



Ricerca di Sistema elettrico

Ottimizzazione energetica delle celle refrigerate per lo stoccaggio ed il trasporto di prodotti alimentari utilizzando Materiali a Cambiamento di Fase (PCM)

Paolo Principi, Benedetta Copertaro, Roberto Fioretti

OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA DELLE CELLE REFRIGERATE PER LO STOCCAGGIO ED IL TRASPORTO DI
PRODOTTI ALIMENTARI UTILIZZANDO MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM)

Paolo Principi, Benedetta Copertaro, Roberto Fioretti

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

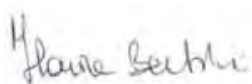
Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

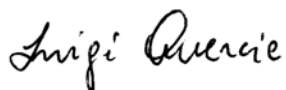
Obiettivo: "Tecnologie del freddo"

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: "Ottimizzazione energetica delle celle refrigerate per lo stoccaggio ed il trasporto di prodotti alimentari freschi mediante l'utilizzo di Materiali a Cambiamento di Fase (PCM) sia per realizzare pannelli multistrato che all'interno della cella stessa"

Responsabile scientifico ENEA: Luigi Quercia



Responsabile scientifico Università Politecnica delle Marche: Prof. Ing. Paolo Principi



Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE	6
2 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	11
2.1 VANTAGGI OFFERTI DAL PCM	14
2.2 MODALITÀ DI INSERIMENTO DEL PCM	15
2.2.1 <i>Sullo strato interno delle pareti (scambio termico sono per convezione naturale).....</i>	15
2.2.2 <i>In uno scambiatore a valle dell'evaporatore</i>	16
2.2.3 <i>PCM integrato nell'evaporatore.</i>	17
3 PROVE SPERIMENTALI.....	18
3.1 CELLA FRIGORIFERA DI PROVA	18
3.2 PCM E TECNOLOGIA DI APPLICAZIONE	20
3.3 SISTEMA DI ACQUISIZIONE	22
3.3.1 <i>Taratura sonde.....</i>	25
3.4 PROGRAMMA DI PROVA.....	28
3.5 RISULTATI	29
3.5.1 <i>Confronto funzionamento a regime (cella vuota).....</i>	29
3.5.2 <i>Confronto funzionamento in caso di black out (cella vuota)</i>	31
3.5.3 <i>Confronto funzionamento in caso di black out (cella piena).....</i>	32
3.5.4 <i>Confronto funzionamento in caso di apertura delle porte.....</i>	33
3.5.5 <i>Confronto funzionamento durante le fasi di carico della merce</i>	33
4 TOOL DI DIMENSIONAMENTO DEL PCM.....	34
4.1 PREMessa	34
4.2 REQUISITI DEL SISTEMA.....	35
4.3 STRUTTURA DEL FOGLIO DI CALCOLO	36
4.4 DATI DI INPUT.....	37
4.4.1 <i>Caratteristiche geometriche e impiantistiche</i>	37
4.4.2 <i>Carico e viaggio.....</i>	39
4.4.3 <i>Merce trasportata.....</i>	40
4.4.4 <i>Scelta del PCM</i>	41
4.5 RISULTATI	42
4.5.1 <i>Calcolo dei carichi termici attraverso l'involucro</i>	42
4.5.2 <i>Calcolo delle infiltrazioni.....</i>	43
4.5.3 <i>Calcolo del carico termico sensibile.....</i>	44
4.5.4 <i>Calcolo del carico termico dovuto alla respirazione.....</i>	45
4.5.5 <i>Energia consumata</i>	45
4.5.6 <i>Calcolo delle emissioni di CO₂</i>	46
5 CONCLUSIONI.....	47
5.1 PASSAGGI FONDAMENTALI DELLA RICERCA.....	47
5.2 RISULTATI DELLA RICERCA	48
5.2.1 <i>Analisi sperimentale.....</i>	48
5.2.2 <i>Tool di calcolo</i>	50
5.3 INDICAZIONI PROGETTUALI.....	50
5.4 CONSIDERAZIONI FINALI	51
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	52
7 CURRICULUM SCIENTIFICO DEI COMPONENTI DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ.	54
7.1 CV - PAOLO PRINCIPI.....	54

7.2	CV- ROBERTO FIORETTI.....	55
7.3	CV- BENEDETTA COPERTARO	55
8	ALLEGATO A – DATI CLIMATICI	56
9	ALLEGATO B – TABELLA CONTENUTO D’ACQUA E CALORE EMESSO PER EVAPORAZIONE DEI MATERIALI	78
10	ALLEGATO C – SCHEDE TECNICHE DEI PCM	83

Sommario

L'obiettivo delle analisi è stato quello di verificare i benefici energetici legati alla presenza di materiali a passaggio di fase (PCM) nel vano interno delle celle frigorifere. Il PCM ha il compito di assorbire i carichi termici che si sviluppano all'interno del vano refrigerato, sommati a quelli che provengono dall'esterno, termostatando la temperatura interna dell'aria a quella di set-point, funzionando ad integrazione o in sostituzione della macchina frigorifera. Per realizzare tale applicazione il PCM è stato installato in una intercapedine ventilata in corrispondenza dell'evaporatore della macchina frigorifera.

Per tale lavoro sono state effettuate diverse valutazioni, sia relative al beneficio dato dal PCM in abbinamento alla macchina frigorifera, con l'obiettivo di ottenere un risparmio energetico e una migliore condizione di mantenimento della merce, e una seconda in sostituzione della macchina frigorifera, per verificare il funzionamento "passivo" della cella come nel caso di interruzione dell'alimentazione elettrica o malfunzionamento della macchina.

Le principali fasi di questa ricerca hanno avuto come oggetto:

- Lo studio teorico e del funzionamento del PCM applicato all'interno delle celle frigorifere;
- La realizzazione di prototipi di manufatti atti a consentire l'applicazione del PCM all'interno delle celle frigorifere;
- L'analisi sperimentale per verificare il comportamento di questa applicazione;
- La valutazione dei benefici ottenuti e delle possibilità di miglioramento dell'efficienza energetica;
- La realizzazione di un tool informatico per il dimensionamento e la simulazione del PCM da applicare con le modalità proposte.

Il tool che è stato sviluppato consiste in un foglio di calcolo (Excel) destinato ai gestori delle celle avente lo scopo di indicare come dotare la cella frigorifera, prima di un trasporto, di un elemento contenente il PCM. Questo permetterà di implementare la cella con un sistema inerziale con lo specifico tipo di PCM, con lo spessore ottimizzato per aumentare il rendimento della macchina frigorifera, in funzione del tipo di merci da trasportare, del contesto climatico e del viaggio. Una volta inseriti questi parametri è possibile già calcolare i carichi termici, i consumi termici ed elettrici previsti e le emissioni di CO₂ previste.

Dai dati dei carichi termici e a partire dalla temperatura di set-up interno è possibile effettuare la scelta e il dimensionamento del PCM. Una volta fatta questa scelta è possibile avere le ore di autonomia prevista e l'energia termica che il PCM può assorbire.

I risultati vengono forniti in forma tabellare e grafica, e la finestra è pronta per essere stampata sotto formula di modulo in formato A4.

