuovamente sfruttare tutta la disponibilità di accumulo del PCM. Purtroppo, in alcuni casi la fase di scarica è un momento critico del processo, il non completo rilascio del calore accumulato inficerebbe pesantemente sull'efficienza del PCM.

6.3 SERRA: SCELTA DEL PCM ADOTATTO

Nel caso studio preso in esame il periodo più critico per l'impianto termico è quello estivo, quando le temperature esterne sono rilevanti e il comfort interno richiesto piuttosto stringente; circa 23°C. Al contrario la stagione invernale presenta temperature non particolarmente rigide.

Il PCM, per sua caratteristica, è in grado di lavorare efficacemente alle temperature in cui avviene la transizione di fase, pertanto visto che la temperatura richiesta all'interno della serra cambia in base alla stagione, si è optato per l'applicazione di un PCM con l'obiettivo di ridurre la potenza di raffrescamento fornita alla serra nella stagione estiva, periodo in cui ci sono i maggiori consumi energetici e le maggiori difficoltà per riuscire a garantire le esigenze termo-igrometriche nella serra.

La scelta del PCM da adottare è stata influenzata da una serie di fattori:

- Località dell'edificio in esame, e di conseguenza le tipologie del clima presente;
- Temperatura di cambiamento di fase;
- Reperibilità;
- Costo;
- Luogo dove viene posizionato all'interno dell'edificio.

L'analisi condotta in questo caso studio ha riguardato due possibili scenari di integrazione del PCM con l'impianto di climatizzazione.

6.4 SCENARIO 1- PCM INTEGRATO NELLA STRATIGRAFIA

In questo scenario il PCM viene inserite all'interno della stratigrafia delle pareti esterne e ha uno spessore di 12 mm.

L'intento è quello di ridurre i carichi termici estivi richiesti dalla serra e mantenere all'interno della struttura una temperatura tale da soddisfare comunque le richieste termiche.

6.4.1 Funzionamento PCM

La scelta della temperatura di fusione è fondamentale per l'attivazione del materiale durante le fasi più calde della giornata. Attivandosi, il materiale a cambiamento di fase, incrementa notevolmente l'inerzia termica dell'edificio, assorbendo il calore proveniente dall'esterno e bloccandone la trasmissione verso l'interno della struttura, ne consegue una diminuzione della potenza termica necessaria rispetto al caso in cui il PCM non è presente e un blocco dell'aumento della temperatura interna dell'edificio.

La sollecitazione che attiva il materiale a cambiamento di fase proviene dall'esterno tramite conduzione, convezione e irraggiamento solare.

Alle prime ore del mattino il PCM si presenta solido all'interno della stratigrafia, quando la temperatura esterna inizia a salire nelle tarde ore della mattinata il PCM inizia a percepire un gradiente termico tale da portarlo ad assorbire una quota sensibile e poi iniziare la fase di transizione di fase, durante la quale assorbe calore latente senza cambiare di temperatura.

Una volta saturato il PCM risulta liquido e si comporta come un classico componente della stratigrafia. Quando la temperatura durante la fine della giornata scende il PCM si raffredda cedendo il calore accumulato sia all'interno sia all'esterno dell'involucro edilizio alla temperatura di transizione di fase, e quindi molto importante la scelta della temperatura di transizione di fase del materiale

Durante le prove si sono utilizzati vari PCM con diverse temperature di fusione e in varie posizioni all'interno della stratigrafia. L'obiettivo dello studio è trovare il materiale a cambiamento di fase più adatto e la posizione migliore all'interno della stratigrafia.

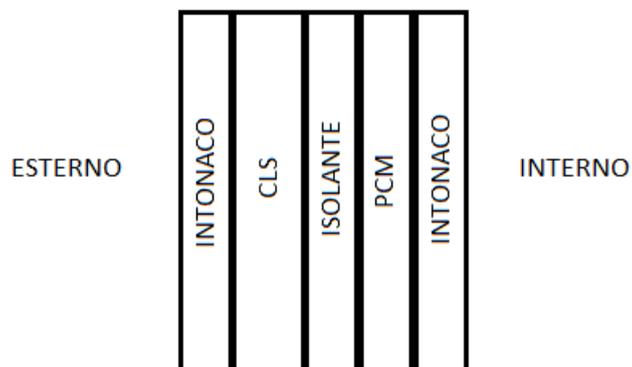


Figura 6.5-PCM inserito dopo l'isolante

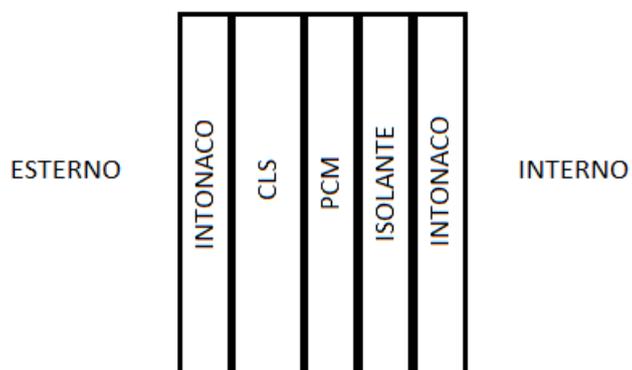


Figura 6.6-PCM inserito prima dell'isolante

6.5 SCENARIO 2- PCM INSERITO IN APPOSITI PANNELLI

In questo secondo scenario l'inserimento del PCM avviene all'interno di appositi pannelli appesi al soffitto in prossimità delle bocchette di immissione.

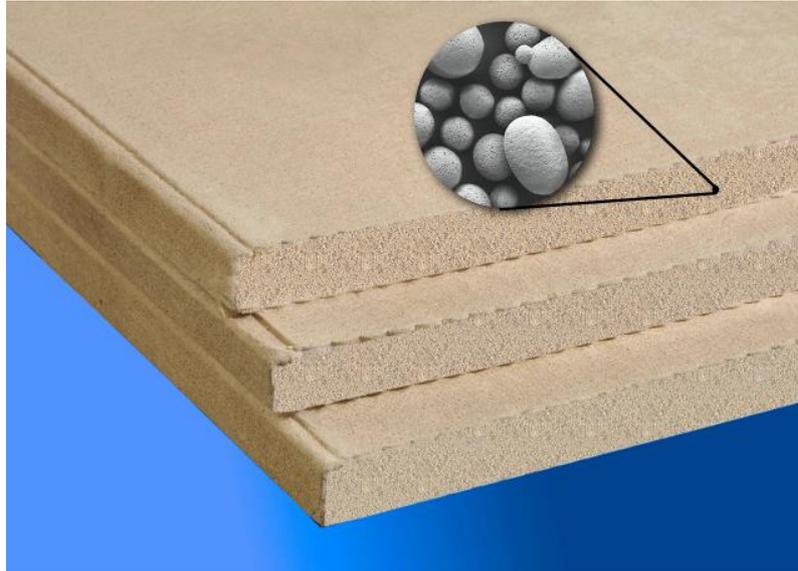


Figura 6.7-Pannelli in cartongesso integrati con PCM [9, Sitografia]

I pannelli vengono disposti all'interno della struttura ad un'altezza di 4 metri e presentano una forma rettangolare con dimensioni 3x1 m.

In ogni linea di produzione vengono disposti 10 pannelli.

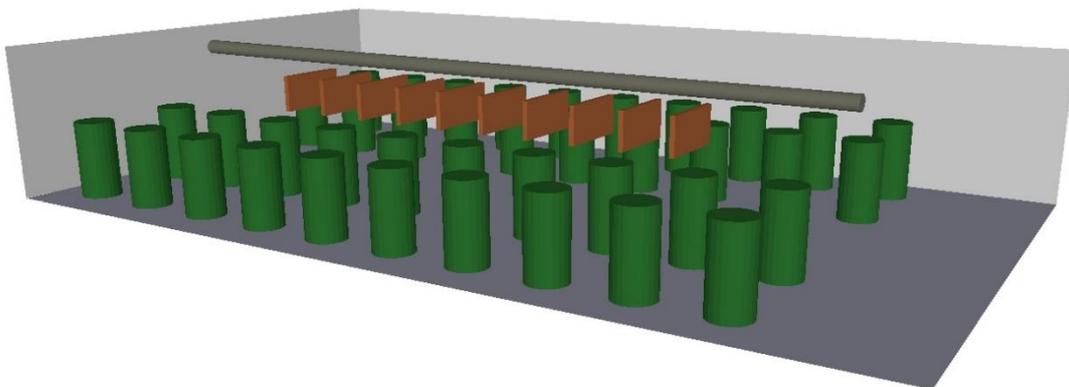


Figura 6.8-Modello 3d relativo ad una linea di produzione all'interno della serra [Software Dialux]

Anche in questo caso l'obiettivo è lo stesso dello scenario precedente: ridurre le fluttuazioni della temperatura all'interno dell'edificio e sfasare il picco della temperatura massima interna. Inoltre, si vuole analizzare come varia la richiesta di potenza termica con o senza l'inserimento del PCM all'interno della struttura.

6.5.1 Funzionamento PCM

Al raggiungimento della temperatura di fusione, il PCM inizia ad accumulare calore latente ed incomincia il passaggio dallo stato solido allo stato liquido.

Il calore latente che Infinite R accumula viene sottratto all'ambiente in prossimità del PCM, e quindi una volta che l'ambiente raggiunge una temperatura che corrisponde a quella di inizio di fusione del PCM, l'ambiente smette di surriscaldarsi in quanto l'eccesso di calore viene catturato dal materiale a cambiamento di fase. Nell'arco temporale in cui il PCM accumula calore, diventando liquido, la temperatura dell'ambiente smette di aumentare, ciò comporta che il picco massimo di temperatura sia posticipato rispetto a quello che si registrerebbe in assenza di PCM (sfasamento onda termica) ed inoltre risulta inferiore rispetto a quello che si registrerebbe in assenza di PCM (abbassamento picco temperatura massima). Questo evita il surriscaldamento dell'ambiente e consente di mantenere la temperatura nel regime di comfort richiesto. Una volta avvenuta del tutto la transizione di fase, durante la quale il materiale ha incamerato tutto il calore latente possibile, il prodotto interrompe la sua fase di assorbimento e la temperatura interna dell'aria riprende ad aumentare.

In questo caso la scelta del PCM è vincolata in modo stringente alla temperatura interna richiesta e alla temperatura di immissione dell'aria, una volta che il materiale a cambiamento di fase ha svolto il suo compito: quello di assorbire calore e bloccare l'aumento di temperatura interna dell'edificio, si trova allo stato liquido, se il range di temperatura di transizione di fase fosse eccessivamente superiore alla temperatura di immissione dell'aria dalle bocchette in ambiente si creerebbe una gradiente di temperatura che porterebbe il PCM (in fase liquida) a cedere il calore accumulato precedentemente all'aria immessa in ambiente (che si trova a temperatura inferiore rispetto al PCM) con conseguente rilascio di calore nell'ambiente e aumento dei consumi energetici dell'impianto di climatizzazione per garantire le condizioni interne richieste e un errato sfruttamento delle caratteristiche del PCM.

Nel caso in esame la temperatura di immissione è pari a 19°C, pertanto viene utilizzato un PCM con temperatura di fusione pari a 21°C, con range di cambiamento di fase compreso tra 20 e 22°C. Ne consegue che, una volta terminata la funzione di accumulo di calore proveniente dalla serra, il PCM non interagisce più con l'ambiente poiché il gradiente termico con l'aria immessa è minimo e di conseguenza la potenza termica scambiata per convezione. L'intento in questa applicazione è quella di ritardare il picco di temperatura interna e ridurlo.

La fase di “scarica” del PCM avviene tramite ventilazione automatizzata a finestra controllata tramite sensori che, quando misurano una temperatura esterna inferiore alla temperatura di fusione del PCM, aprono le finestre e così facendo l’aria in ingresso dall’esterno contribuisce a rigenerare il materiale a cambiamento di fase.

Per favorire il ricircolo di aria, e la conseguente scarica del PCM si adotta anche una ventilazione automatizzata meccanica sfruttando la modalità *free cooling* dell’impianto di ventilazione.

Nelle nottate particolarmente calde, durante le quali la temperatura esterna non scende a sufficienza anche nelle ore notturne, si sfrutta l’impianto di condizionamento per assolvere al compito di rigenerazione del PCM; nonostante ciò i consumi energetici non sarebbero comunque troppo onerosi poiché di notte il costo dell’energia elettrica risulta inferiore rispetto alla fascia oraria giornaliera.

L’impianto di condizionamento adottato nella serra è un impianto a portata variabile (VAV, *Variable Air Volume*). L’integrazione di PCM modifica la richiesta di potenza termica nella stagione estiva e quindi fondamentale avere un impianto in grado di adattarsi alla variazione del fabbisogno di raffreddamento richiesto variando la portata immessa in ambiente, con conseguente risparmio energetico.

La velocità angolare del ventilatore presente nel terminale è regolata da un inverter che, modificando la frequenza e la tensione di alimentazione del motore asincrono trifase, è in grado di variare la portata di aria immessa.

7. ANALISI SPERIMENTALE

L'Analisi sperimentale è stata condotta tramite l'utilizzo di IDA *Indoor Climate and Energy* (IDA ICE), un software di simulazione dinamica degli edifici in grado di valutare istante per istante la temperatura interna e la potenza termica richiesta dall'involucro edilizio.

L'integrazione di PCM all'impianto ha comportato anche la ricerca di un software in grado di approssimare in maniera adeguata l'andamento del calore specifico (c_p) del PCM durante il cambiamento di fase e la sua capacità di accumulare energia termica durante la fase liquida, solida e soprattutto nella transizione di fase.