1 Introduzione

La globalizzazione del commercio internazionale ha incrementato la distanza tra il produttore ed il consumatore, rendendo disponibili ovunque prodotti alimentari e non. Pertanto mantenere elevati gli standard di qualità, sicurezza ed igiene lungo tutta la filiera alimentare (dalla produzione alla vendita) è diventata una sfida significativa. In risposta ai crescenti problemi di sicurezza alimentare sono state quindi sviluppate una serie di normative come le ISO 22000 del 2005 [1] relative alla gestione e sicurezza alimentare. Queste ultime consentono a tutte le aziende coinvolte nella filiera, di identificare in modo preventivo i rischi a cui sono esposte e di gestirli in modo efficace. Il trasporto dei prodotti deperibili e le relative attrezzature utilizzate vengono invece disciplinati dall' accordo ATP (o *Accord Transport Perissable*) il cui scopo è quello di facilitare il traffico internazionale fissando i limiti di temperatura che devono essere mantenuti nei veicoli stradali, vagoni ferroviari e containers marittimi. Al tempo stesso l'attuale internazionalizzazione del commercio alimentare sta determinando un notevole impatto ambientale risvegliando pertanto l'attenzione dell'opinione pubblica. Ad esempio secondo stime inglesi, il settore alimentare commerciale compresa l'agricoltura, il trasporto, lo stoccaggio e la vendita al dettaglio è responsabile per il 22 % delle emissioni totali di gas serra del Regno Unito [2]. Nello specifico è stimato come il trasporto del cibo, che include l'energia per la movimentazione dei mezzi e la loro refrigerazione, sia responsabile dell'1.8 % delle emissioni totali [3]. In questo contesto assume una particolare rilevanza la cosiddetta "catena del freddo", termine con il quale si intende l'insieme delle attrezzature frigorifere e dei comportamenti degli operatori che garantiscono, secondo quanto prescritto dalla legge, il mantenimento della temperatura del prodotto (surgelato o refrigerato) sempre costante dalla produzione, al trasporto fino al momento del consumo [4]. Nello specifico il trasporto e lo stoccaggio giocano un ruolo molto importante rappresentando al tempo stesso le due fasi più critiche di tutta la filiera del freddo [5]. Negli ultimi anni la ricerca ha indagato la possibilità di migliorare le prestazioni delle vetrine commerciali refrigerate, dei frigoriferi domestici e dei mezzi di trasporto refrigerati applicando i cosiddetti materiali con cambiamento di fase (PCM). Tali materiali innovativi sfruttano l'assorbimento del calore latente di fusione tra lo stato solido e il liquido per aumentare resistenza ed inerzia termica, e lo rilasciano passando da liquido a solido sfasando temporalmente i carichi termici. E' ben noto come i sistemi refrigerati sono soggetti a continue variazioni di temperatura in seguito alla frequente apertura delle porte, ai carichi termici che attraversano l'involucro, al calore generato dal ciclo di sbrinamento ed all'eventuale mancanza di corrente elettrica: tutti questi fattori determinano nel tempo l'aumento del numero dei cicli on-off del compressore, quindi del consumo energetico [6] [7]. La prima possibile applicazione dei materiali in passaggio di fase è volta a migliorare il rendimento energetico di frigoriferi domestici. In questo caso i PCM sono stati posizionati sul lato posteriore dell'evaporatore migliorandone pertanto l'efficienza ed offrendo al tempo stesso una capacità di accumulo termico tale da permettere la conservazione frigorifera per molte ore in assenza di elettricità. Questo risultato è stato raggiunto da Azzouz et al. nel 2008 [8] mediante analisi numerica e successivamente nel 2009 [9] mediante analisi sperimentale. Le analisi numeriche hanno dimostrato come l'applicazione della piastra contenente PCM determini un aumento del COP in funzione della temperatura esterna, del numero di aperture della porta e della temperatura a cui avviene il passaggio di fase del materiale. Durante le analisi sperimentali l'aumento del COP, calcolato come rapporto tra il calore estratto dall'evaporatore e l'energia elettrica richiesta dal compressore, è risultato compreso tra il 10 ed il 30%. Inoltre è stato dimostrato come l'accumulo di calore latente sia in grado di fornire energia necessaria ad alimentare con continuità l'impianto anche in assenza di energia elettrica, fornendo al sistema un'autonomia di 5÷9 ore con l'applicazione di una lastra di appena 5 mm. Per migliorare l'efficienza energetica sono state condotte ricerche scientifiche anche sull'applicazione di PCM nel condensatore. Chenga et al. nel 2011 [10] hanno realizzato uno studio volto ad ottimizzare il trasferimento del calore dal condensatore all'ambiente esterno basato principalmente sulla convezione naturale. Generalmente, nei frigoriferi tradizionali i condensatori vengono addossati il più possibile alle pareti della cabina in modo tale da rendere la struttura complessiva molto più compatta. In questo senso è stato osservato come, l'aumento della distanza tra le due componenti determini un incremento dell'efficienza di circa il 2%.

Tuttavia è importante considerare un ulteriore aspetto: generalmente i compressori dei frigoriferi convenzionali lavorano in modo discontinuo determinando una intermittente dissipazione del calore da parte del condensatore. In questo senso se la dissipazione del calore avvenisse anche durante la fase off del ciclo refrigerativo, l'efficienza relativa al trasferimento del calore potrebbe migliorare determinando una diminuzione della temperatura di condensazione ed un maggiore risparmio energetico. Nello specifico in questo studio è stato sviluppato un frigorifero domestico dotato di condensatore, al quale è stato applicato un PCM forma-stabilizzata ad elevata conducibilità di calore. Le caratteristiche di funzionamento del nuovo modello appena proposto sono state quindi confrontate con quelle di un frigorifero tradizionale. I materiali realizzati (a base di paraffina, polietilene ad alta densità e grafite espansa) usati come accumulatori termici, consentono di ridurre la temperatura media del condensatore di 2.3 K. Pertanto dai risultati ottenuti sono stati riscontrati un aumento dello scambio termico a seguito di una costante dissipazione del calore da parte del condensatore ed una riduzione, in termini di consumo energetico, di circa il 12%. Un'altra ricerca ha indagato l'applicazione di PCM in pannelli posti contro le pareti interne di un surgelatore domestico. Gin et al. nel 2010 [11] hanno realizzato una ricerca volta ad indagare l'effettiva efficacia derivante dall'applicazione di pannelli con il PCM in un congelatore, con l'obiettivo di mantenere la temperatura stabile in seguito all'apertura delle porte ed al ciclo di sbrinamento. All'interno dell'evaporatore vi è un piccolo riscaldatore che, attivandosi ciclicamente, scioglie il ghiaccio formatosi su di esso determinando un carico termico all'interno del freezer. Come materiale a cambiamento di fase è stato utilizzata una soluzione dicloruro di ammonio in grado di cambiare di fase ad una temperatura di -15°C . Come contenitori sono stati impiegati pannelli in alluminio anodizzato (elevata capacità termica e protezione contro la corrosione) e quindi posizionati all'interno della stratigrafia dell'involucro coprendo il 26% della superficie ed occupando il 3% del volume di stoccaggio dell'intero congelatore. L'apparato sperimentale appena descritto è stato quindi utilizzato per valutare l'effettivo consumo energetico del frigo (con e senza PCM) in seguito al ciclo di sbrinamento (della durata di 30 minuti) ed apertura della porta. I test di consumo energetico hanno dimostrato come i carichi termici derivanti dal ciclo di defrost aumentano il consumo energetico del 15%÷21% e come invece l'inclusione del materiale con cambiamento di fase abbia ridotto tale consumo del 7%. Successivamente sono state condotte una serie di aperture delle porte con l'obiettivo di investigare la risposta della temperatura del freezer ai carichi termici da esse prodotti. In questo caso i test di consumo energetico hanno dimostrato come i carichi termici derivanti dall'apertura della porta aumentano il consumo energetico dell'11%÷17% e che l'inclusione del materiale con cambiamento di fase ha invece diminuito tale consumo dell'8%. Gin e Farid nel 2010 [12] hanno condotto un'indagine volta a dimostrare come, l'applicazione del materiale con cambiamento di fase possa mantenere invariata la qualità del cibo congelato durante le perdita di potenza del congelatore. Il PCM utilizzato è un eutettico (acqua e cloruro di ammonio con un punto di fusione pari a $-15,4^{\circ}\text{C}$) contenuto all'interno di pannelli in alluminio (10mm), installati sulle pareti del freezer. Per un periodo di due settimane sono stati indagati i carichi termici dovuti alla mancanza di corrente elettrica valutando la temperatura massima raggiunta nel freezer con e senza PCM. Successivamente sono state condotte le analisi volte a misurare la perdita di acqua su un campione di muscolo bovino di 1cm^3 e la dimensione dei cristalli di ghiaccio in un litro di blocchi di gelato alla vaniglia. E' stato dimostrato come la perdita di potenza da parte del congelatore senza PCM porti ad un picco di temperatura di -3°C conferendo una deviazione di temperatura dallo stato stazionario (-16°C) di 13°C ; un picco molto più basso (-11°C) viene invece raggiunto con l'applicazione del PCM all'interno della stratigrafia dell'involucro, determinando una deviazione massima di soli 5°C . Grazie all'applicazione dei materiali con cambiante di fase, la temperatura viene quindi mantenuta in un range pressoché costante determinando una riduzione della perdita di acqua nella carne (10% rispetto al 17% che si avrebbe in assenza di PCM) e della dimensione dei cristalli di ghiaccio ($40\text{-}50\text{ }\mu\text{m}$ rispetto ai $70\text{-}80\text{ }\mu\text{m}$ che si avrebbe in assenza di PCM). Rispetto alle unità refrigerative domestiche, risulta più difficile conservare in maniera adeguata i prodotti alimentari all'interno di grandi strutture commerciali o industriali. Uno dei punti di maggior criticità è l'elevata frequenza dell'apertura delle porte delle cabine refrigerative e le possibili interruzioni di corrente elettrica. A tale proposito nel 2012 Orò et al. [13] hanno condotto uno studio utilizzando PCM inseriti all'interno di pannelli in acciaio inossidabile (10 mm di spessore) e sulla parte superiore dei tubi dell'evaporatore. Successivamente all'interno del congelatore sono stati posti dei

pacchetti test (M-Pack) con l'obiettivo di simulare la massa termica del cibo all'interno del congelatore e valutare la variazione di temperatura degli stessi con condizioni al contorno variabili. Dai risultati ottenuti dal test di simulazione delle aperture delle porte (5 aperture per 30 secondi) e della mancanza di corrente elettrica si evince come la temperatura all'interno del freezer aumenti entro valori accettabili, così come quella dell'M-pack, grazie alla presenza di materiali con cambiamento di fase. In questo senso è importante sottolineare come sia fondamentale scegliere un PCM con una temperatura di cambiamento di fase vicina a quella di conservazione del freezer. Successivamente Orò et al. nel 2012 [14] hanno realizzato uno studio volto a determinare la risposta termica di un freezer, contenente materiale con cambiamento di fase, nel momento in cui si verificano guasti al sistema di refrigerazione. Questa applicazione è stata realizzata con l'obiettivo di simulare il trasporto di cibo congelato in furgoni o camion non refrigerati, designati per mantenere la temperatura del prodotto costante solo grazie all'isolamento.