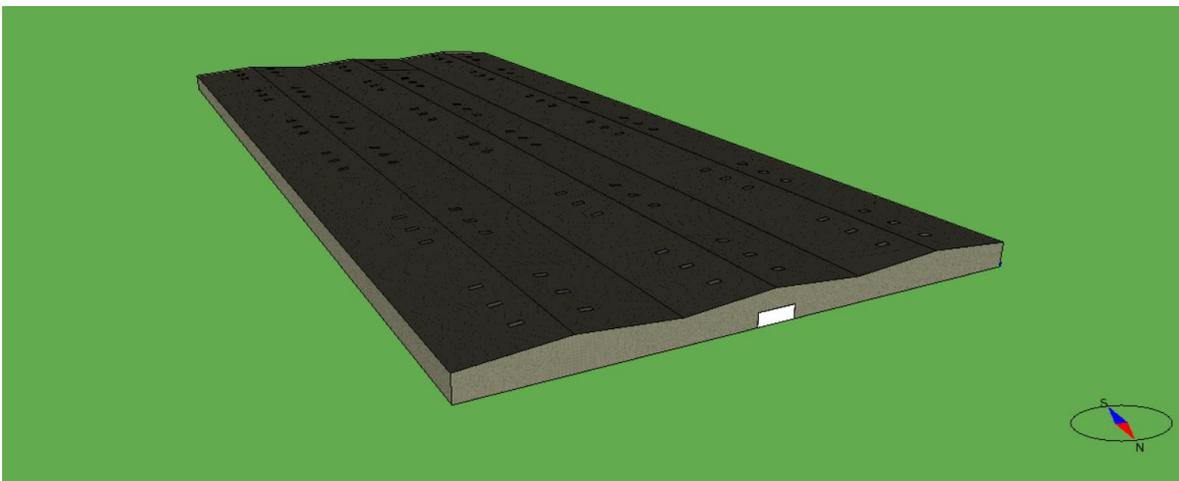


Figura 7.1-Serra su IDA ICE

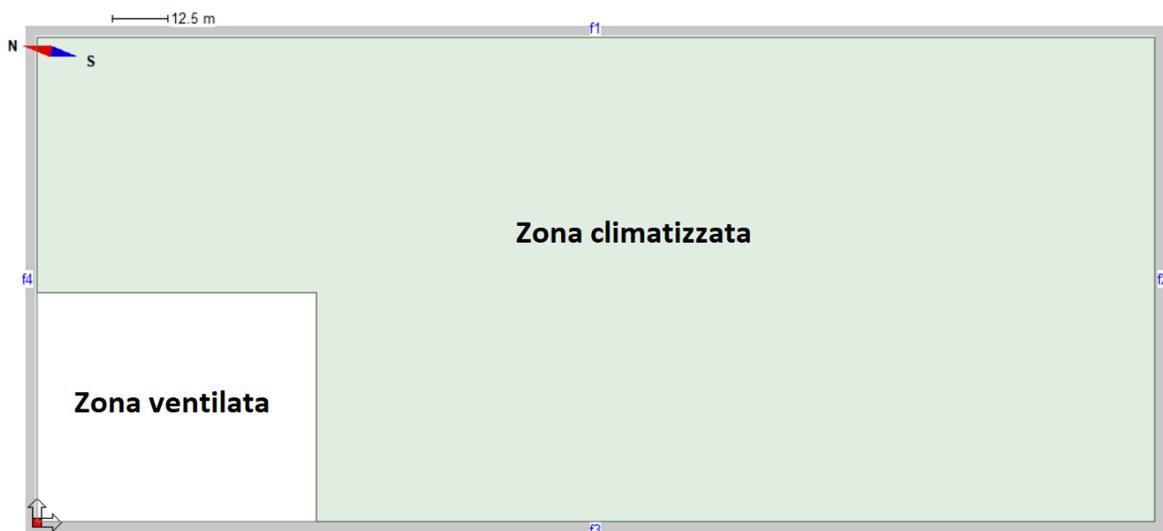


Figura 7.2-Rappresentazione pianta serra IDA ICE

La computazione è stata eseguita per la zona climatizzata dove sono presenti i fotobioreattori contenenti le microalghe.

| SUPERFICIE | [m ²] |
|-------------------|-------------------|
| Zona climatizzata | 15100 |
| Zona ventilata | 4900 |

7.1 SCENARIO 1

Nel primo scenario sono state eseguite una serie di prove applicando vari PCM con temperatura di cambiamento di fase differenti e disponendoli in varie posizioni all'interno della stratigrafia al fine di trovare la soluzione più adatta.

Tutte le simulazioni effettuate sono relative alle condizioni climatiche registrate nell'anno 2018.

Il carico termico di raffrescamento richiesto dalla serra per soddisfare le richieste termigrometriche viene valutato nell'arco temporale compreso tra i mesi di aprile e ottobre.

Qualora si progettasse l'impianto di climatizzazione senza l'integrazione del materiale a cambiamento di fase la potenza termica da fornire e l'andamento di temperatura in tutta la stagione estiva sono illustrate nelle Figure 7.3-7.4.

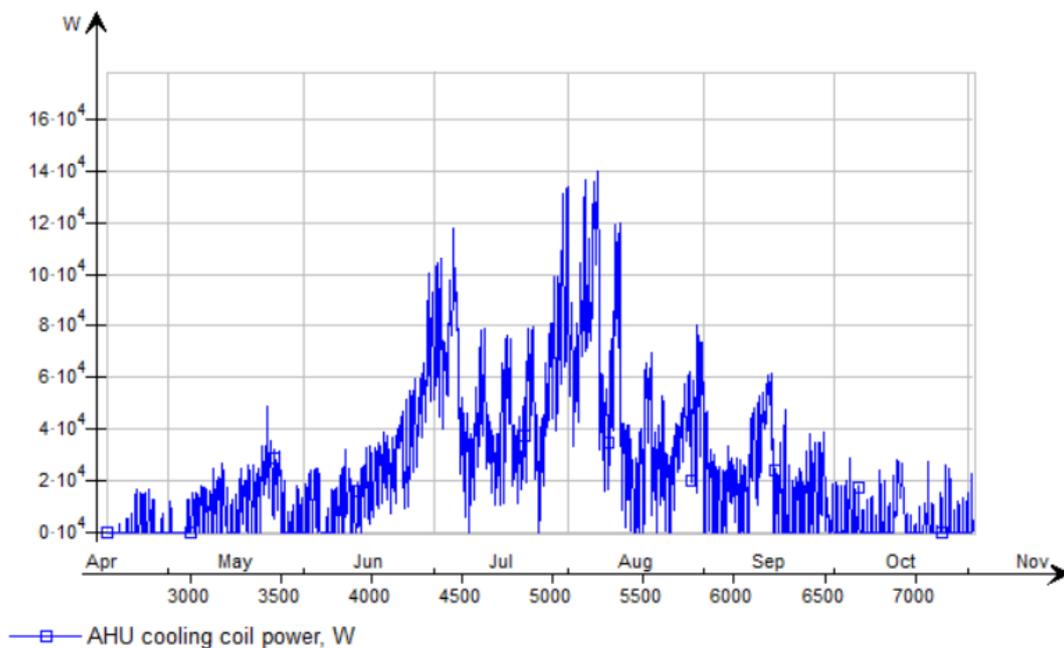


Figura 7.3- Andamento potenza termica senza l'integrazione di PCM nella serra

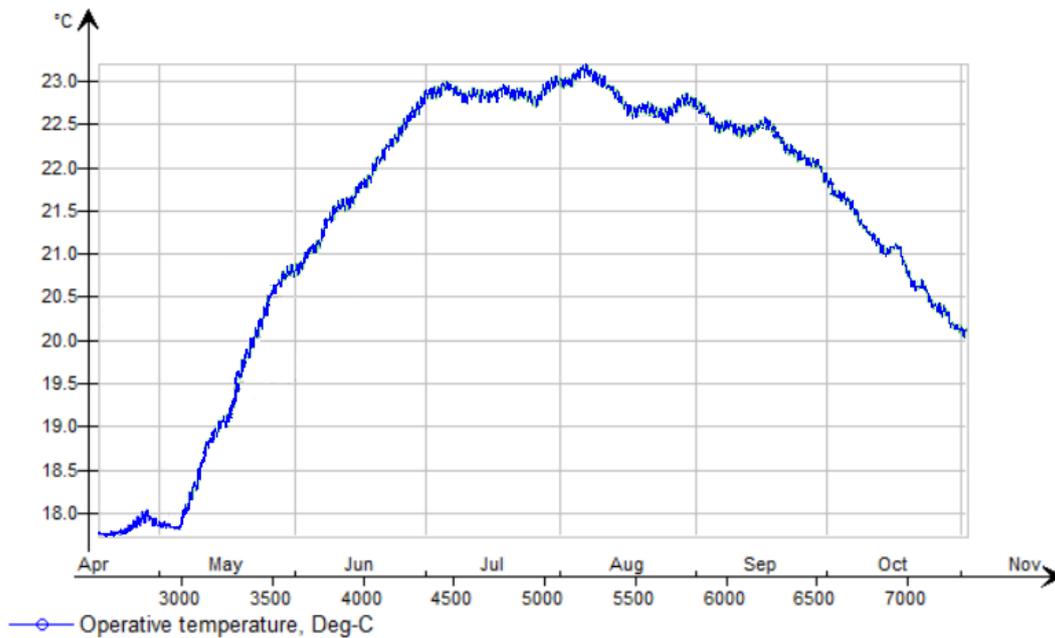


Figura 7.4- Andamento temperatura interna senza l'integrazione di PCM nella serra

La temperatura da garantire all'interno della serra deve essere al più di 23°C, una temperatura superiore danneggerebbe le microalghe.

Il carico termico più elevato si registra nelle prime settimane di agosto quando la temperatura esterna risulta la massima dell'intera estate.

7.1.1 PCM 22

La prima simulazione riguarda il PCM 22, candidato ad essere il materiale a cambiamento di fase più adatto a quest'applicazione visto che cambia di fase nel range di temperatura tra 21 e 23°C, temperature prossime a quella richiesta in ambiente.

La simulazione fornisce come risultati gli andamenti di temperatura interna e potenza termica richiesta dalla serra inserendo all'interno della stratigrafia il PCM. La prova viene ripetuta inserendo il materiale a cambiamento di fase prima e dopo l'isolante per verificare quale sia la posizione in cui il materiale a cambiamento di fase si attiva in modo migliore contribuendo a ridurre la temperatura interna e potenza di raffrescamento richiesta.

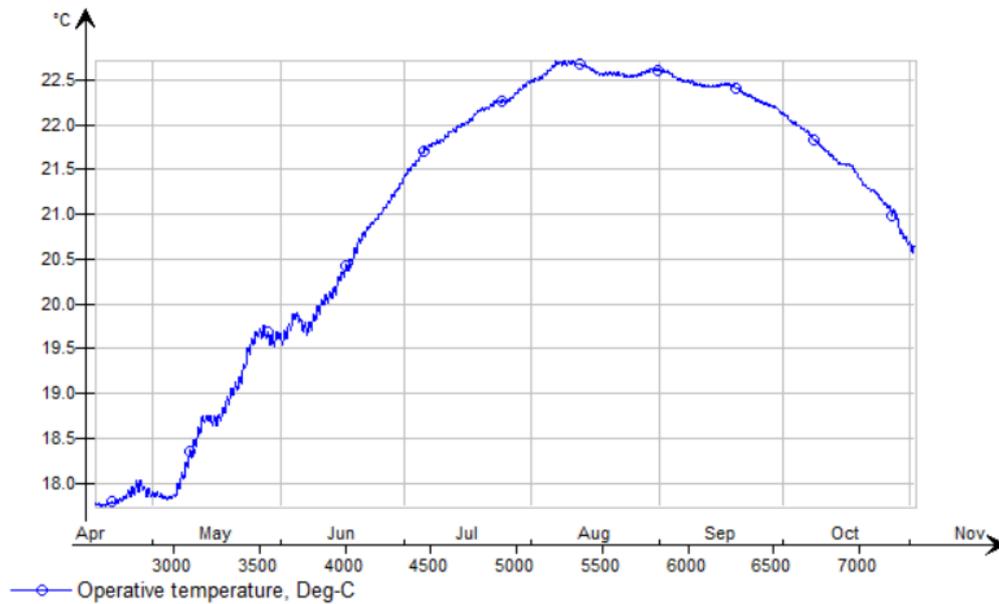


Figura 7.5- Andamento temperatura interna con PCM 22 prima dell'isolante

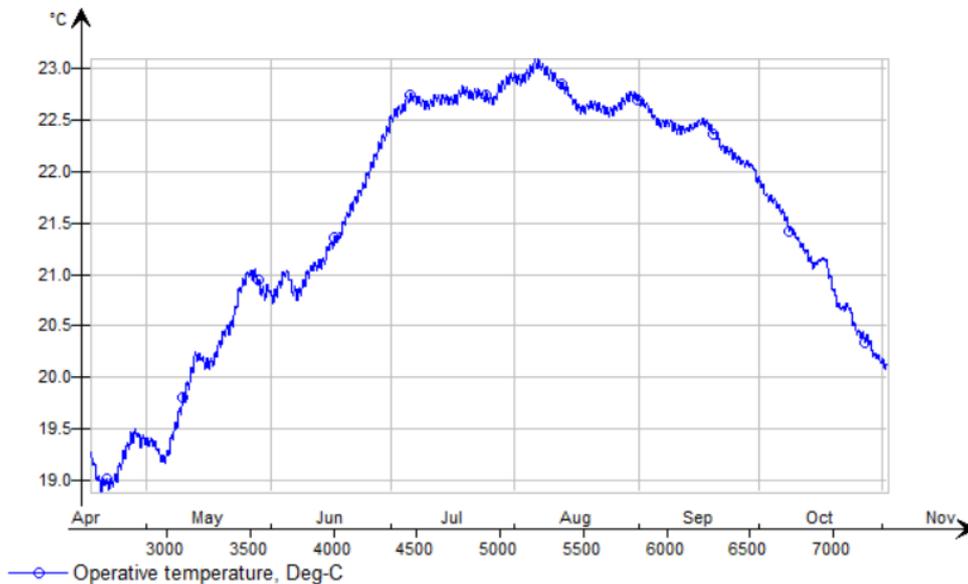


Figura 7.6- Andamento temperatura interna con PCM 22 dopo l'isolante

Il PCM posto prima dell'isolante riesce a garantire per tutto l'arco temporale una temperatura interna inferiore rispetto allo stesso PCM posto dopo l'isolante. La sollecitazione termica che attiva il materiale a cambiamento di fase proviene dall'esterno, dove irraggiamento e convezione solare incidono sull'involucro. Ponendo il PCM prima dell'isolante il gradiente

termico che è presente tra PCM e lo strato più esterno della stratigrafia è rilevante e tale da produrre uno scambio termico che porta il PCM ad attivarsi, e quindi alla sua transizione di fase nella quale la sua capacità di accumulo è molto elevata. In questa circostanza il calore viene accumulato dal materiale a cambiamento di fase e smette di propagarsi nella stratigrafia, ne consegue una temperatura interna della serra costante.

Confrontando gli andamenti di potenza richiesti dalla serra si nota come la differenza più marcata sia in corrispondenza dei mesi più caldi dell'anno (luglio-agosto), durante i quali la potenza fornita risulta marcatamente inferiore nel caso in cui il PCM sia posto prima dell'isolante. Questo poiché nelle giornate più calde la sollecitazione esterna è rilevante e con valori simili nell'arco dei mesi più caldi, pertanto il gradiente termico che si viene a creare in prossimità del PCM è di entità considerevole da attivarlo e permettere la transizione di fase con conseguente temperatura interna più contenuta e una richiesta termica della serra inferiore rispetto al caso con PCM posto dopo l'isolante.

Nel caso in cui il PCM sia posto dopo l'isolante, il gradiente termico che si viene a creare in prossimità del materiale a cambiamento di fase non è tale da attivarlo, la presenza dell'isolante, che riduce sensibilmente la temperatura, porta ad una differenza di temperatura intorno al PCM non sufficiente a portarlo al cambiamento di fase, ne consegue che l'inerzia termica della parete non subisce un incremento apprezzabile.