I materiali con cambiamento di fase sono stati posti nelle pareti occupando il 3.36% del volume dell'intero freezer e le sperimentazioni condotte con e senza PCM e con e senza M-packs, al fine di ricostruire il comportamento della cabina a basse temperature quando è vuota e quando è piena. Dai risultati ottenuti è possibile dimostrare come l'applicazione del materiale con cambiamento di fase risulti utile nel mantenere le basse temperature durante lo stoccaggio ed il trasporto nel momento in cui il sistema di refrigerazione è spento. Infine per quanto riguarda il settore del trasporto refrigerato diversi autori hanno realizzato una serie di studi volti a determinare la distribuzione della temperatura in containers adibiti al trasporto internazionale. Lo studio dei gradienti di temperatura è un tema molto critico in quanto è necessario tener conto non solo dei carichi termici derivanti dalla differenza di temperatura tra l'ambiente interno e quello esterno, dalla radiazione solare incidente sulle superfici, dall'apertura delle porte ma anche dal tasso di trasferimento del calore tra il cibo e l'aria refrigerata. L'attività biotica di prodotti come ad esempio la frutta e la verdura molto spesso si traduce anche nella produzione di anidride carbonica ed etilene che generalmente vengono rimossi dall'ambiente interno grazie ai ricambi d'aria o mediante l'introduzione dell'aria fresca attraverso specifici condotti. Inoltre recenti sviluppi nel controllo della temperatura, l'imballaggio e le atmosfere controllate hanno notevolmente ridotto il carico termico derivante dall'attività metabolica degli alimenti diventando in alcuni casi irrilevante ai fini del calcolo dei carichi termici globali. D'altro canto l'unità refrigerante è una delle componenti chiave di tutto il sistema di trasporto in quanto ha il compito di mantenere il prodotto alla temperatura costante desiderata. Generalmente nei veicoli che trasportano merci congelate vi sono unità di refrigerazione a compressione di vapore azionate da un motore diesel; tuttavia questo sistema risulta altamente costoso e caratterizzato da una bassa efficienza (35÷40%), determinando quindi una maggiore richiesta di energia. Lo scarso rendimento è riconducibile alla necessità di componenti leggeri ed al limitato spazio in cui gli elementi dell'unità refrigerante vengono posizionati; molto spesso l'evaporatore viene posizionato vicino al condensatore ed al motore diesel determinando un aumento dei carichi termici. Simard e Lacroix nel 2003 [15] hanno validato e sviluppato un modello matematico costituito da piastre parallele riempite con del materiale con cambiamento di fase (acqua-glicole) in grado di assorbire il calore per tutta la durata del trasporto. Mentre il veicolo è in magazzino, il sistema di memorizzazione viene caricato da un'unità refrigerante collegata alla corrente elettrica. Una volta carico, il veicolo viene immesso in strada e la temperatura del vano refrigerato viene mantenuta al di sotto del punto di congelamento mediante la circolazione dell'aria tra le piastre. Questo sistema di stoccaggio è ritenuto robusto ed affidabile rispetto ai tradizionali sistemi che risultano rumorosi ed inquinanti ma anche soggetti ad innumerevoli guasti meccanici a causa delle vibrazioni trasmesse dalla strada. Tassou et al. nel 2009 [16] passano in rassegna le diverse tecnologie ed approcci generalmente impiegati nel trasporto degli alimenti refrigerati. In particolare gli autori fanno riferimento all'applicazione di PCM eutettici all'interno di tubi o piastre posizionate nel vano refrigerato con lo scopo di aumentare l'accumulo di energia e produrre l'effetto di raffreddamento desiderato. Liu et al. nel 2012 [17] propongono un nuovo sistema di refrigerazione per camion costituito da: un'unità di accumulo a cambiamento di fase interno e da un'unità di refrigerazione esterna che permetterà di caricare il PCM quando il veicolo non è in funzione e senza utilizzare un motore a combustione interna. In questo modo è possibile mantenere le basse temperature senza l'unità refrigerativa convenzionale interna al mezzo di trasporto. L'unità di accumulo termico a cambiamento di fase viene caricata quando il veicolo

non è in funzione, e si scarica all'interno del camion raffreddandolo quando questo è in servizio. Durante la sperimentazione è stato confrontato il costo, in termini di energia, di un sistema di refrigerazione con un motore a combustione interna e quello del sistema di refrigerazione appena proposto. I risultati hanno evidenziato una riduzione del costo energetico di oltre il 50% utilizzando l'innovativo sistema di refrigerazione, ipotizzando che il veicolo sia stato in servizio dalle 8.00 alle 18.00 per tutto l'anno e che vi siano dieci aperture al giorno degli sportelli. Generalmente nella progettazione di un involucro di un tipico veicolo refrigerato debbono essere considerate una serie di fattori come ad esempio le infiltrazioni di aria ed umidità ma anche il deterioramento fisico in seguito agli urti ed alle vibrazioni. Dati recenti mostrano come il valore dell'isolamento diminuisca del 3 - 5% all'anno portando quindi ad un notevole aumento della conducibilità termica dopo qualche anno. Se si presume un invecchiamento annuo del 5%, un veicolo con un iniziale coefficiente di scambio termico di $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$, dopo nove anni avrà un coefficiente pari a $0.62 \text{ W/m}^2\text{K}$ con un conseguente aumento del 50% del consumo di energia e di emissioni di anidride carbonica. In questo senso Ahamed et al. nel 2010 [18] hanno sviluppato un innovativo sistema di isolamento, integrando materiali con cambiamento di fase nelle pareti di un camion rimorchio standard, con l'obiettivo di ridurre il trasferimento di calore e mantenere la temperatura al suo interno costante. Nello specifico l'implementazione di tubi di rame contenenti materiali a cambiamento di fase all'interno della schiuma poliuretanica ha permesso di ottenere una riduzione del 29,1% nel trasferimento termico di picco, e circa del 16,3% nel trasferimento totale di calore. Ciò riduce la taglia dell'unità refrigerativa impiegata e diminuisce l'inquinamento prodotto dall'utilizzo di convenzionali unità refrigerative alimentate da motore diesel.

Gli studi sviluppati nei primi due anni di ricerca [19-21] hanno avuto lo scopo di valutare il risparmio energetico conseguibile nella refrigerazione di materiali deperibili con la temperatura utilizzando celle frigorifere il cui involucro, essenzialmente costituito da elevati spessori di materiale isolante polimerico, è stato implementato con uno strato di PCM (Phase Change Material). Questa pratica innovativa ha lo scopo di conferire alle pareti della cella caratteristiche di elevata inerzia termica, oltre alla tradizionale elevata resistenza termica ai carichi termici provenienti dall'ambiente esterno. La posizione dello strato di PCM all'interno delle pareti della cella frigorifera è stata fissata in corrispondenza della superficie esterna con lo scopo di far partecipare il materiale innovativo come scudo termico al flusso termico entrante dovuto all'assorbimento della radiazione solare da parte della superficie esterna dell'involucro e alla differenza di temperatura tra l'aria ambiente e quella refrigerata all'interno della cella. In questo modo il PCM per effetto dell'innalzamento di temperatura arriva alla fase di fusione, assorbendo il calore entrante a temperatura costante e producendo un risparmio energetico derivante dal mancato ingresso del suddetto calore nel vano refrigerato e quindi alla mancata richiesta di energia elettrica per l'attivazione del compressore del gruppo frigorifero. I risultati conseguiti hanno portato a valutare la percentuale di risparmio conseguibile intorno al 12%, confermata sia dalle indagini numeriche che da quelle sperimentali e ciò può essere considerato molto incoraggiante visto l'elevato grado di efficienza raggiunto dai sistemi frigoriferi.

In genere però i carichi termici entranti dalle superfici perimetrali nel volume refrigerato non sono gli unici in quanto le possibili aperture del portello per l'introduzione dei materiali deperibili e il calore emesso dalla respirazione di prodotti organici possono aumentare notevolmente l'energia termica entrante. Per questo risulta necessario assorbire anche il calore generato internamente o quello dovuto all'ingresso di aria dall'ambiente e materiali a temperatura più elevata.

Nel presente studio sono stati valutati i benefici energetici legati alla presenza di PCM nel vano interno della cella. Delle diverse possibilità di inserimento di PCM all'interno della cella, è stato scelto di inserire uno scambiatore con elementi contenenti PCM, installato in una intercapedine ventilata in corrispondenza dell'evaporatore della macchina frigorifera. I PCM utilizzati in questa applicazione non sono quelli studiati in precedenza in quanto i livelli di temperatura riscontrabili all'interno del vano sono nettamente inferiori a quelli che si possono misurare sulla superficie esterna della cella e questo comporta che le temperature di fusione del PCM deve essere compatibile con i rispettivi livelli di temperatura.