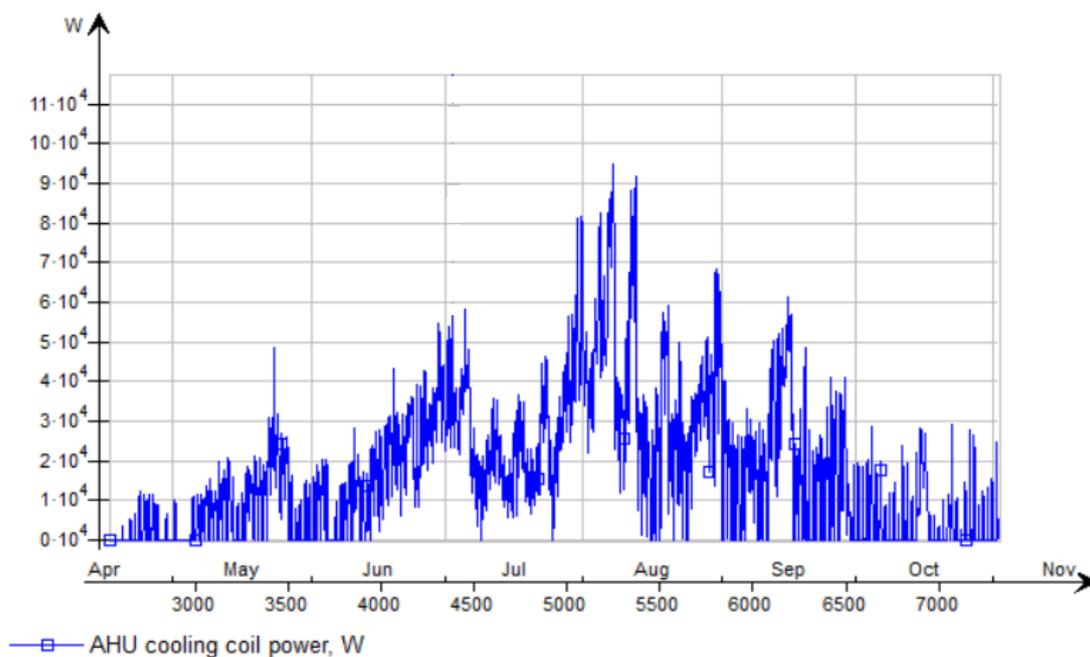


Figura 7.7-Andamento potenza termica con PCM 22 prima dell'isolante

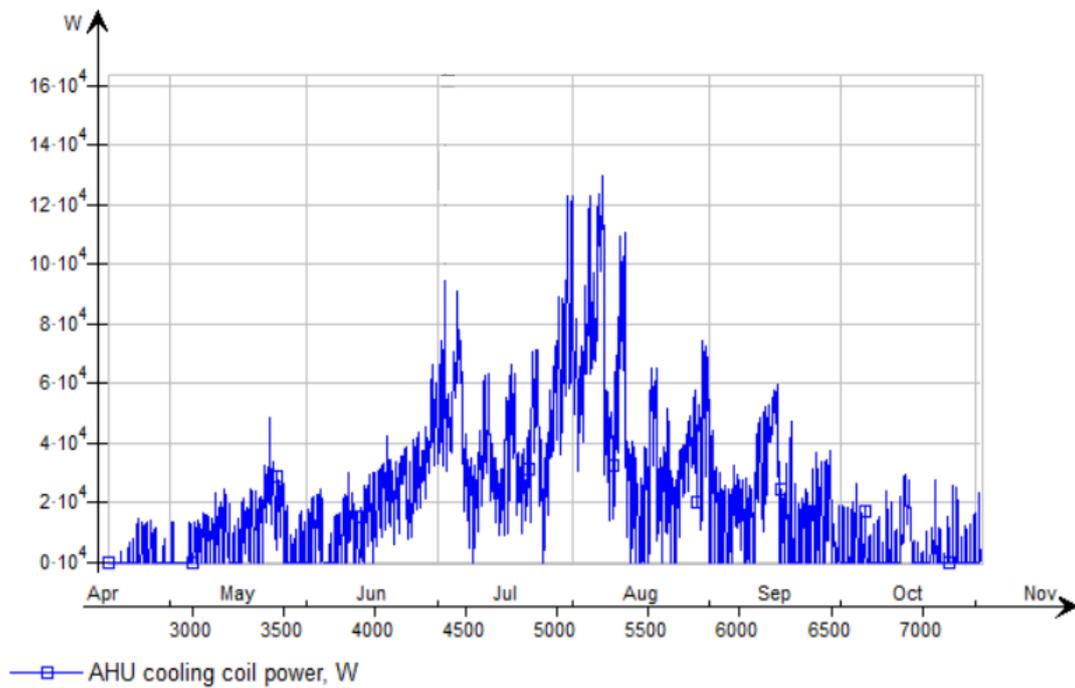


Figura 7.8- Andamento potenza termica con PCM 22 dopo l'isolante

7.1.2 PCM 21

I grafici nelle Figure 7.9-7.10 mostrano gli andamenti di temperatura interna inserendo PCM 21 prima e dopo l'isolante. Come nel caso precedente le temperature interne risultano inferiori nel caso in cui il PCM venga inserito prima dell'isolante.

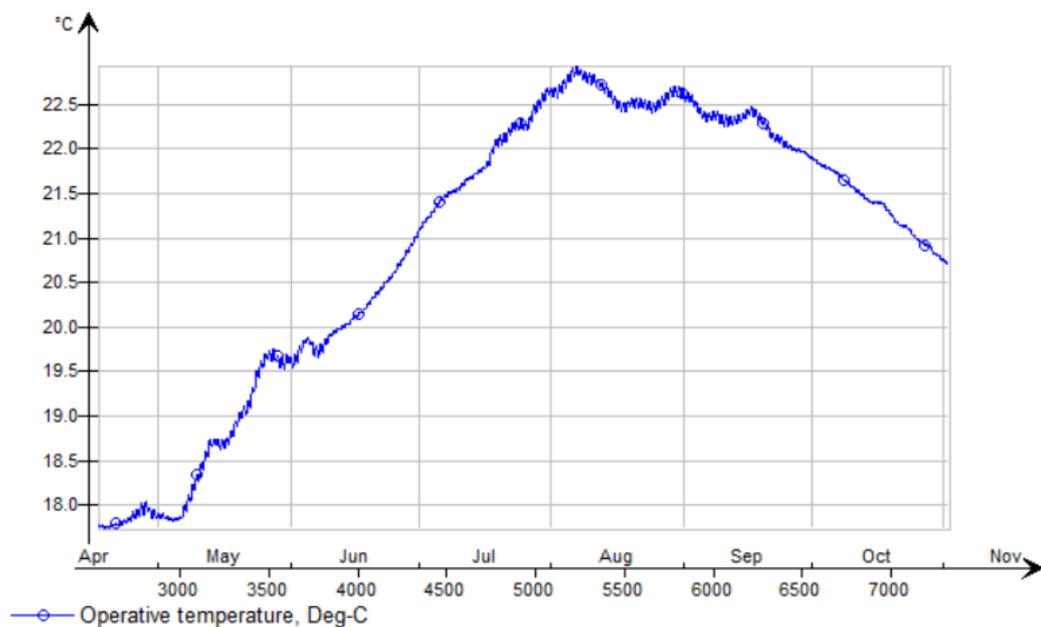


Figura 7.9- Andamento temperatura interna con PCM 21 prima dell'isolante

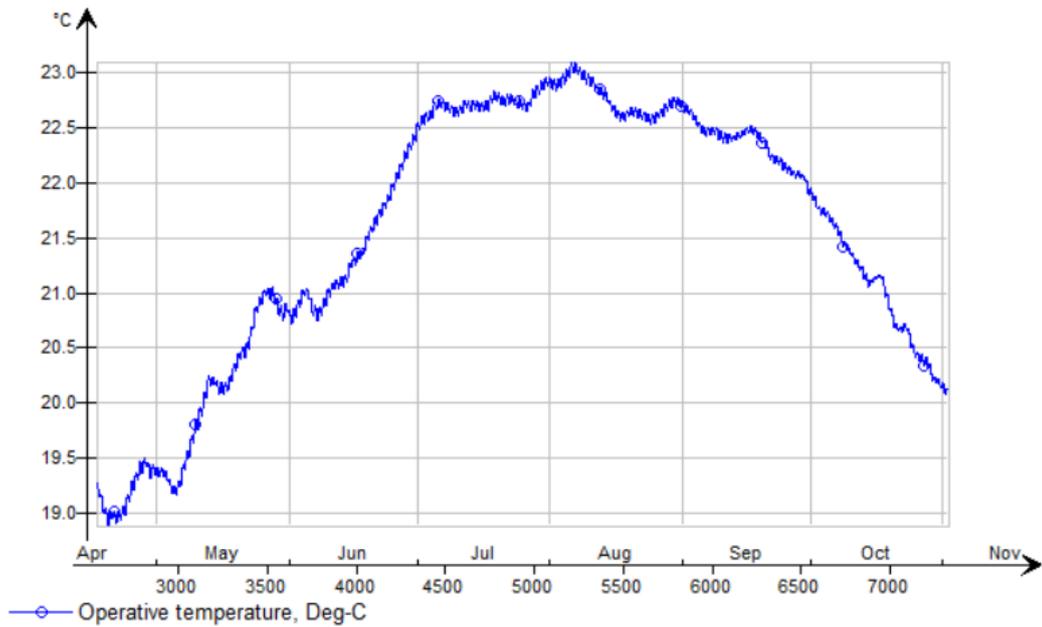


Figura 7.10- Andamento temperatura interna con PCM 21 dopo l'isolante

Il PCM 21 ha un range di temperatura in cui cambia di fase compreso tra i 20 e 22°C, pertanto l'attivazione avviene a temperature leggermente inferiori rispetto al caso in cui si applica PCM 22. Nei mesi di maggio e giugno la sollecitazione esterna inizia ad essere considerevole, il PCM 21 posto prima dell'isolante viene attivato perfettamente in questo periodo e riesce nell'intento di accumulare energia, infatti l'andamento delle temperature interne cresce in modo più contenuto rispetto al caso con PCM dopo l'isolante; la differenza in questo arco temporale è marcata: circa 1.5-2°C.

L'andamento delle potenze termiche è simile nei due casi: nel caso in cui il PCM sia posto prima dell'isolante la richiesta di raffrescamento è più contenuta nei mesi di maggio e giugno e il picco di potenza nel periodo più caldo è leggermente più contenuto.

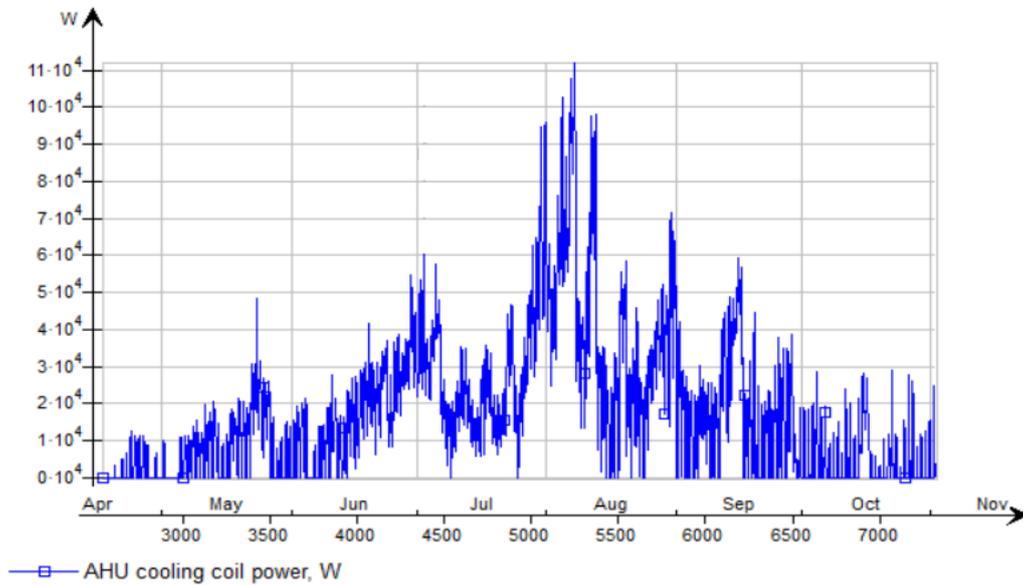


Figura 7.11- Andamento potenza termica con PCM 21 prima dell'isolante

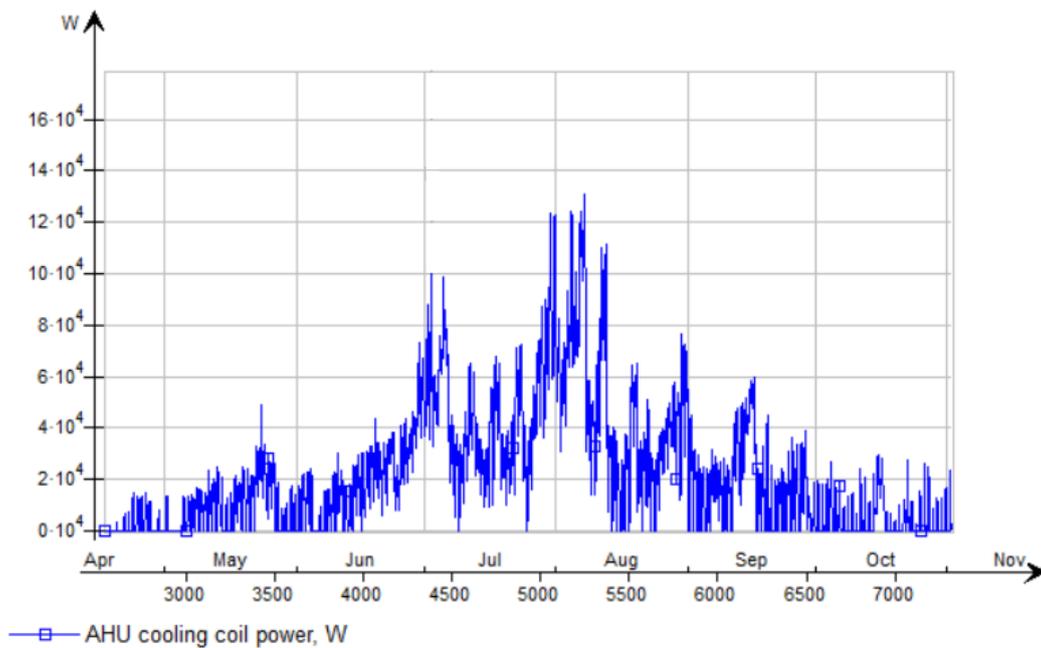


Figura 7.12- Andamento potenza termica con PCM 21 dopo l'isolante

7.1.3 PCM 25

L'analisi viene ripetuta applicando il PCM 25, l'andamento della temperatura mostra che il materiale non sia adatto all'applicazione in esame, poiché il range di temperatura di cambiamento di fase è superiore alla temperatura interna voluta (al massimo 23°C), pertanto in pochissime occasione il PCM viene attivato, ne consegue che l'andamento della temperatura risulta simile al caso in cui non venga utilizzato il PCM.

Nell'eventualità in cui il materiale sia attivato e possa quindi assorbire calore latente, nella successiva fase di scarica il calore che viene ceduto dal PCM è comunque alla sua temperatura di transizione di fase (24-26°C) superiore alla temperatura ambiente, ne consegue che il PCM cedendo calore tende a riscaldare l'ambiente.

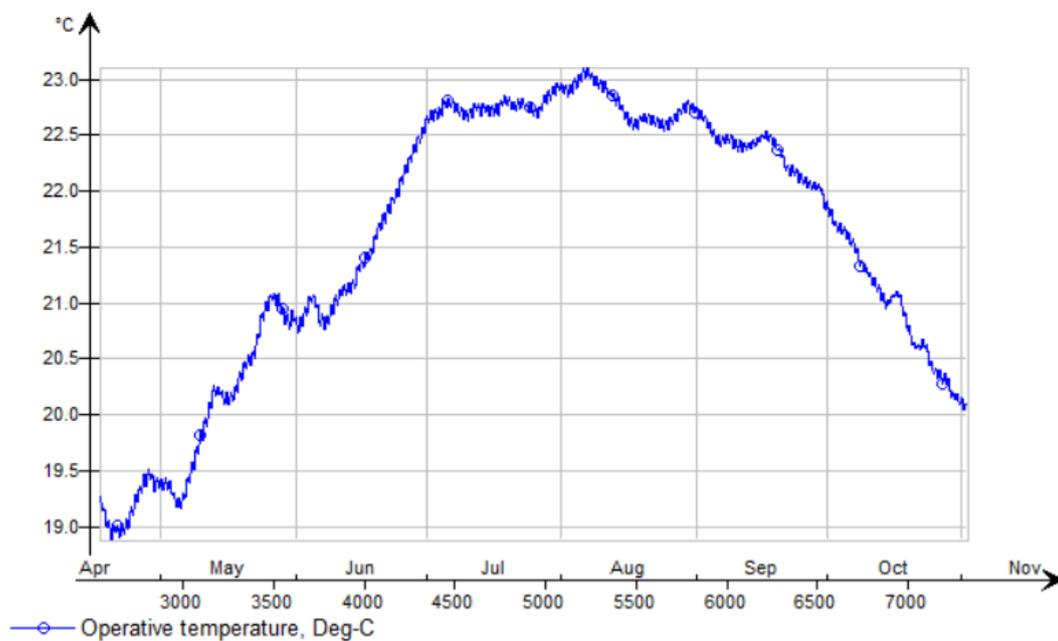


Figura 7.13- Andamento temperatura interna con PCM 25 dopo l'isolante

La scarsa attivazione del PCM 25 durante la stagione estiva comporta una richiesta di potenza di raffrescamento simile al caso senza PCM, senza alcuna riduzione significativa.

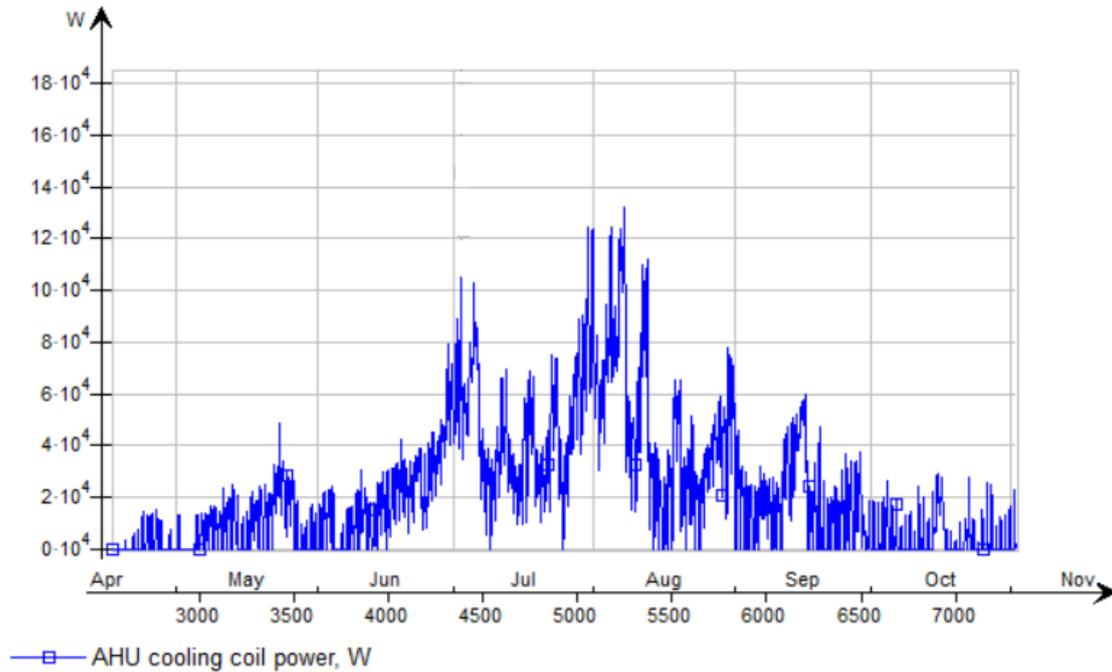


Figura 7.14- Andamento potenza termica con PCM 25 dopo l'isolante

Anche nel caso di applicazione del PCM 25 prima dell'isolante l'effetto sulla riduzione di temperatura non è particolarmente apprezzabile, ma comunque migliore rispetto all'applicazione del PCM dopo l'isolante.

Questo particolare PCM, avendo una transizione di fase a temperature maggiori rispetto ai casi precedenti, fa sì che il gradiente che si viene a creare in prossimità del PCM non sia adeguato a favorire lo scambio termico e quindi ad attivarlo. Inoltre, nel caso in cui venga attivato, anche in questa applicazione si ripresenta il problema della cessione del calore nella fase di rilascio: avendo il materiale una transizione di fase a temperatura maggiore (24-26°C) dei PCM prima testati, accade che il PCM si trovi a temperatura superiore a quella dell'ambiente, ne consegue che, nella fase di scarica, possa diventare fonte di calore per la serra, condizioni da evitare assolutamente.

La Figura 7.15 mostra l'andamento della temperatura nella stagione estiva, durante il periodo più caldo la temperatura interna supera la massima temperatura consentita nella serra.

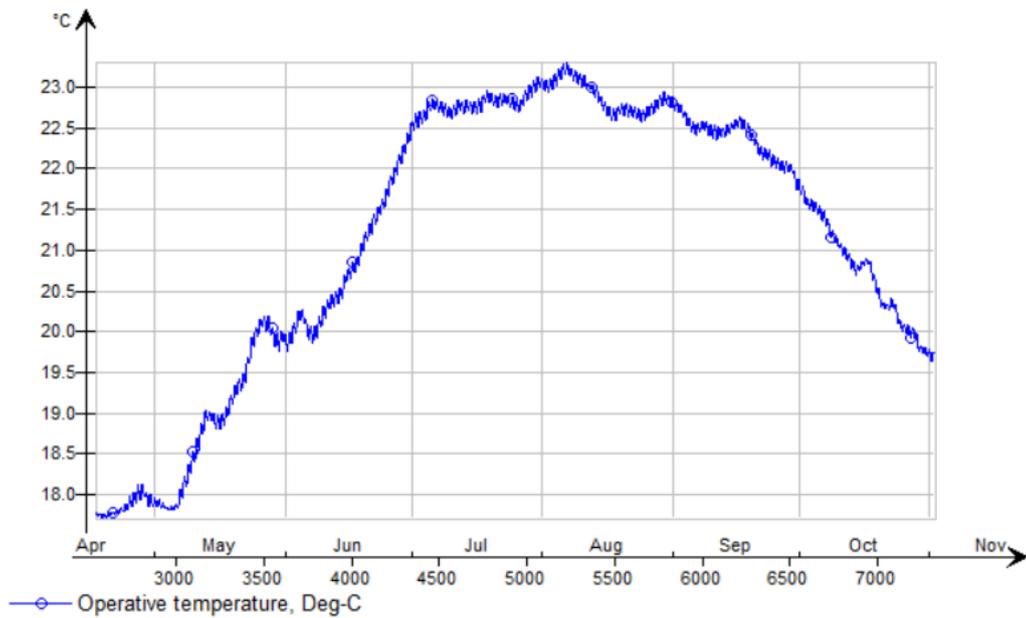


Figura 7.15- Andamento temperatura interna con PCM 25 prima dell'isolante

Anche l'andamento della potenza mostra una leggera riduzione rispetto al caso senza PCM ma non abbastanza apprezzabile da portare all'applicazione di questo materiale per il caso studio in esame.

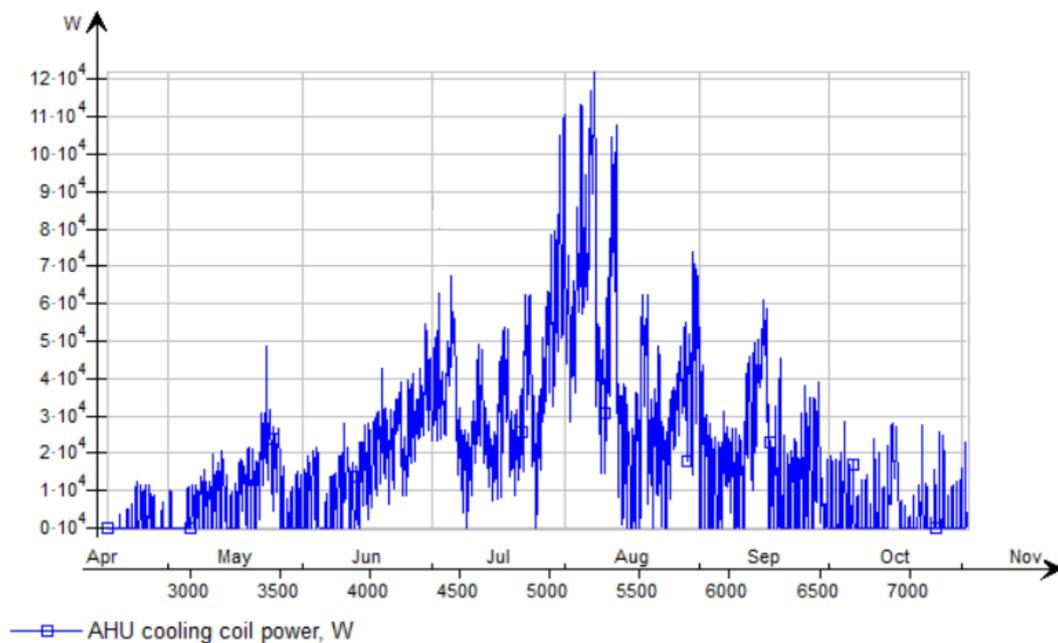


Figura 7.16- Andamento potenza termica con PCM 25 prima dell'isolante

7.1.4 PCM 27

Applicando un PCM 27 dopo l'isolante la temperatura interna non viene in alcun modo variata rispetto al caso senza PCM, poiché la temperatura di transizione di fase è compresa tra i 26 e 28°C, temperature mai raggiunte in quest'applicazione dal PCM quando viene posto dopo l'isolante. Pertanto, il suo contributo in termini di riduzione di temperatura interna e risparmio di potenza termica è nullo rispetto al caso in cui non viene integrato il PCM nel sistema.

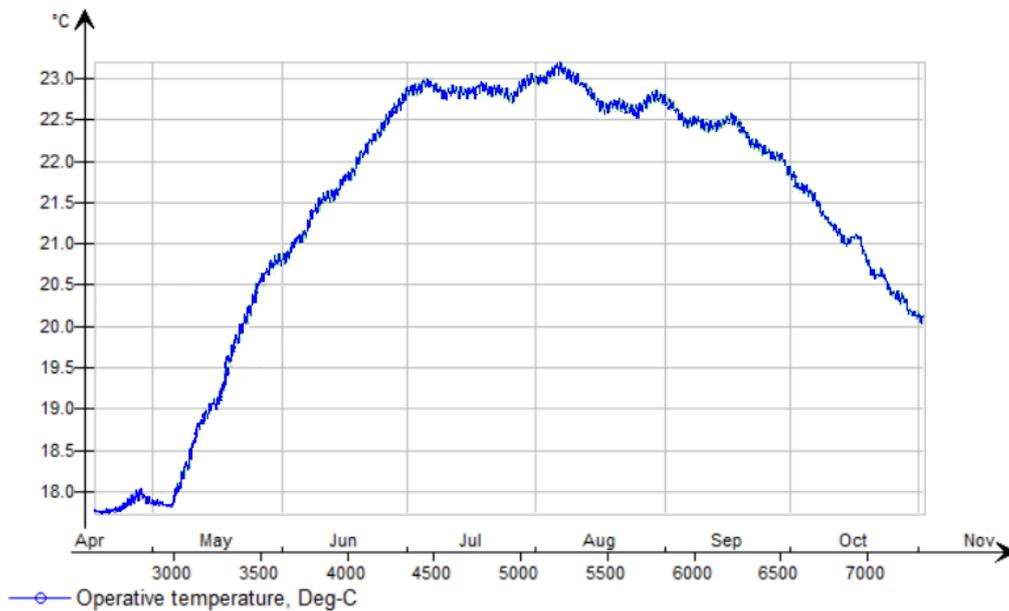


Figura 7.17- Andamento temperatura interna con PCM 27 dopo l'isolante

Non attivandosi mai il PCM risulta come un normale strato all'interno della stratigrafia, ne consegue che anche l'andamento della potenza termica richiesta risulta molto simile al caso in cui non vi è l'integrazione del PCM nel sistema, senza quindi alcun risparmio sulla potenza da garantire al sistema.

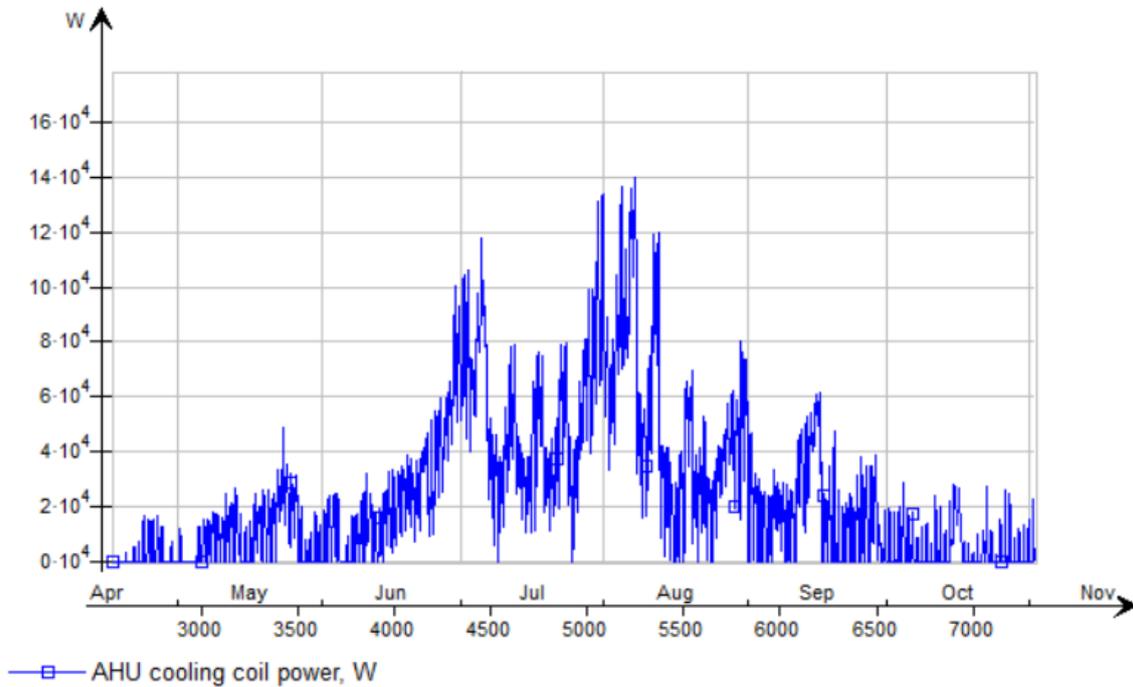


Figura 7.18- Andamento potenza termica con PCM 27 dopo l'isolante

Per quanto riguarda il caso del PCM posto prima dell'isolante valgono le stesse considerazioni fatte per il PCM 25, anzi in questo caso risulta ancora più complicato lo scambio termico vista l'alta temperatura di fusione rispetto ai casi precedenti, ne consegue che il beneficio termico e il risparmio sulla potenza fornita è minimo.