L'introduzione di PCM all'interno del volume delle celle frigorifere contribuisce alla stabilizzazione delle temperature interne, offrendo vantaggi nel caso in cui la merce trasportata richieda questa prestazione. Il PCM applicato all'interno della cella frigorifera funziona da volano termico in grado di assorbire e rilasciare calore in funzione della temperatura interna, riducendo così le variazioni repentine dovute sia ai cicli di accensione e spegnimento della macchina frigorifera che all'apertura della cella e al calore generato dai prodotti trasportati. Soprattutto nel comparto agricolo il processo di refrigerazione comporta la maggiore richiesta di energia rispetto alle altre fasi di lavorazione. I vegetali trasportati che vengono colti con un basso grado di maturazione emettono calore che fa aumentare il costo energetico per il raffreddamento e può determinare gradienti di temperatura interni che potrebbero incidere sulla omogeneità di maturazione dei vegetali stessi.

Inoltre la presenza del PCM all'interno del vano con la funzione di accumulo del freddo può essere di aiuto al fine di compensare eventuali malfunzionamenti temporanei della macchina frigorifera, causati ad esempio da black-out elettrici. In questo caso l'azione del PCM può garantire un periodo di tempo nel quale può assorbire il calore in eccesso sotto forma di calore latente, senza modificare la propria temperatura, mantenendo inalterata quella dell'aria nella cella frigorifera.

Al fine di valutare i benefici energetici di tale applicazione sono state eseguite prove sperimentali riguardanti l'integrazione del PCM all'interno della cella frigorifera, in corrispondenza dell'evaporatore della macchina frigorifera per verificare l'effetto sul comportamento termodinamico della stessa e calcolare i benefici in termini di:

- Innalzamento del valore di efficienza frigorifera e abbattimento dei costi energetici;
- Stabilizzazione della temperatura di uscita dall'evaporatore del flusso d'aria che, se troppo bassa o troppo alta, può determinare il deterioramento o congelamento della merce direttamente esposta;
- Incremento e il controllo dello scambio termico convettivo del PCM con l'ambiente refrigerato passando da naturale a forzato, con la possibilità di controllo al fine di stabilizzare la temperatura;
- Uniforme distribuzione delle temperature dell'aria nel vano per evitare fenomeni di stratificazione termica che determinerebbe diversi gradi di maturazione delle sostanze organiche nella direzione verticale.

Poiché, a seguito degli studi effettuati, le celle potranno cambiare assetto di accumulo freddo in funzione del tipo di materiale da trasportare e delle condizioni ambientali nelle quali avverrà il trasporto, è stato prodotto un semplice tool di calcolo capace di dare utili informazioni agli utilizzatori delle celle stesse. Questo strumento di valutazione permette di dotare la macchina frigorifera, prima di un trasporto, di un elemento contenente il PCM ottimizzando il sistema inerziale con lo specifico tipo di PCM idoneo al particolare materiale da trasferire e con lo spessore dello strato al valore ottimizzato per aumentare il rendimento della macchina frigorifera. Il calcolo viene effettuato tenendo conto delle condizioni al contorno, considerando le caratteristiche climatiche della zona di transito e tenendo conto della emissione termica delle sostanze da trasportare. In definitiva il tool consente di ottenere come output il tipo di PCM da inserire nello speciale vano all'interno della cella e le dimensioni del sistema di contenimento al fine di mantenere la temperatura costante nella cella, qualunque sia la natura del vegetale inserito e determinare elevati coefficienti di prestazione del gruppo frigo durante le diverse fasi del trasporto.

2 Principio di funzionamento

L'inserimento di materiali a passaggio di fase all'interno di celle o container frigoriferi adibiti al trasporto merci consente di avere una certa quantità di energia accumulata, da utilizzare nelle diverse fasi del viaggio ad integrazione o in sostituzione del gruppo frigorifero. Il PCM che viene inserito o portato preventivamente allo stato solido e quindi ha rilasciato energia per passare allo stato liquido, nel momento in cui le temperature salgono sopra il punto di fusione, inizia ad assorbire calore necessario al passaggio allo stato liquido.

Per iniziare questa fase di transizione tra solido a liquido, la temperatura dell'ambiente deve essere maggiore rispetto alla temperatura del PCM e innalzarsi oltre il punto di fusione. Durante il processo di fusione il PCM accumula l'energia data dal flusso termico che si instaura tra l'ambiente a temperatura maggiore e il PCM. Dato che il PCM assorbe energia sotto forma latente, e tale energia viene spesa per il passaggio di fase, il materiale tende a mantenere la propria temperatura costante intorno a quella di fusione. Quando il PCM è interamente allo stato liquido ha esaurito la propria capacità di assorbire calore, a meno della componente sensibile, che però risulta essere di molto inferiore e meno efficace di quella latente.

Un eventuale successivo abbassamento di temperatura della cella frigorifera permetterebbe al PCM di rilasciare di nuovo energia, ritornando allo stato solido. Si può ripetere questo processo diverse volte oppure effettuare un solo ciclo per ogni viaggio, in funzione dalla strategia che si sceglie di adottare.

La quantità di PCM da inserire nella cella frigorifera dipenderà dalle condizioni e dall'utilizzo a cui sarà sottoposta.

In particolare si possono identificare le seguenti cause che determinano un carico termico:

- Messa a regime della cella frigorifera: la cella tenuta spenta viene accesa e quindi viene sottratta energia per portare la cella e l'aria interna a una temperatura più bassa;
- Carichi termici attraverso l'involucro: si deve sottrarre l'energia termica che entra per una differenza di temperatura tra l'ambiente esterno e l'ambiente interno, e per effetto dell'irraggiamento solare;
- Introduzione di merce a temperatura più bassa rispetto a quella ambientale;
- Calore emesso durante la maturazione dei prodotti vegetali presenti nella cella;

Apertura della porta: scambio di massa d'aria tra esterno ed interno.

Le seguenti azioni comportano un incremento della temperatura interna dell'aria, e in una configurazione normale, attraverso l'intervento della macchina frigorifera si sottrae energia termica all'aria, abbassandone la temperatura fino ai livelli di set-point.

In tale meccanismo di scambio termico, ad ogni carico termico corrisponde l'accensione della macchina frigorifera che sottrae la stessa quantità di energia.

La presenza di PCM potrebbe intervenire in questo meccanismo integrando l'azione della macchina frigorifera nei seguenti modi:

- Ad integrazione: copertura dei picchi, al fine di ridurre la potenzialità della macchina frigorifera. La macchina frigorifera viene dimensionata non al picco massimo, ma a un valore medio, cosicché il PCM va ad integrare il funzionamento della macchina.

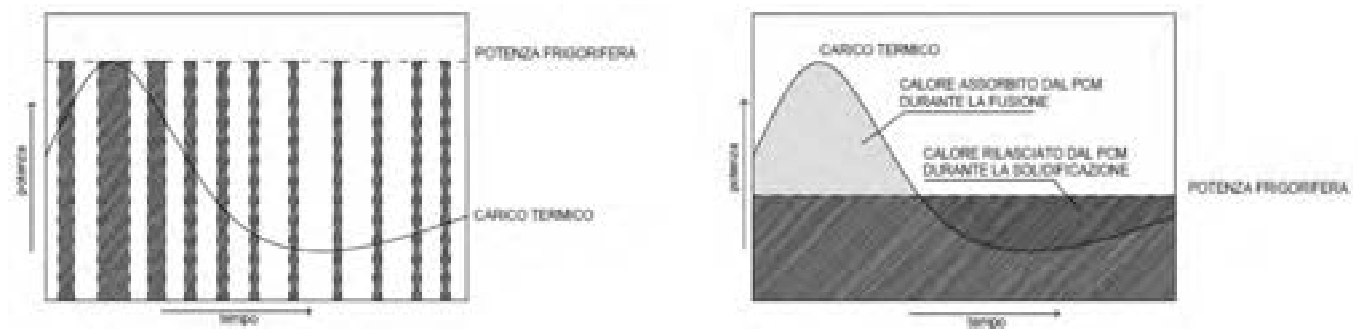


Figura 1. Carico termico e potenza frigorifera: (a) Senza PCM con i cicli di accensione e spegnimento e la potenza della macchina frigorifera dimensionata con il picco (in questo caso si rilevano anche oscillazioni elevate della temperatura interna), (b) Con PCM con funzionamento continuo della macchina frigorifera dimensionata con il valore medio, il PCM rilascia calore quando il carico termico è inferiore della potenza richiesta e accumula calore quando il carico termico è superiore rispetto a quello disponibile.

- In sostituzione della macchina: qualora per esigenze gestionali o per malfunzionamenti, non sia possibile utilizzare la macchina frigorifera (Utile anche per far funzionare la macchina quando le condizioni esterne siano favorevoli e spegnerla quando le temperature esterne sono troppo elevate, facendo lavorare la macchina con rendimenti sempre elevati)



Figura 2. Carico termico e potenza frigorifera.

Conseguenza dell'introduzione del PCM è una stabilizzazione della temperatura dell'aria interna. Infatti il PCM non risente delle oscillazioni di temperatura che normalmente caratterizzano i cicli di accensione e spegnimento delle macchine frigorifere. Il processo di assorbimento e rilascio del calore, necessario ai cicli di solidificazione e fusione del PCM, avvengono quando le condizioni sono al di sopra e al di sotto di quelle di set-point. Il PCM lavora come un "volano termico": il PCM rilascia calore quando la temperatura scende sotto quella di set-point e assorbe quando la temperatura è superiore rispetto a quella di set-point.