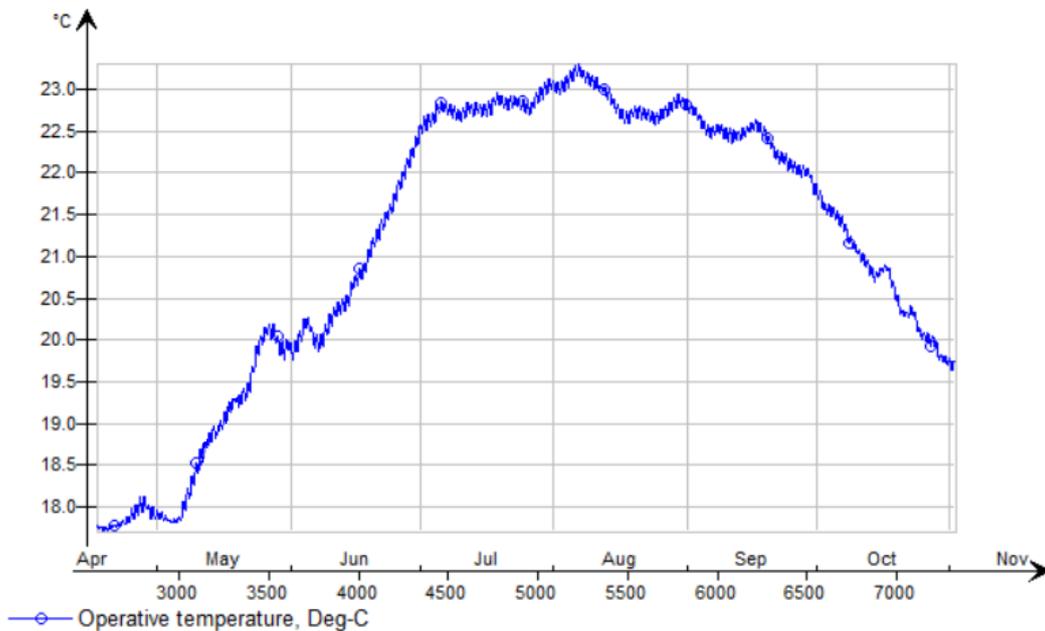


Figura 7.19- Andamento temperatura interna con PCM 27 prima dell'isolante

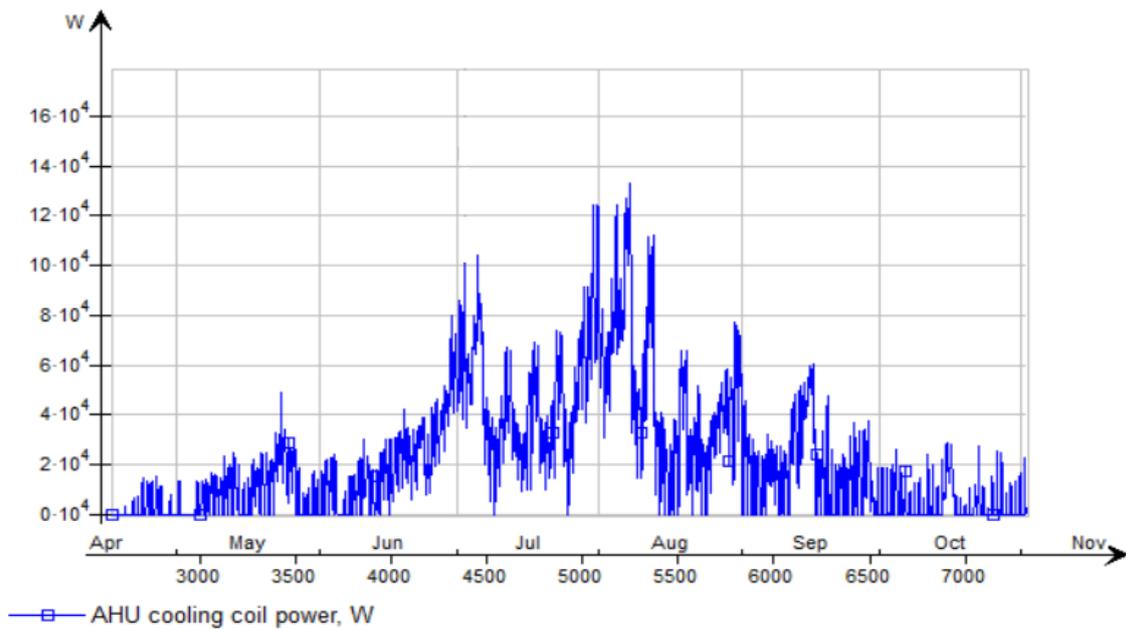


Figura 7.20- Andamento potenza termica con PCM 27 prima dell'isolante

Gli ultimi due PCM (25 e 27) sono stati testati per avvalorare l'ipotesi iniziale che non fossero adatti a quest'applicazione vista la significativa differenza tra la loro temperatura di lavoro e le richieste termiche della serra.

7.1.5 SCELTA PCM

In conclusione, vengono confrontati gli andamenti di temperatura interna conseguenti all'utilizzo del PCM posto prima dell'isolante, poiché in tutte le prove si dimostra più efficace rispetto al caso in cui è posto dopo l'isolante. Il confronto viene ristretto tra i due PCM più adatti all'applicazione in esame: il PCM 21 e il PCM 22.

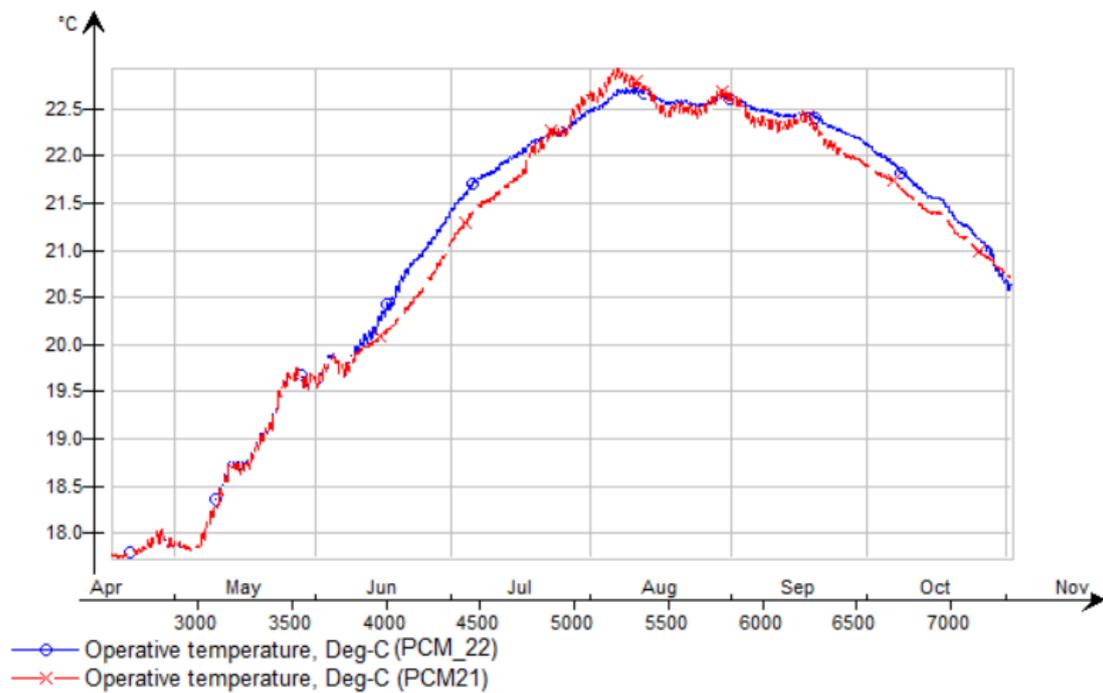


Figura 7.21-Confronto andamento temperatura interna con PCM 21 e PCM 22

L'andamento dei due casi in esame risulta simile, presentando comunque alcune piccole differenze.

Nel mese di maggio i due andamenti sono quasi coincidenti, mentre nel mese successivo si nota come il PCM 21, avendo una temperatura di transizione di fase più bassa, si attiva prima rispetto al PCM 22 e infatti la crescita della temperatura interna risulta più lenta e controllata; in questa fase il PCM 21 lavora in maniera più efficace e la temperatura interna differisce di circa 0,5°C.

Nella fase successiva però, quando si verificano le temperature più calde della stagione, il PCM 22 viene completamente attivato dal gradiente termico più elevato che si forma in prossimità della sua posizione nella stratigrafia e riesce a garantire una temperatura interna più bassa rispetto al PCM 21 ormai saturo vista la sua inferiore temperatura di cambiamento di fase. Questo periodo risulta essere il più critico della stagione poiché una temperatura

interna eccessivamente alta porterebbe al danneggiamento delle microalghe che necessitano di stringenti vincoli termici da rispettare.

Pertanto, il PCM 22 risulta essere il materiale più adatto per lo scenario 1.

Il confronto finale tra il sistema in cui è applicato il PCM 22 e quello classico, senza PCM, mostra come l'andamento della temperatura interna risulta, con l'applicazione del materiale a cambiamento di fase, inferiore rispetto al caso senza PCM.

Nel periodo più caldo dell'anno la differenza di temperatura interna è piuttosto marcata tra i due casi, poiché il gradiente termico in quel periodo è tale da attivare in modo continuativo il PCM e quindi si verifica un accumulo di energia termica proveniente dall'esterno che contribuisce a mantenere costante la temperatura interna per tutto l'arco temporale analizzato.

Il picco di temperatura interna che avviene nelle settimane più calde dell'anno, le prime di agosto, viene sfasato temporalmente e ridotto.

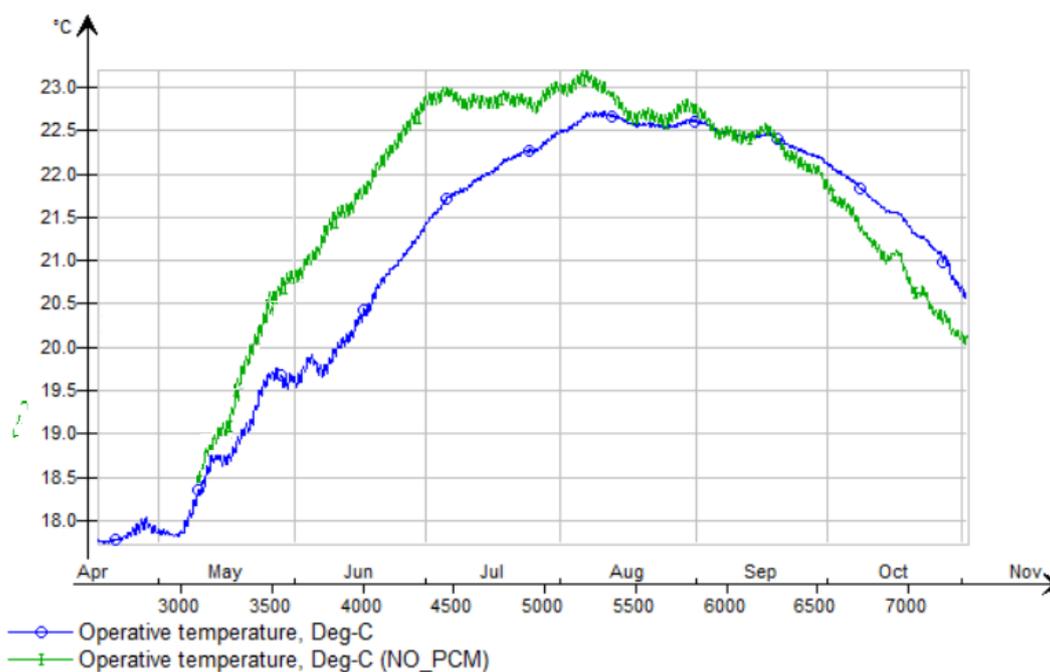


Figura 7.22-Confronto temperatura interna con/senza l'integrazione di PCM

Nella fase di scarica dell'energia accumulata nel periodo più critico, il PCM cede questo calore latente all'ambiente e all'esterno dell'edificio alla temperatura a cui cambia di fase, solidificandosi.

Il PCM 22 scelto per questa applicazione, cambiando di fase tra 21°C e 23°C, quindi rilascia questo calore a temperature che non rischiano di riscaldare, involontariamente, la serra.

Qualora si scegliesse un PCM con temperatura di fusione più alta si rischierebbe che, nella fase di rilascio di calore, il PCM diventi una sorta di sorgente calda che andrebbe a riscaldare l'ambiente, ciò comporterebbe l'accensione dell'impianto di climatizzazione con conseguenti costi.

Mentre la scelta di un PCM con temperatura di transizione di fase troppo bassa comporterebbe il rischio che, nella fase serale in cui dovrebbe avvenire la rigenerazione del materiale, la temperatura esterna minima non sia sufficiente per garantire un rilascio completo del calore accumulato nella giornata dal PCM; ne conseguirebbe che il PCM nella giornata successiva si presenterebbe non completamente solido e quindi con minor capacità di accumulare calore.

Confrontando le potenze termiche si nota come la richiesta nel caso in cui venga integrato il PCM sia ridotta rispetto al caso senza PCM. Nel periodo più caldo della stagione la potenza di raffreddamento necessaria risulta particolarmente diminuita e il picco di richiesta viene ridotto in modo considerevole dall'impiego del PCM.