Per favorire questo processo di accumulo e rilascio del calore, il PCM dovrebbe essere accoppiato all'aria in uscita dall'evaporatore, in modo che l'aria raffreddata ceda o acquisisca il calore dal PCM prima di essere mandata in ambiente, in funzione della propria temperatura. In pratica si possono avere queste due situazioni:

- l'aria all'uscita dall'evaporatore ha una temperatura minore di quella di set-point e del PCM: l'aria passando attraverso il PCM sottrae calore da quest'ultimo che passa di fase (solidifica) e il risultato è che l'aria ha incrementato la temperatura raggiungendo quasi quella di set-point

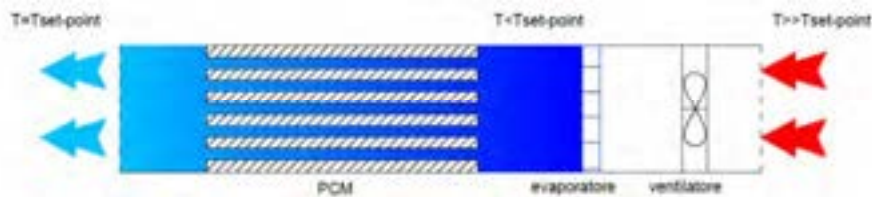


Figura 3. Schema dello scambiatore di calore.

- l'aria all'uscita dall'evaporatore ha una temperatura maggiore di quella di set-point e del PCM: l'aria passando attraverso il PCM cede calore a quest'ultimo che passa di fase (fusione) e il risultato è che l'aria ha ridotto la sua temperatura fino a quasi quella di set-point.

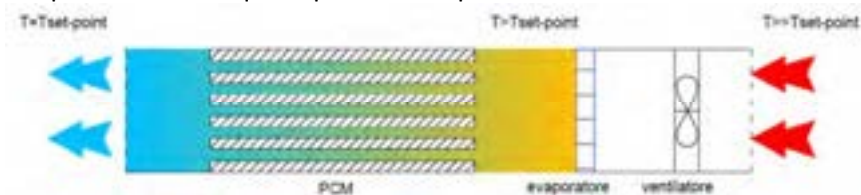


Figura 4. Schema dello scambiatore di calore.

Per definire la quantità di PCM da inserire bisogna quindi calcolare i possibili carichi e le modalità con cui questi vengono attribuiti alla macchina frigorifera o al PCM. Oltre a questo si deve procedere alla scelta del PCM, il cui calore sensibile e latente, influenzano la quantità che deve essere utilizzata.

Condizione limite è quella dell'assenza di macchina frigorifera, così come avviene nelle borse termiche per il mantenimento di alimentari, medicinali o organi, nelle quali vengono inseriti contenitori di ghiaccio che mantengono la temperatura bassa e costante durante il trasporto.

La temperatura di fusione del PCM dovrebbe essere quanto più vicina a quella di set-point della cella frigorifera, preferibilmente di qualche grado inferiore per sopperire al non perfetto scambio termico tra PCM e aria, ed inoltre per permettere di assorbire meglio e più velocemente i carichi termici (maggiore è il delta T e maggiore è l'energia scambiata). Nonostante questo, non bisogna eccedere con PCM a basse temperature (in particolare sotto lo zero) per la presenza di condensa o brina superficiale e per evitare di dover utilizzare temperature eccessivamente basse per la fase di congelamento.

2.1 VANTAGGI OFFERTI DAL PCM

- I vantaggi in termini energetici sono:
 - Potenza elettrica impiegata ridotta
 - Produzione del freddo quando le condizioni esterne sono favorevoli
- I vantaggi in termini di affidabilità sono:
 - Energia termica accumulata a copertura dei black-out
 - Energia termica accumulata a copertura dei picchi non previsti
 - Stabilizzazione delle temperatura e quindi miglior conservazione delle merce
 - Riduzione del rischio congelamento
- I vantaggi in termini economici:
 - Possibilità di viaggiare per medio-brevi distanze senza l'allaccio e l'utilizzo di macchine frigorifere;
 - Far lavorare le macchine frigorifere ad efficienza migliore;
 - Ridurre i cicli di accensione e spegnimento, quindi minori consumi e minor usura dei compressori;
 - Far lavorare le macchine frigorifere nelle fasce orarie a tariffa energetica ridotta;
 - Riduzione della merce rovinata (per congelamento o condizioni non perfette)

2.2 modalità di inserimento del PCM

Per il presente studio si propongono tre modalità di possibile utilizzo del PCM come accumulatore interno:

2.2.1 Sullo strato interno delle pareti (scambio termico solo per convezione naturale)

o Vantaggi:

- stabilizzazione anche della temperatura superficiale e quindi radiante
- maggiore distribuzione della massa
- spazio ridotto – solo qualche cm di spessore
- migliore azione contro le azioni esterne che non entrano nemmeno in ambiente ma vengono contrastate prima

o Svantaggi:

- convezione naturale meno efficace e controllabile
- difficoltà di applicazione in celle esistenti
- rischio di non circolazione dell'aria

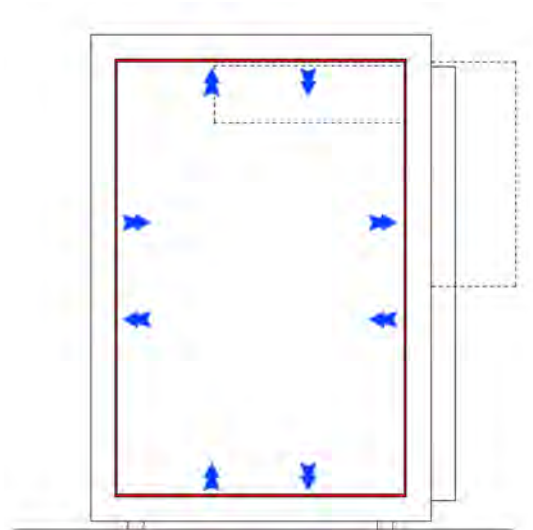


Figura 5. Sezione della cella con lo strato di PCM applicato in corrispondenza della superficie interna

2.2.2 In uno scambiatore a valle dell'evaporatore

o Vantaggi:

- convezione forzata molto efficace e controllabile (con il controllo ausiliario)
- facile applicazione su celle esistenti
- efficace stabilizzazione dell'aria

o Svantaggi:

- scambio termico PCM-aria da verificare
- prevalenza ventilatori esistenti da verificare
- energia elettrica per ausiliari

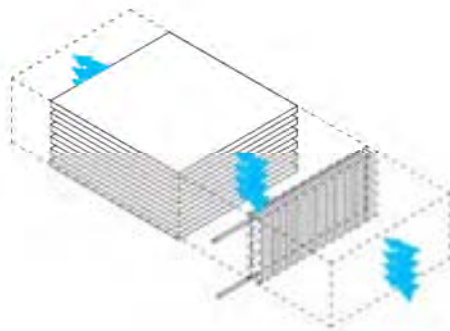


Figura 6. Schema dello scambiatore composto da elementi in PCM posto in corrispondenza dell'evaporatore.

2.2.3 PCM integrato nell'evaporatore.

Vantaggi

- convezione forzata molto efficace e controllabile (con il controllo ausiliario)
- perfetta stabilizzazione dell'aria
- possibilità di utilizzare PCM a temperature più basse
- migliore efficienza delle macchina frigorifera che lavora con la sorgente fredda (PCM) a temperatura sempre costante
- facilità di scarico del PCM.

o Svantaggi:

- difficoltà di applicazione su macchine frigorifere esistenti
- scambio termico da verificare

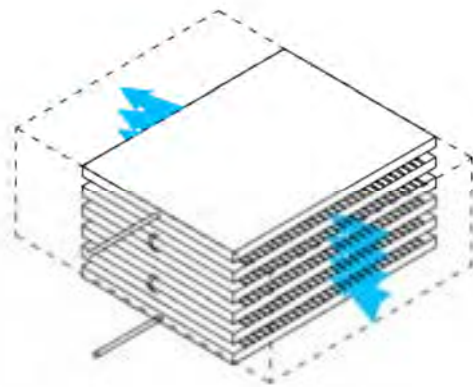


Figura 7. Schema dello scambiatore integrato con le serpentine dell'evaporatore.

3 Prove sperimentali

Per verificare le prestazioni e i benefici offerti dall'introduzione di PCM all'interno delle celle frigorifere si è proceduto con un'analisi sperimentale su una reale cella frigorifera.

Una delle due celle frigorifere utilizzate per le prove sperimentali nel 2014 e tuttora presenti all'interno del laboratorio di Energetica Ambientale del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche è stata modificata nell'allestimento con lo scopo di alloggiare all'interno del vano refrigerato il materiale in passaggio di fase.

Poiché i livelli di temperatura di fusione e solidificazione del PCM adottato doveva essere compatibile con quelli che si raggiungeranno, in stato stazionario, all'interno della cella frigorifera (circa $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), è stato necessario fare uno studio preventivo di scelta di detto materiale e del suo sistema di contenimento, anche in correlazione alle esigenze di scambio termico con il flusso forzato di aria refrigerata spinta dal ventilatore a servizio dell'evaporatore della macchina frigorifera. In una seconda fase di allestimento è stato installato il sistema di monitoraggio consistente nella rete di sensori di temperatura e di flusso strategicamente distribuiti sia all'interno che all'esterno della cella con lo scopo di valutare i parametri ambientali interni della cella nelle varie configurazioni di utilizzo. Il sistema di rilievo dati è stato composto anche da misuratori di energia elettrica per la contabilizzazione dei consumi nei vari assetti di lavoro della cella frigorifera (vuota, parzialmente piena di materiale organico, completamente carica).

Gli obiettivi delle misure sperimentali sono stati i seguenti:

- verificare le modalità applicative del PCM;
- caratterizzare energeticamente il contributo dato dalle singole azioni che determinano il carico termico;
- verificare il risparmio energetico ottenibile dall'introduzione del PCM;
- verificare il miglioramento delle condizioni termiche interne alla cella offerto dall'introduzione di PCM;
- verificare le problematiche e le criticità derivanti dall'applicazione di PCM, e proporre ipotesi migliorative da investigare in future applicazioni o in effettive applicazioni in casi reali;
- analizzare i risultati ottenuti per determinare relazioni numeriche atte a prevedere il comportamento del PCM e stimarne i benefici.

3.1 Cella frigorifera di prova

Per verificare il contributo dell'applicazione del PCM è stata utilizzata una cella frigorifera, nella quale è stato installato lo scambiatore contenente PCM. Le prove sono state ripetute due volte: una prima sulla cella di riferimento (senza PCM), e una seconda sulla cella con la presenza dello scambiatore contenente PCM. La cella è stata posizionata in un ambiente interno termostato a $32\pm 2^{\circ}\text{C}$ per simulare le temperature esterne nelle quali operano le celle frigorifere poste all'esterno. La cella è stata dotata di un sistema di monitoraggio dei parametri termici caratterizzanti il comportamento termodinamico delle stesse. Il confronto tra le prestazioni energetiche della cella nella configurazione base e con PCM, sottoposta alle medesime azioni esterne ha portato ad evidenziare il diverso comportamento. Il confronto è stato fatto comparando i parametri termici ed energetici (compreso il consumo elettrico) delle due configurazioni.

La cella ha dimensioni totali esterne: 140 cm x 140 cm x 220 cm (h), e forma e struttura sono evidenziate negli schemi seguenti.

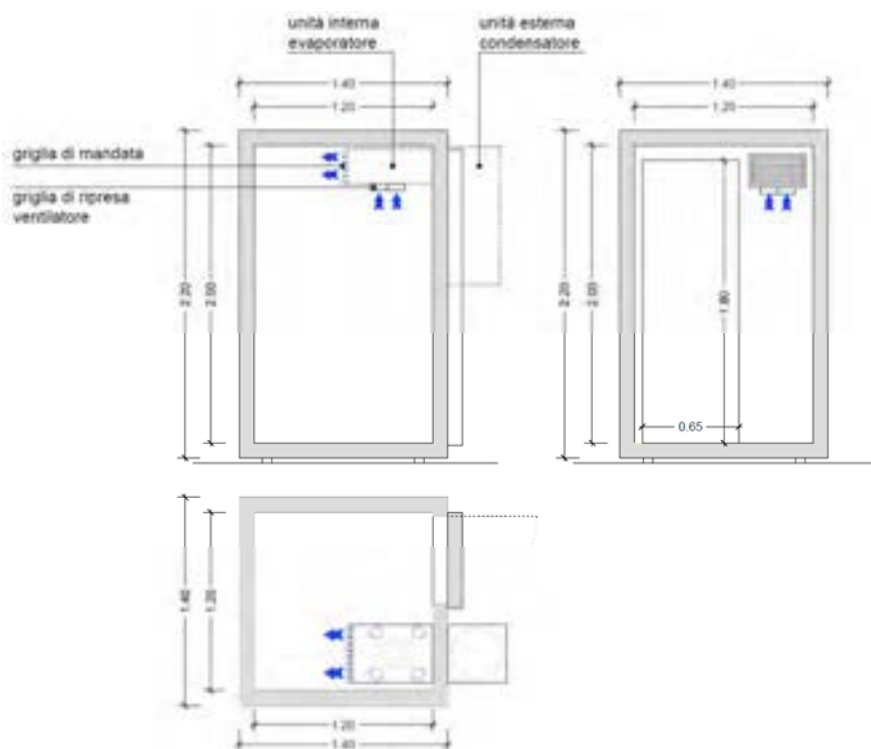


Figura 8. Pianta e sezioni della celle frigorifera di prova.

L'involucro della cella è realizzato con una serie di pannelli modulari per pareti e soffitti di spessore 10 cm, prodotti con procedimento vacuum system (M.V.S.), realizzati in lamiera zincata 5/10 e plastificata di colore bianco, isolati con schiume poliuretaniche iniettate (densità 40Kg/m³).

La cella è completa di pavimento carrabile ed è dotata di porta a tampone luce netta: 65 cm x 190 cm (lxh)

La cella è termostata attraverso una macchina frigorifera ad espansione diretta installato a bordo della cella. La macchina è del tipo monoblocco Tem 0/+8°C con rievaporazione dell'acqua automatica, potenza frigorifera 1140 W (Figura 9)



Figura 9. Immagine dell'impianto frigorifero.

3.2 PCM e tecnologia di applicazione

Per contenere il PCM sono stati utilizzati dei profili in alluminio anodizzato con superficie alettata, chiusi alle estremità e muniti di tappo a vite per consentire il riempimento e lo svuotamento del contenuto. I contenitori hanno dimensioni di circa 140x60x1000 mm con la dimensione interna del contenitore pari a 136x26x996 mm pari a un volume di 3.52 litri. La superficie di scambio è pari a circa 1,44 m² per metro di lunghezza. I contenitori presentano un sistema di fissaggio maschio/femmina che consente l'assemblaggio di più contenitori oppure l'inserimento di appositi profili metallici.

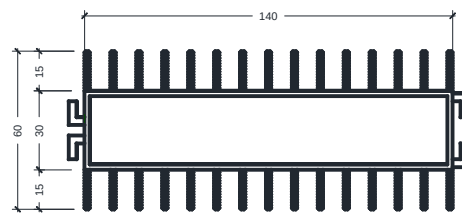


Figura 10. Sezione del profilo metallico (alluminio) con cui sono stati realizzati i contenitori.

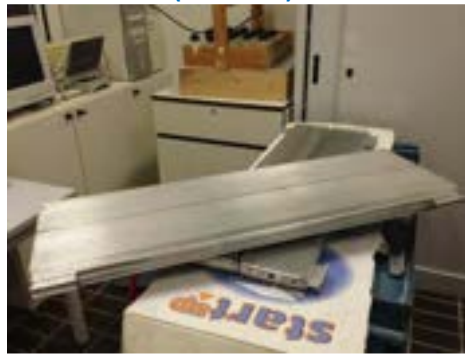


Figura 11. Fotografia dei contenitori di PCM.

Per la sperimentazione sono stati utilizzati 6 contenitori, assemblati 2 a due e sovrapposti per formare 3 elementi sovrapposti. Gli elementi metallici sono stati sospesi al soffitto attraverso l'utilizzo di 4 barre filettate. Successivamente è stato realizzato un carter in polistirene che oltre a contenere i contenitori di PCM funge da canale per la circolazione dell'aria in uscita dall'evaporatore.

In una prima configurazione l'aria circola attraverso il canale solo con l'utilizzo del ventilatore già presente nell'unità interna della macchina frigorifera, mentre in una seconda configurazione (utilizzata per le prove di black-out) delle ventole ausiliarie sono state installate nella sezione di uscita per favorire lo scambio d'aria anche quando la macchina frigorifera è spenta.