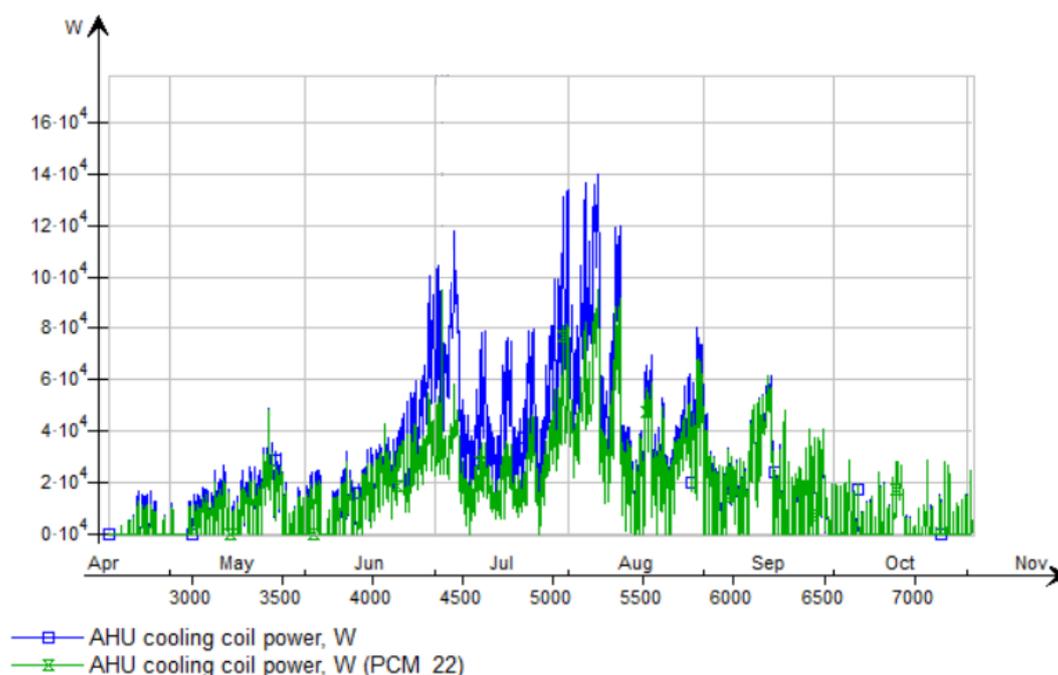


Figura 7.23-Confronto potenze termiche richieste nel caso estivo

La potenza di picco dell'impianto si riduce da 146 kW, nel caso senza PCM, a 98 kW, con l'applicazione del PCM 22. Ciò consente in fase di progettazione dell'impianto di ridurre le dimensioni dell'impianto di climatizzazione, con conseguente risparmio economico.

Durante la stagione invernale è richiesta all'interno della serra una temperatura di 18°C, scegliendo un PCM con cambiamento di fase che avviene a temperature superiori non ci si attende una significativa variazione di potenza termica da fornire alla serra tra il caso con PCM integrato e quello senza PCM, poiché il materiale a cambiamento di fase raggiunge raramente le temperature a cui avviene la transizione di fase.

Le simulazioni con PCM integrato nella stratigrafia e senza PCM presentano un andamento di potenza termica praticamente identico.

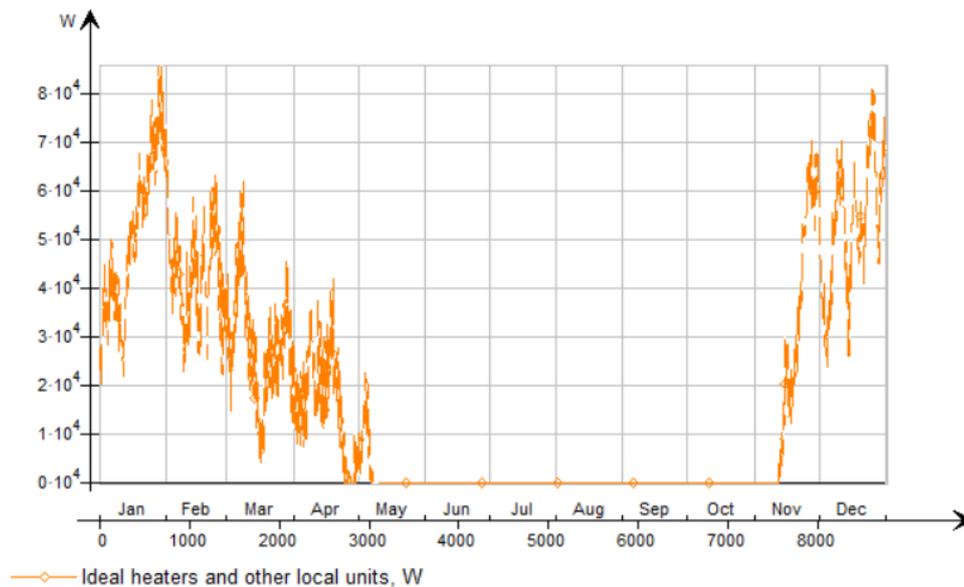


Figura 7.24-Potenza termica fornita nel caso invernale (PCM integrato)

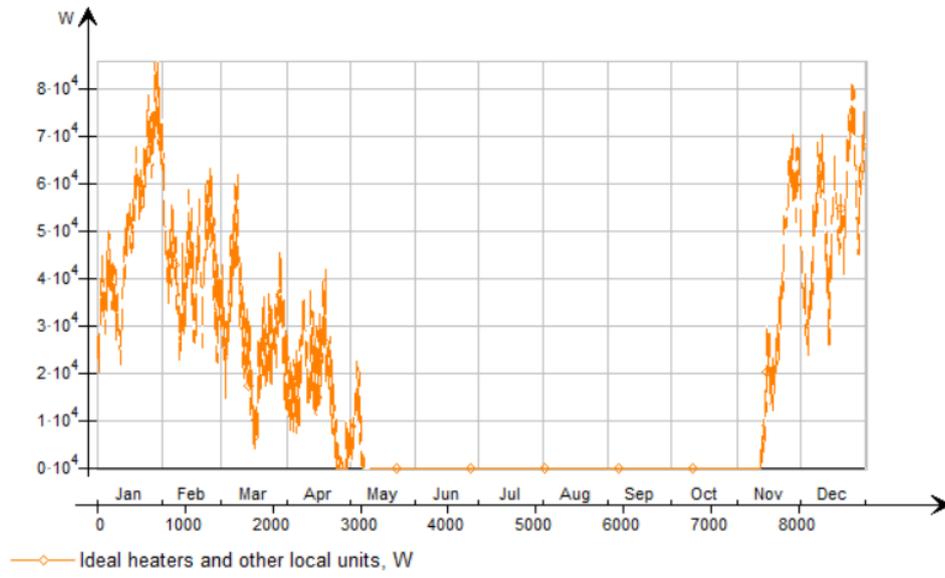


Figura 7.25- Potenza termica fornita nel caso invernale (PCM non integrato)

7.2 SCENARIO 2

Nel secondo scenario l'integrazione del PCM non avviene nella stratigrafia delle pareti, ma tramite pannelli appesi nella parte superiore della serra.

L'inserimento del PCM all'interno della struttura ha lo scopo di migliorare l'interazione tra il materiale a cambiamento di fase e l'ambiente e di conseguenza ridurre le fluttuazioni di temperatura nell'arco della giornata, diminuire le richieste di potenza di raffrescamento e contenere i consumi energetici.

7.2.1 SCELTA PCM

In questa circostanza la scelta del PCM risulta più vincolata: bisogna tenere in considerazione la temperatura dell'aria di immissione nella serra e la temperatura richiesta in ambiente.

Nel caso in esame la temperatura di immissione è pari a 19°C, mentre la temperatura richiesta all'interno della serra di 23°C, ne consegue che la scelta è ricaduta sul PCM 21, la cui transizione di fase avviene tra i 20 e 22°C.

I PCM con temperature di transizione di fase superiori vengono esclusi poiché, una volta che il PCM ha assorbito calore diventando liquido, nella successiva fase di rilascio si creerebbe un gradiente termico rilevante tra la temperatura del PCM e la temperatura dell'aria immessa, ne conseguirebbe che l'aria immessa andrebbe a rigenerare il PCM, solidificandolo, e non raffredderebbe l'ambiente interno.

Pertanto, la scelta del PCM 21 comporta che quando il materiale ha svolto la funzione di assorbire calore sottraendolo all'ambiente diventando liquido, il gradiente che si forma tra il PCM 21 e l'aria immessa è minimo, ne consegue che lo scambio termico convettivo risulta trascurabile.

L'andamento della temperatura interna durante la stagione estiva risulta inferiore con l'inserimento di pannelli integrati con PCM rispetto al caso senza PCM.

Il beneficio termico risulta nullo nei primi mesi della simulazione poiché la sollecitazione termica indotta dalle temperature esterne non è abbastanza rilevante da attivare il PCM.

Durante i mesi più caldi, quando la temperatura esterna aumenta, il PCM 21 viene attivato, accumulando energia, e garantendo una temperatura interna inferiore, con conseguente beneficio per il microclima adatto alle microalghe.

Quando il materiale a cambiamento di fase riesce ad ‘operare’ ne scaturisce che i picchi di temperatura interna, in relazione al caso senza PCM, vengono attenuati e sfasati temporalmente.

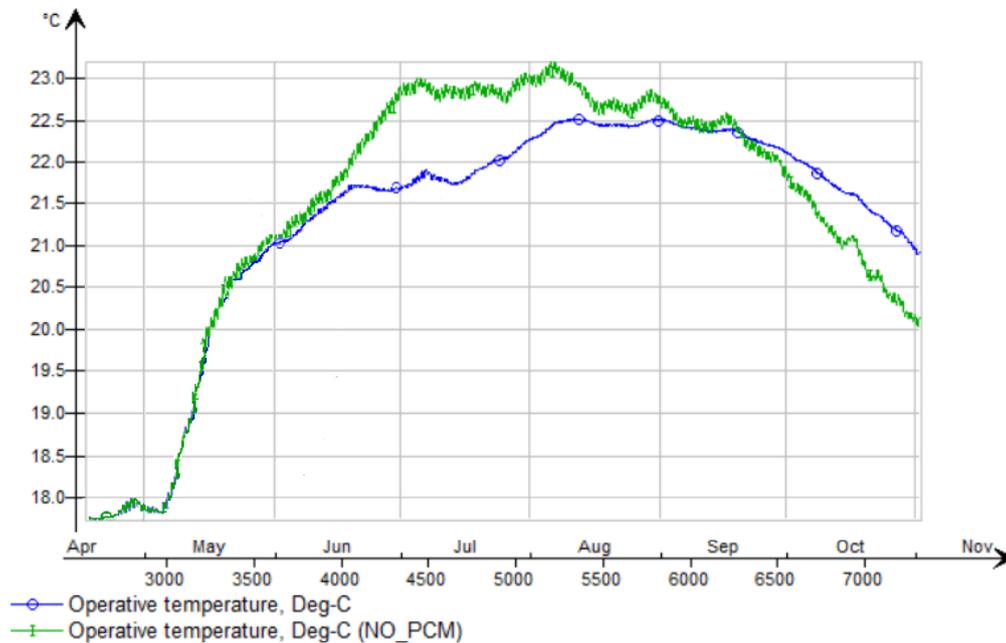


Figura 7.26- Confronto temperatura interna con/senza l'integrazione di PCM

Il PCM non viene sempre attivato, e quindi non sempre può contribuire a migliorare le condizioni interne.

Nella Figura 7.27 viene rappresentato l'andamento della temperatura nel caso in cui il PCM venga attivato, 5 agosto, confrontandolo con l'andamento che si avrebbe nel caso in cui il PCM non fosse presente.

Il materiale a cambiamento di fase consente di smorzare le fluttuazioni di temperatura interna e ridurre la temperatura massima che viene sfasata temporalmente.

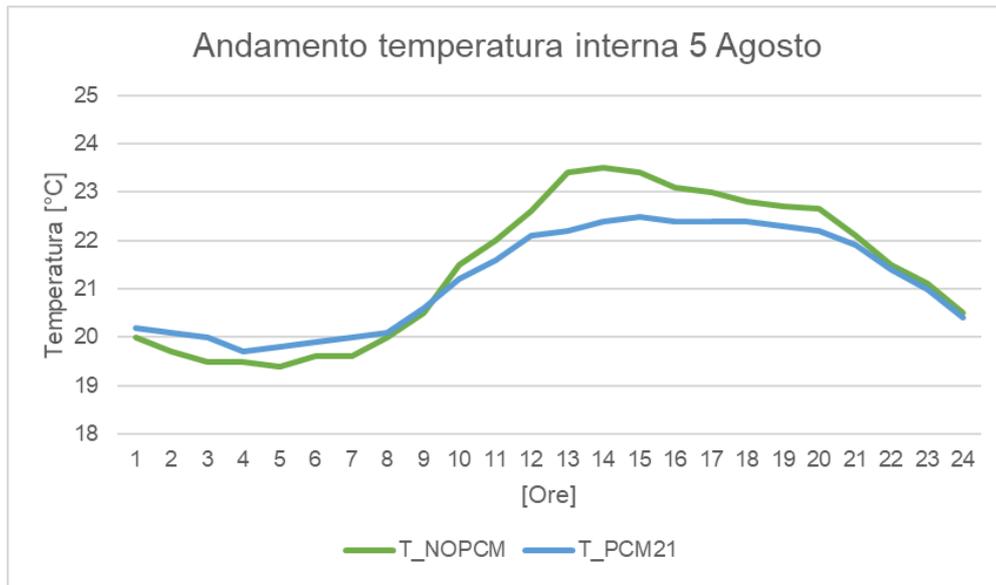


Figura 7.27- Diagramma andamento della temperatura interna

Nel caso in cui invece non venga attivato il suo contributo è del tutto trascurabile come accade il 20 maggio.

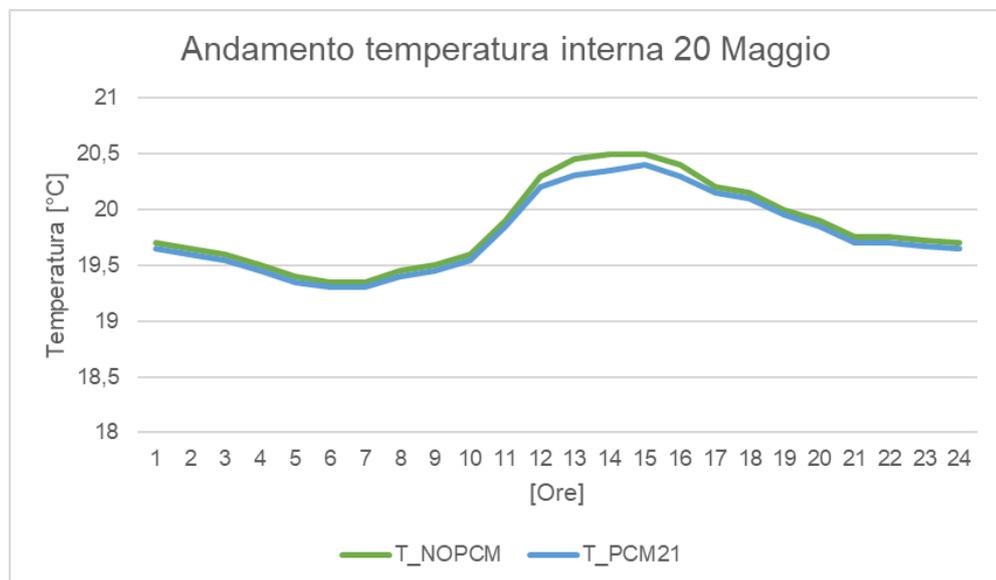


Figura 7.28-Diagramma andamento della temperatura interna

Il picco di potenza richiesta nel caso di inserimento del PCM risulta inferiore rispetto al caso senza PCM poiché proprio nelle settimane più calde dell'estate il PCM viene attivato in maniera continua e permette una sostanziale riduzione della potenza termica necessaria al raffrescamento. In tutto il periodo estivo la richiesta di potenza termica risulta

significativamente ridotta rispetto al caso senza integrazione di PCM. Nel caso invece in cui il PCM non riesca ad operare, come nel caso primaverile, la potenza termica richiesta risulta molto simile al caso senza PCM.