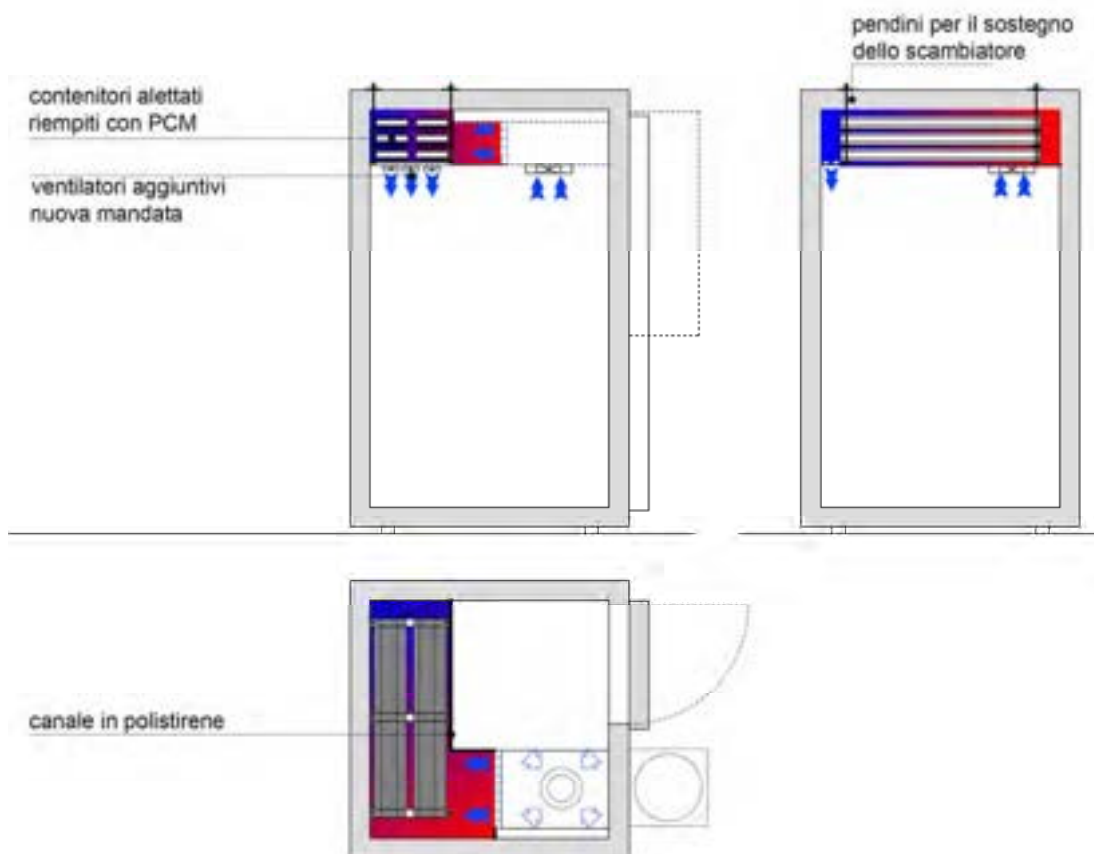


Figura 12. Pianta e sezioni della celle frigorifera di prova modificata per alloggiare lo scambiatore contenente PCM.



Figura 13. Fotografia dello scambiatore di PCM: (a) prima dell'applicazione del canale (b) con il canale per l'aria esterno.

Dato che la temperatura dell'aria interna scelta per le prove è stata di 5°C, è stato utilizzato un PCM Rubitherm RT 5 HC. Il PCM scelto è una paraffina con punto di fusione intorno ai 5°C. Nell'allegato C è riportata la scheda tecnica con le caratteristiche del prodotto utilizzato.

3.3 Sistema di acquisizione

Per l'acquisizione, la conversione e la memorizzazione delle grandezze sono stati utilizzati degli acquisitori DATATAKER DT 500 (**figura 14**). Questo dispositivo consente di leggere, convertire, memorizzare e trasmettere i dati, relativi alle misurazioni dei valori che vogliamo acquisire. Questo dispositivo è predisposto per leggere grandezze di diversa natura, sia di tipo analogico, che digitale. Il datataker utilizzato per la sperimentazione il DT 500 serie 3 presenta la possibilità di avere 10 entrate di tipo analogico a 4 conduttori e di 4 ingressi-uscite digitali. I dati memorizzati vengono scaricati su un PC attraverso la memory card, utilizzando il software in dotazione Delogger, oppure collegandosi al Datataker attraverso un cavo seriale collegato ad una porta COMMS e scaricare i dati memorizzati nella memoria interna. Per controllare l'acquisizione e verificare istantaneamente i valori rilevati è stato predisposto un programma in Labview.



Figura 14. Immagine del Datataker DT 500

Per la misura del flusso termico entrante dalle superfici verticali sono stati utilizzati termoflussimetri Lsi lastem BSR240 (**figura 15**), posizionati sulla superficie interna della struttura. Le caratteristiche tecniche vengono riportate in Tabella 1.

Campo			
Incertezza	(tot.12 ore misura)		5% VL/reading + 0,4 Wm ²
Sensibilità (nominale)			50 µV/Wm ²
Risoluzione			0,1 W/m ²
Elemento sensibile			Termopila
N°canali utilizzati			n.1
Limiti ambientali			-30+70°C
Norme			ISO9869, ASTM C1046, ASTM 1155
Dimensioni			Diametro 80 mm
Cavo			L. 5 m

Tabella 1 Caratteristiche tecniche dei termoflussimetri



Figura 15. Immagine del termoflussimetro.

Per la misurazione delle temperature dell'aria e superficiali, sono state utilizzate delle sonde PT 100, a contatto per la misurazione della temperatura superficiale e schermate da un cilindro di acciaio, per la misura della temperatura dell'aria (Figura 16).



Figura 16. Termoresistenze per la misura della temperatura dell'aria (a) e per la misura della temperatura superficiale (b).

Per la misura della potenza elettrica sono stati utilizzati due dispositivi:

- un misuratore di potenza Christ Elektronik CAC 140
- un misuratore di potenza ed energia Efergy E2 Classic



Figura 17. Misuratori di potenza ed energia elettrica: (a) Efergy E2 Classic, (b) Christ Elektronik CAC 140.

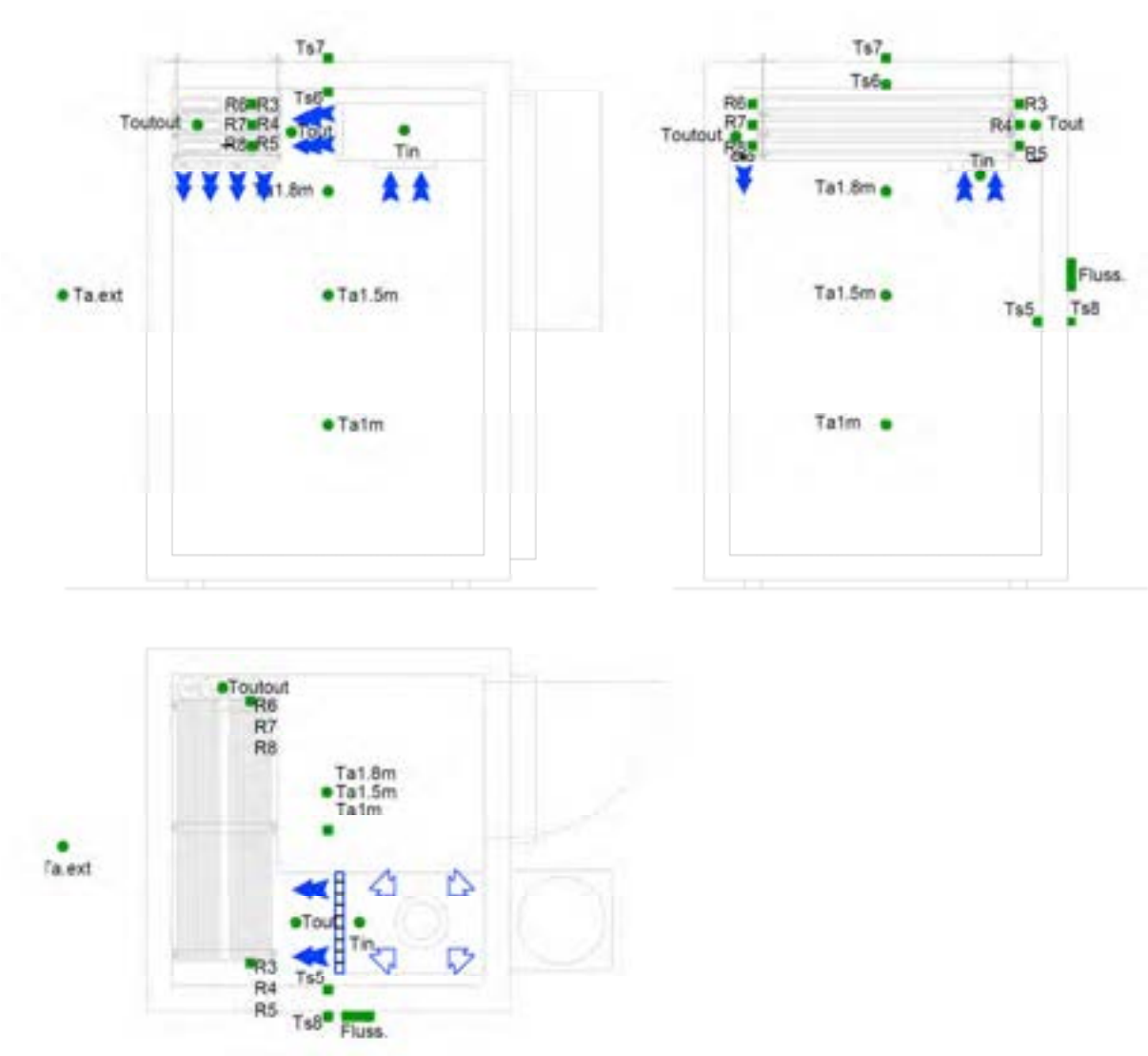


Figura 18 Posizione dei sensori.