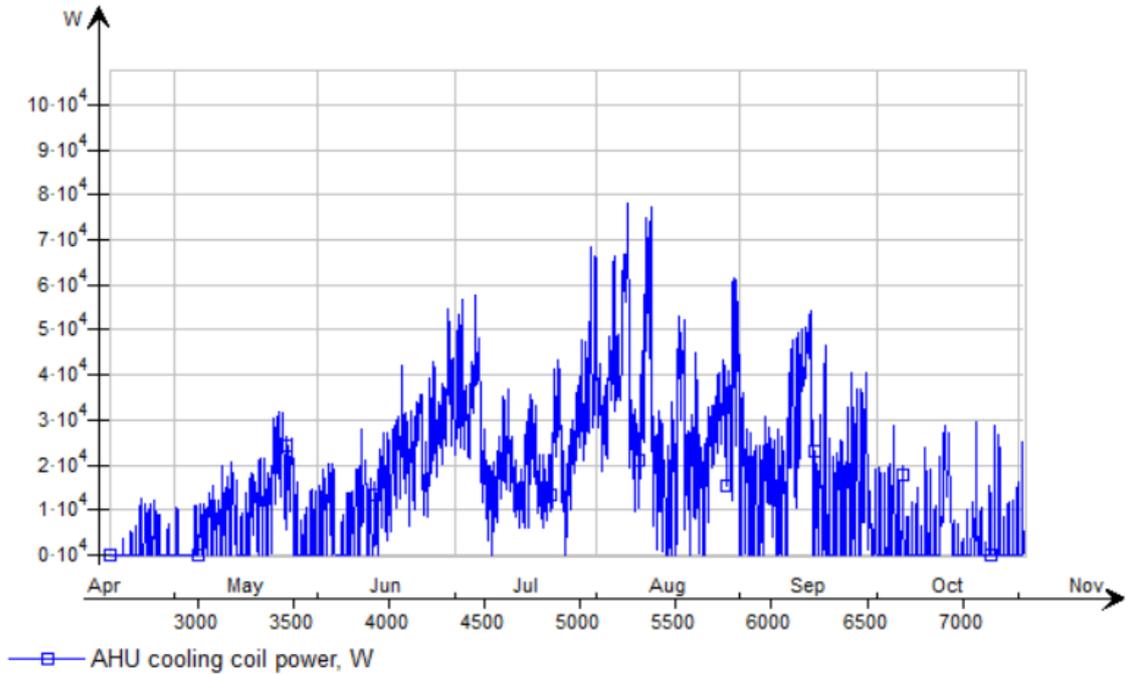


Figura 7.29- Andamento potenza termica con PCM 21 inserito nei pannelli

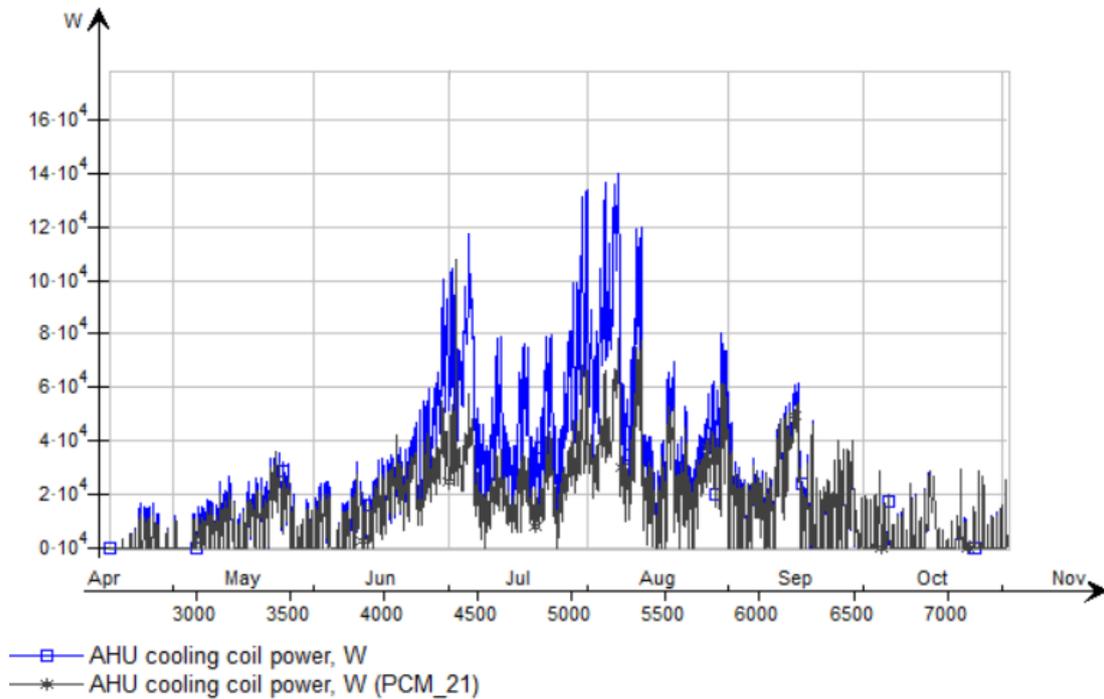


Figura 7.30- Confronto potenze termiche richieste nel caso estivo

7.3 CONSIDERAZIONI FINALI

In entrambi gli scenari l'applicazione di un PCM adatto ha portato a benefici in termini di temperatura interna della serra e potenza termica di raffrescamento richiesta.

La scelta del PCM più idonea deve tenere in considerazione una serie di fattori esterni:

- condizioni climatiche del luogo in cui si opera;
- le condizioni termiche richieste all'interno della struttura;
- le attività che vengono svolte all'interno del capannone industriale.

Nello scenario 1 risulta più appropriato l'utilizzo del PCM 22 che consente di gestire in maniera ottimale il periodo dell'estate più caldo mantenendo la temperatura massima all'interno della serra entro la temperatura consentita: 23°C.

Nello scenario 2 il PCM viene inserito all'interno della serra, in appositi pannelli. In questa circostanza il PCM è a stretto contatto con l'aria presente in ambiente, pertanto nella scelta del materiale a cambiamento di fase da adottare è necessario considerare la temperatura di immissione dell'aria e la temperatura dell'ambiente stesso al fine di evitare un errato utilizzo del PCM. Il PCM più adatto risulta essere quello con temperatura di fusione pari a 21°C.

La riduzione di potenza termica richiesta nei mesi estivi comporta un risparmio energetico sui consumi; nella Figura 7.31 vengono rappresentati i fabbisogni energetici per il raffrescamento.

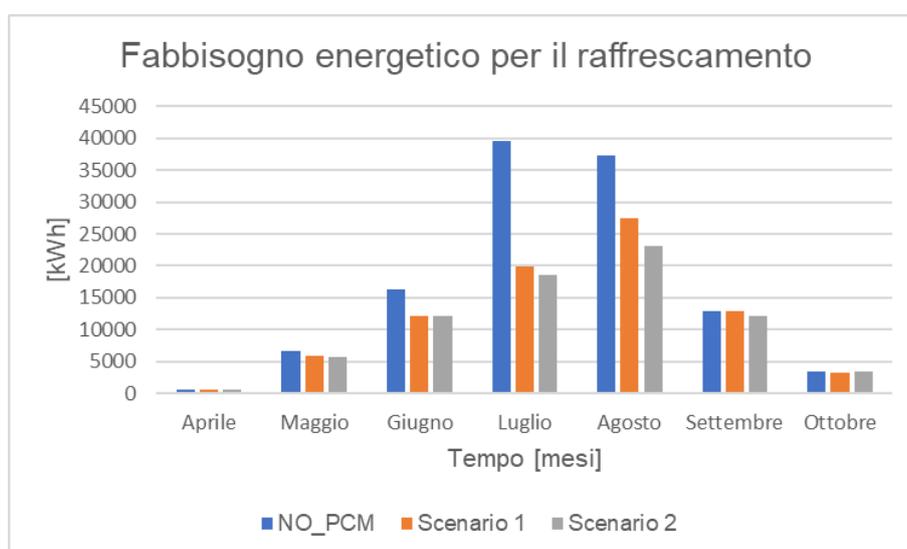


Figura 7.31- Consumi energetici

In entrambi gli scenari l'integrazione del PCM comporta, rispetto al caso senza PCM, un risparmio energetico che risulta maggiore nei mesi più caldi quando il PCM si attiva con continuità.

Il risparmio sul fabbisogno energetico annuale per il raffrescamento della serra è riportato nella Tabella 11.

| % | RISPARMIO ENERGETICO |
|------------|-----------------------------|
| Scenario 1 | 29,7 |
| Scenario 2 | 35,2 |

Tabella 11- Percentuale risparmio energetico

Da un punto di vista economico l'utilizzo del PCM non è sempre conveniente poiché il prezzo, per ora, raggiunge valori ancora considerevoli e quindi l'investimento per l'acquisto e la messa in opera del PCM può essere superiore al risparmio dei costi derivanti dal sottodimensionamento dell'impianto di climatizzazione e dal risparmio sui consumi.

8. CONCLUSIONI

Lo scopo di questa tesi è stato quello di valutare i possibili benefici dell'integrazione dei materiali a cambiamento di fase (PCM) all'impianto di climatizzazione per una serra adibita alla produzione di microalghe. Nello specifico l'intento del lavoro è stato quello di verificare se l'applicazione del PCM potesse comportare alcuni vantaggi progettuali, una gestione più efficiente dell'impianto di climatizzazione e un migliore comfort interno.

I materiali a cambiamento di fase sono in grado di accumulare, oltre il calore sensibile, anche elevate quantità di calore latente durante la loro transizione di fase mantenendo costante la propria temperatura. Pertanto, la loro integrazione all'interno di involucri edilizi può consentire uno smorzamento della fluttuazione della temperatura interna da cui ne consegue un comfort migliore negli ambienti interni e una richiesta di potenza termica inferiore e quindi un risparmio energetico.

Il materiale a cambiamento di fase accumula un'elevata quantità di calore latente solo nel range di temperature in cui avviene il cambiamento di fase, pertanto in base alla scelta del PCM il suo impiego risulta utile solamente in un certo periodo dell'anno.

Nel caso in esame i materiali a cambiamento di fase sono stati selezionati per contribuire a contenere la temperatura interna e la potenza termica richiesta dalla serra nel periodo estivo, quando le condizioni esterne risultano più critiche e le richieste termiche da garantire nella serra molto stringenti.

Nella fase sperimentale sono stati valutati due possibili scenari di integrazione del PCM nella serra.

Nel primo scenario il materiale a cambiamento di fase è stato inserito all'interno della stratigrafia della struttura edilizia, mentre nel secondo l'integrazione è avvenuta all'interno di pannelli di cartongesso disposti all'interno della serra, nella parte superiore, in prossimità delle bocchette di immissione dell'aria.

Entrambe le simulazioni sono state eseguite sul software di simulazione dinamica degli edifici IDA *Indoor Climate and Energy* (IDA ICE), con il quale è stato possibile approssimare le caratteristiche termiche del PCM durante il suo cambiamento di fase.

Nel primo scenario il PCM è stato inserito prima e dopo (lato interno della stratigrafia) l'isolante per analizzare quale fosse la posizione più appropriata. Inoltre, è stato valutato quale fosse la temperatura di fusione del PCM più adatta per il caso studio.

Dalla simulazione dinamica è emerso come la posizione più efficace fosse quella prima dell'isolante poiché, visto che la sollecitazione termica che attiva il PCM è indotta dall'irraggiamento e dalla convezione incidenti sull'involucro, si instaura un gradiente di temperatura maggiore in prossimità del PCM che consente di attivare la sua transizione di fase e quindi la sua grande capacità di accumulo termico. In questo modo si interrompe il flusso di calore verso l'interno della serra e si garantisce un comfort interno migliore e una potenza termica di raffrescamento più contenuta.

Uno svantaggio dei materiali a cambiamento di fase è la bassa conducibilità termica, pertanto, visto che la trasmissione del calore avviene tramite il fenomeno della conduzione, è fondamentale che il gradiente termico sia tale da favorire un apprezzabile scambio termico da cui ne consegue il cambiamento di fase del PCM.

La sollecitazione termica esterna risulta sufficiente ad attivare il processo termico soprattutto nei mesi estivi, quando la temperatura esterna è maggiore e quindi il gradiente termico nella stratigrafia significativo.

I PCM testati sono stati quelli con transizione di fase compatibile con l'applicazione nell'ambito dell'edilizia; ovvero con temperatura media di fusione compresa tra i 20 e i 27°C.

L'analisi sui risultati finali mostra come nel periodo più caldo dell'anno il PCM riesca ad attivarsi con continuità, ne deriva che sia i picchi di temperatura interna che di richiesta di potenza di raffrescamento risultino più contenuti con una conseguente riduzione dei consumi energetici.

La riduzione dei picchi di potenza comporta anche la possibilità di sottodimensionare l'impianto di climatizzazione e la rete di distribuzione.

Il PCM più adatto in questo scenario risulta essere quello con temperatura media di fusione pari a 22°C, poiché oltre a ridurre i consumi energetici del 29% rispetto allo scenario in cui il PCM non viene integrato nel sistema, gestisce in maniera ottimale la temperatura interna della serra nel periodo più caldo dell'anno. Inoltre, la fase di rilascio del calore accumulato avviene alla sua temperatura di transizione di fase (21-23°C), e quindi si esclude il rischio che il PCM in questo frangente possa risultare una sorgente calda per la serra. La temperatura esterna anche nei mesi più caldi scende costantemente sotto i 20°C, quindi la fase di rilascio può essere favorita tramite l'apertura delle finestre o la modalità *free cooling* dei terminali di immissione.

Nel secondo scenario il PCM viene inserito in appositi pannelli di cartongesso che vengono posti all'interno della serra, nella parte superiore, in prossimità delle bocchette di immissione dell'aria in ambiente.

In questo caso la scelta del PCM viene influenzata dalla temperatura interna desiderata (23°C) e dalla temperatura di immissione in ambiente (19°C).

Il PCM scelto in questo scenario è quello con temperatura media di fusione pari a 21°C, con range di cambiamento di fase compreso tra 20 e 22°C. Ne consegue che, una volta terminata la funzione di accumulo di calore, il PCM non interagisce più con l'ambiente poiché il gradiente termico con l'aria immessa è minimo e di conseguenza la potenza termica scambiata per convezione.

Durante il periodo primaverile il PCM viene attivato raramente, poiché la temperatura interna non raggiunge mai valori elevati da portare il materiale alla transizione di fase, in questa fase la potenza termica necessaria risulta praticamente identica al caso in cui il PCM non sia presente.

Dall'altro canto il funzionamento del PCM risulta efficace nei periodi più caldi dell'anno quando la sollecitazione termica esterna risulta significativa. La riduzione della potenza termica di raffrescamento richiesta rispetto allo scenario senza PCM comporta un risparmio energetico complessivo del 35%.

Inoltre, la temperatura all'interno della serra ha un andamento più stazionario con una riduzione e sfasamento temporale considerevole dei picchi.

Dai risultati ottenuti si può notare come in entrambi gli scenari il PCM riesca, riducendo i picchi, a garantire uno smorzamento della fluttuazione della temperatura interna nella serra e una richiesta di potenza termica inferiore con conseguente risparmio energetico.

Attualmente questa tecnologia comporta costi di investimento molto onerosi che non ne favoriscono la diffusione su larga scala. D'altronde come ogni innovazione tecnologica in via di sviluppo l'investimento economico risulta svantaggioso.

Probabilmente nel prossimo futuro con ulteriori valutazioni e analisi sui materiali a cambiamento di fase ed una maggiore certezza sui benefici termici e sui risparmi energetici, con conseguente aumento considerevole della domanda, potrebbe portare il costo del PCM a scendere a prezzi più appetibili per il mercato e quindi a rendere vantaggioso il suo utilizzo. In questa tesi non viene affrontata un'analisi sui possibili risparmi economici dall'applicazione del PCM poiché attualmente il prezzo risulta essere ancora elevato, ma

questo ambito rappresenta comunque un tema interessante da affrontare per valutare quale possa essere un prezzo consono dei PCM per incoraggiarne l'espansione sul mercato.

BIBLIOGRAFIA

1. Akeiber H., Nejat P., Zaimi Abd. Majid M., Wahid M.A., Jomwzadeh F., Famileh I.Z., Calautit J.K., Hughes B.R., Zaki S.A., “A review on phase change materials (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes”
2. Caliano M., Mongibello L., Di Somma M., Graditi G. Studio ed analisi dei materiali a cambiamento di fase per l’accumulo del freddo e delle relative applicazioni, 2016.
3. Dal Prà M., Inverter per Motori ASincroni Trifasi, 2008
4. Dieckmann J.H. Latent heat storage in concrete, Technische Universitat Kaiserslautern, 2006.
5. Etheridge D., Murphy K., Reay D.A. A PCM/heat pipe cooling system for reducing air conditioning in buildings: review of options and report on fields tests. Building Services Engineering Research & Technology, 2006.
6. Ferrari L., I Materiali a cambiamento di fase, 2017.
7. Helm M., Keil C., Hiebler S., et al., Solar heating and cooling system with absorption chiller and low temperature latent heat storage: energetic performance and operational experience, International Journal of Refrigeration 2009.
8. Kuznik F., Virgone J., Roux J.-J., Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation, Energy and Buildings, 2008.
9. Lazzarin R.M. L’accumulo di energia termica: nuove tecnologie e possibilità applicative. Thermal energy storage: new technologies and possible applications, 2014.
10. Noro M. Potenzialità e limiti dell’utilizzo dei PCM (Phase change Materials) nello stoccaggio termico.

11. Oxyvap Evaporative Cooling Applications, Oxycom Fresh Air BV, 2015
12. Scaramella, I., *Materiali a cambiamento di fase in edilizia: principi e applicazioni*
13. Sedeh M.M., Khodadadi J.M. Thermal conductivity improvement of phase change materials/graphite foam composites. *Carbon*, 60, 2013.
14. Sènagri, S., *Analyse pour la culture d'algues et la production d'huile végétale*, Algamoil France.
15. Sun Y., Wang S., Xiao F., Gao D. Peak load shifting control using different cold thermal energy storage facilities in commercial buildings: A review. *Energy Conversion and Management*, 2013.
16. Turnpenny J.R., Etheridge D.W., Reay D.A. Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings: part I: testing and theoretical modeling. *Applied Thermal Engineering*, 2011.
17. Yanbing K., Yi J., Yinping Z., Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system—NVP system, *Energy and Buildings*, 2003.

SITOGRAFIA

1. https://it.wikipedia.org/wiki/Acido_stearico
2. https://www.robur.it/area_tecnica/dossier_tecnici/raffrescamento_evaporativo/il_raffrescamento_evaporativo_o_adiabatico
3. <https://www.ingenio-web.it/3224-ledilizia-di-domani-e-gia-oggi-i-pcm-nuova-frontiera-delledificare-efficiente>
4. <http://www.mygreenbuildings.org/2014/12/14/materiali-a-cambiamento-di-fase-e-involucro-edilizio.html> microincapsulamento
5. http://tesi.cab.unipd.it/60872/1/Mariella_Matteo_1114630.pdf
6. <https://www.oxy-com.com/en/welcome/>
7. <https://www.teknoing.com/guide/guide-architettura/guida-ai-pcm-i-materiali-a-cambiamento-di-fase/>
8. https://www.casaclima.com/ar_8874__TECH-Ricerche-pcm--calore--rilascio--materiali--cambiamento-di-fase-PCM-sviluppi-di-applicazione-dalledilizia-al-solare.html
9. <https://www.ingenio-web.it/3224-ledilizia-di-domani-e-gia-oggi-i-pcm-nuova-frontiera-delledificare-efficiente>

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|--|----|
| Figura 2.1-Gradiente di temperatura in un serbatoio d'acqua in funzione dell'altezza dal fondo con evidenziato il termoclino [9, Bibliografia] | 9 |
| Figura 2.2-Confronto capacità accumulo [9, Bibliografia] | 11 |
| Figura 2.3- Curva riscaldamento di un materiale [5, Sitografia]..... | 11 |
| Figura 2.4-Classificazione accumuli termici | 12 |
| Figura 2.5-Classificazione materiali utilizzati come PCM [4, Bibliografia]..... | 16 |
| Figura 2.6-Classificazione PCM [7, Sitografia] | 17 |
| Figura 2.7-L'acido stearico fa parte degli acidi grassi [1, Sitografia] | 19 |
| Figura 2.8-Effetto del sottoraffreddamento nel caso di accumuli termici latenti. A sinistra: piccolo subcooling con nucleazione. A destra: grande subcooling senza nucleazione [5, Sitografia] | 20 |
| Figura 2.9-Microcapsule di paraffina [4, Sitografia]..... | 25 |
| Figura 2.10-PCM sfruttato nei sistemi free cooling [17, Bibliografia] | 27 |
| Figura 2.11-Riduzione e ritardo temporale nel carico di raffrescamento di picco [1, Bibliografia] | 28 |
| Figura 2.12-Carico termico di raffrescamento [15, Bibliografia] | 29 |
| Figura 2.13-Unità prototipo disposte attorno al ventilatore [16, Bibliografia] | 30 |
| Figura 2.14-Rappresentazione schematica dell'installazione del sistema a tubo di calore con PCM [16, Bibliografia]..... | 31 |
| Figura 2.15-Sistema di raffrescamento ad adsorbimento con accumulo in PCM [7, Bibliografia] | 32 |
| Figura 2.16-PCM inserito nella stratigrafia dell'edificio [8, Bibliografia] | 34 |
| Figura 2.17-PCM utilizzato in edilizia per ridurre il fabbisogno energetico per raffreddare l'ambiente [8, Sitografia]..... | 34 |
| Figura 3.1-Inquadramento territoriale: fonte Google Earth | 37 |
| Figura 3.2-Pianta serra..... | 39 |
| Figura 3.3-Rappresentazione serra su IDA ICE | 40 |
| Figura 3.4-Fotobioreattori [14, Bibliografia] | 41 |
| Figura 3.5-Linea di produzione A [14, Bibliografia] | 42 |
| Figura 3.6-Stadi di lavorazione per la produzione di biodiesel a partire da biomassa algale | 43 |
| Figura 3.7-Parametri geografici..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.8-Andamento temperatura esterna anno 2018..... | 44 |
| Figura 4.1-Raffrescamento adiabatico..... | 47 |
| Figura 4.2-Schema Raffreddamento evaporativo [2, Sitografia] | 48 |
| Figura 4.3-Andamento condizioni esterne [2, Sitografia] | 49 |
| Figura 4.4-Pannello in alluminio marine-grade [6, Sitografia] | 50 |
| Figura 4.5-Schema raffreddamento evaporativo diretto [11, Bibliografia]..... | 52 |
| Figura 4.6-Raffreddamento evaporativo diretto [11, Bibliografia] | 53 |
| Figura 4.7-Schema raffreddamento evaporativo diretto-indiretto [11, Bibliografia]..... | 53 |
| Figura 4.8-Raffreddamento evaporativo indiretto [11, Bibliografia] | 54 |
| Figura 4.9-Raffreddamento evaporativo diretto-indiretto sul diagramma psicrometrico [6, Sitografia] | 55 |
| Figura 4.10-Schema impianto elettrico | 56 |
| Figura 4.11-Andamento potenza e coppia in funzione frequenza [3, Bibliografia] | 57 |
| Figura 4.12-Vista laterale del terminale [6, Sitografia]..... | 58 |
| Figura 4.13-Vista dall'alto del terminale [6, Sitografia]..... | 58 |
| Figura 5.1-Schedulazione impianto elettrico..... | 60 |
| Figura 5.2-Caso estivo..... | 61 |
| Figura 5.3-Andamento potenza termica di raffrescamento senza l'integrazione di PCM nel sistema | 61 |
| Figura 5.4- Funzionamento impianto nelle giornate estive [6, Sitografia]..... | 62 |
| Figura 5.5- Funzionamento impianto nelle giornate estive afose [6, Sitografia] | 63 |
| Figura 5.6-Andamento frequenza cumulata | 65 |
| Figura 5.7-Schema funzionale pianta serra | 67 |
| Figura 5.8-Vista laterale terminale di immissione | 68 |
| Figura 5.9-Modello 3d rappresentante la rete di distribuzione in una linea di produzione della serra (1) [Software Dialux]..... | 69 |
| Figura 5.10-Modello 3d rappresentante la rete di distribuzione in una linea di produzione della serra (2) [Software Dialux] | 69 |
| Figura 5.11-Miscelamento adiabatico | 71 |
| Figura 5.12-Caso invernale..... | 72 |
| Figura 5.13-Funzionamento impianto caso invernale [6, Sitografia]..... | 73 |
| Figura 5.14- Funzionamento impianto stagione primavera-autunno [6, Sitografia] | 74 |
| Figura 6.1-Andamento calore specifico PCM 22 | 76 |
| Figura 6.2-Grafico curve entalpiche PCM 22 | 76 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.3- Impostazione parametri del materiale a cambiamento di fase (PCM22) sul software IDA ICE..... | 77 |
| Figura 6.4- Calore accumulato in funzione della temperatura di fusione del PCM [12, Bibliografia] | 80 |
| Figura 6.5- PCM inserito dopo l'isolante | 83 |
| Figura 6.6- PCM inserito prima dell'isolante..... | 83 |
| Figura 6.7- Pannelli in cartongesso integrati con PCM [9, Sitografia] | 84 |
| Figura 6.8- Modello 3d relativo ad una linea di produzione all'interno della serra [Software Dialux]..... | 84 |
| Figura 7.1- Serra su IDA ICE..... | 87 |
| Figura 7.2- Rappresentazione pianta serra IDA ICE..... | 87 |
| Figura 7.3- Andamento potenza termica senza l'integrazione di PCM nella serra | 88 |
| Figura 7.4- Andamento temperatura interna senza l'integrazione di PCM nella serra | 89 |
| Figura 7.5- Andamento temperatura interna con PCM 22 prima dell'isolante | 90 |
| Figura 7.6- Andamento temperatura interna con PCM 22 dopo l'isolante | 90 |
| Figura 7.7- Andamento potenza termica con PCM 22 prima dell'isolante | 91 |
| Figura 7.8- Andamento potenza termica con PCM 22 dopo l'isolante | 92 |
| Figura 7.9- Andamento temperatura interna con PCM 21 prima dell'isolante | 92 |
| Figura 7.10- Andamento temperatura interna con PCM 21 dopo l'isolante | 93 |
| Figura 7.11- Andamento potenza termica con PCM 21 prima dell'isolante..... | 94 |
| Figura 7.12- Andamento potenza termica con PCM 21 dopo l'isolante | 94 |
| Figura 7.13- Andamento temperatura interna con PCM 25 dopo l'isolante | 95 |
| Figura 7.14- Andamento potenza termica con PCM 25 dopo l'isolante | 96 |
| Figura 7.15- Andamento temperatura interna con PCM 25 prima dell'isolante | 97 |
| Figura 7.16- Andamento potenza termica con PCM 25 prima dell'isolante..... | 97 |
| Figura 7.17- Andamento temperatura interna con PCM 27 dopo l'isolante | 98 |
| Figura 7.18- Andamento potenza termica con PCM 27 dopo l'isolante | 99 |
| Figura 7.19- Andamento temperatura interna con PCM 27 prima dell'isolante | 99 |
| Figura 7.20- Andamento potenza termica con PCM 27 prima dell'isolante..... | 100 |
| Figura 7.21- Confronto andamento temperatura interna con PCM 21 e PCM 22..... | 101 |
| Figura 7.22- Confronto temperatura interna con/senza l'integrazione di PCM..... | 102 |
| Figura 7.23- Confronto potenze termiche richieste nel caso estivo | 103 |
| Figura 7.24- Potenza termica fornita nel caso invernale (PCM integrato)..... | 104 |
| Figura 7.25- Potenza termica fornita nel caso invernale (PCM non integrato)..... | 105 |

| | |
|---|-----|
| Figura 7.26- Confronto temperatura interna con/senza l'integrazione di PCM..... | 107 |
| Figura 7.27- Diagramma andamento della temperatura interna | 108 |
| Figura 7.28-Diagramma andamento della temperatura interna | 108 |
| Figura 7.29- Andamento potenza termica con PCM 21 inserito nei pannelli | 109 |
| Figura 7.30- Confronto potenze termiche richieste nel caso estivo | 109 |
| Figura 7.31- Consumi energetici | 110 |

INDICE DELLE TABELLE

| | |
|---|-----|
| Tabella 1- PCM organici [10, Bibliografia] | 18 |
| Tabella 2- PCM inorganici [9, Bibliografia] | 21 |
| Tabella 3- PCM eutettici [9, Bibliografia]..... | 22 |
| Tabella 4- Vantaggi e svantaggi PCM [10, Bibliografia]..... | 23 |
| Tabella 5- Grandezze geometriche serra | 37 |
| Tabella 6- Stratigrafia pavimento controterra | 38 |
| Tabella 7- Stratigrafia pareti esterne | 38 |
| Tabella 8- Stratigrafia copertura..... | 38 |
| Tabella 9- Intrcooll | 64 |
| Tabella 10- Composizione PCM | 75 |
| Tabella 11- Percentuale risparmio energetico | 111 |

RINGRAZIAMENTI

Prima di tutti vorrei ringraziare il Prof. Masoero per i consigli che mi ha dato durante tutto il percorso di stesura della tesi e per il tempo dedicatomi.

Inoltre, ringrazio l'Ing. Surra e i suoi collaboratori che mi hanno aiutato e supportato nell'approfondire ambiti che mai avevo affrontato.

Ringrazio la mia famiglia, per il costante supporto in tutti questi anni faticosi ma ricchi di soddisfazioni.

Vorrei anche ringraziare tutti quei compagni che ho incontrato in questo percorso e con cui ho condiviso ore di studio e fatiche; molti di loro sono diventati poi anche amici e questa è sicuramente la vittoria più importante. Un ringraziamento particolare a Luigi, Pierpaolo e Santo che hanno sempre dimostrato di essere persone con cui potere confidare i miei dubbi e le mie incertezze dandomi consigli che ho sempre apprezzato.

Ringrazio i miei coinquilini, il loro supporto è stato fondamentale per la stesura della tesi.

Infine, ringrazio tutti i miei amici, in particolare Andrea, Gabriele e Enrico: so che troppo spesso sono stato assente nell'ultimo periodo, ma nonostante questa mia mancanza nei pochi incontri che abbiamo avuto mi hanno sempre incoraggiato e hanno sempre avuto una parola di supporto.