SENSORE	U.M.	TIPO SENSORE	GRANDEZZA MISURATA
TA 1M	°C	Termoresistenza PT 100	Temperatura aria interna a 1 metro
TA 1.5M	°C	Termoresistenza PT 100	Temperatura aria interna a 1,5 metro
T 1.8M	°C	Termoresistenza PT 100	Temperatura aria interna a 1,8 metro
TAMB EST	°C	Termoresistenza PT 100	Temperatura aria esterna
T INT VER	°C	Termoresistenza PT 100	Temperatura superficiale interna parete
T INT COP	°C	Termoresistenza PT 100	Temperatura superficiale interna copertura
T EST COP	°C	Termoresistenza PT 100	Temperatura superficiale esterna parete
T EST VERT	°C	Termoresistenza PT 100	Temperatura superficiale esterna copertura
FLUSSO TERM	W/mq	flussimetro	Flusso termico parete
POT ASSORB	W	analizzatore di segnale elettrico	Potenza elettrica
TOUT	°C	Termoresistenza PT 100	Temperatura aria mandata (dopo l’evaporatore)
T IN	°C	Termoresistenza PT 101	Temperatura aria ripresa (prima dell’evaporatore)

T3	°C	Termoresistenza PT 102	Temperatura superficiale scambiatore PCM
T4	°C	Termoresistenza PT 103	Temperatura superficiale scambiatore PCM
T5	°C	Termoresistenza PT 104	Temperatura superficiale scambiatore PCM
T6	°C	Termoresistenza PT 105	Temperatura superficiale scambiatore PCM
T7	°C	Termoresistenza PT 106	Temperatura superficiale scambiatore PCM
T8	°C	Termoresistenza PT 107	Temperatura superficiale scambiatore PCM
T_{OUT OUT}	°C	Termoresistenza PT 108	Temperatura aria mandata (dopo PCM)
T H₂O	°C	Termocoppia Tipo T	Temperatura acqua caricata

Tabella 2. Legenda sensori.

3.3.1 Taratura sonde

Per la taratura delle termoresistenze Pt100 è stato utilizzato il FLUKE CALIBRATION 7102 Micro-Bath (Figura 19) le cui caratteristiche tecniche vengono riportate in tabella 3.



Figura 19. Sistema di calibratura sonde.

GRANDEZZA		VALORI
RANGE		-5 °C to 125 °C (23 °F to 257 °F)
ACCURATEZZA		± 0.25 °C
STABILITÀ		± 0.015 °C at -5 °C (oil 5010)
		± 0.03 °C at 121 °C (oil 5010)
UNIFORMITÀ		± 0.02 °C
RISOLUZIONE		0.01 °C/°F
TEMPERATURA FUNZIONAMENTO	DI	5 °C to 45 °C

TEMPO DI RISCALDAMENTO	25 °C to 100 °C: 30 minuti
TEMPI DI RAFFREDDAMENTO	25 °C to 0 °C: 30 minuti
DIMENSIONI	18 x 31 x 24 cm
PESO	6.8 kg
VOLUME	0.75 L
NIST-TRACEABLE CALIBRATION	Data at -5 °C, 25 °C, 55 °C, 90 °C, and 121 °C

Tabella 3. Caratteristiche tecniche Micro-Bath FLUKE CALIBRATION 7102.

Nella figura 20 vengono riportati i vari passi del processo di taratura: le diverse termocoppie sono poste all'interno del bagno termostatico costituito da un pozzetto con dell'olio silconico al suo interno. La temperatura alla quale si desidera portare il bagno termostatico è inserita mediante un set di comandi presenti sul bagno termostatico stesso. Tuttavia a causa di errori di misura presenti nella strumentazione viene utilizzata una termo resistenza PT 25 come strumento di riferimento. Difatti la temperatura da essa rilevata è considerata come quella realmente effettiva dell'ambiente da misurare. I cavi per la misura che escono dalla termo resistenza sono collegati ad un acquisitore a sua volta connesso ad un computer con interfaccia GPIB dove viene registrata la temperatura rilevata dalla termo resistenza stessa. In questo modo è nota con precisione la temperatura del bagno termostatico. Inoltre come è possibile vedere dalla figura le sonde da tarare sono contemporaneamente connesse ad un datateker DT 500 ed i dati memorizzati vengono scaricati su un PC (USB-RS232) attraverso la memory card e visualizzati mediante il software Delogger. Lo scopo della taratura è quello di trovare i coefficienti della retta approssimante, definiti dall'equazione,

$$Y = mX + q$$

la quale diventa il nuovo polinomio caratteristico della termoresistenza (Figura 21)

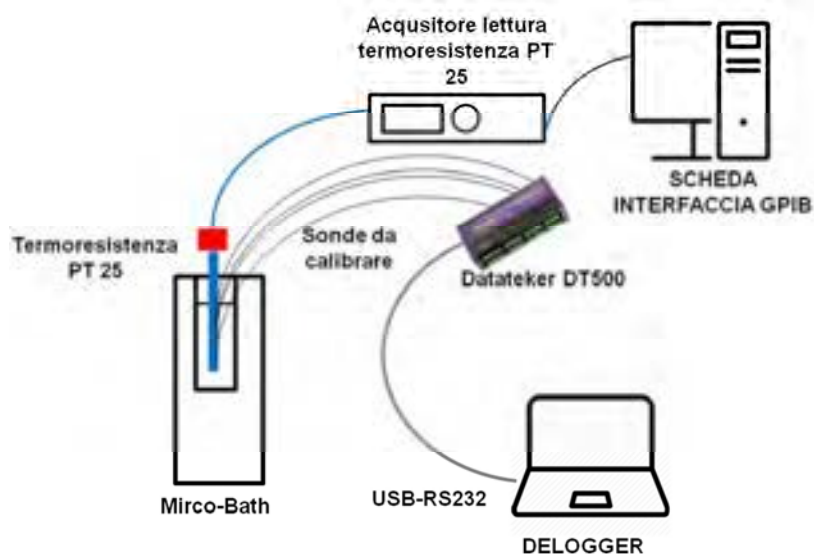


Figura 20. Schema dell'apparato di calibratura delle sonde.

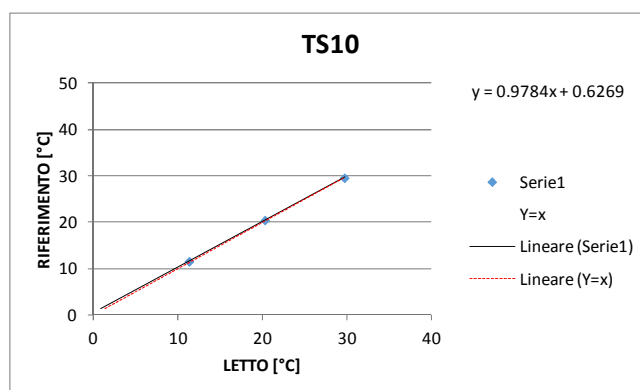


Figura 21: Esempio retta taratura termo resistenza Pt100

3.4 Programma di prova

Le prove effettuate sulla cella frigorifera in configurazione tradizionale e con l'introduzione di PCM sono state eseguite sottoponendo la cella frigorifera alle diverse azioni che determinano singolarmente un carico frigorifero.

Le azioni che normalmente creano un carico termico sono:

- Trasmissione attraverso l'involucro
- Apertura dalle porta
- Introduzione di carico esterno a temperatura più alta.

In aggiunta è stato analizzato il comportamento della cella frigorifera in assenza di alimentazione elettrica, al fine di verificarne il comportamento.

Per quanto riguarda il carico termico dovuto alla respirazione non sono state fatte analisi particolari dato che il carico dovuto a questa azione determina un'azione limitata e simile a quello che avviene negli altri casi.

Il programma di prova prevede le misure delle seguenti azioni e condizioni:

	SENZA PCM		PCM	
	no	sì	no	sì
contenuto interno (acqua 160 kg)				
prove a regime /trasmissione involucro	x	x	x	x
apertura delle porte				
10 sec ogni 15 minuti	x	x	x	x
30 secondi ogni 15 minuti	x	x	x	x
180 secondi ogni 20 minuti	x	x	x	x
300 secondi	x	x	x	x
carico merce				
60 kg	x	x	x	x
120 kg	x	x	x	x
block-out - o funzionamento senza macchina	x	x	x	x
evotraspirazione	-	-	-	-

Tabella 4. Programma di prova

3.5 Risultati

3.5.1 Confronto funzionamento a regime (cella vuota)

Nel presente confronto viene effettuato la comparazione tra il funzionamento della cella a regime, nella configurazione base (REF) e nella configurazione con lo scambiatore di PCM. Per questo confronto la cella viene mantenuta vuota, quindi senza merce all'interno. Inoltre, per permettere al PCM di scambiare energia termica in maniera continua con l'aria dell'ambiente, è stato attivato un moto dell'aria continuo attraverso l'ausilio di ventole. L'energia consumata dalle ventole non è stata considerata nel confronto.

La comparazione è stata fatta in un periodo di 2 ore consecutive. La temperatura dell'ambiente esterno è stata mantenuta a $32 \pm 1^\circ\text{C}$.

Il primo aspetto che si può notare dai dati raccolti è che il numero di accensioni effettuate dalla macchina frigorifera in 2 ore di prova, sono state pari a 6 nella cella con PCM mentre nella configurazione normale sono state pari a 13 (Figura 22.a). Nella cella di riferimento, la durata dei periodi in cui la macchina frigorifera ha funzionato sono state più brevi, così come i periodi di pausa. Questo aspetto determina sia un miglioramento dell'efficienza energetica che un miglioramento del funzionamento della macchina.

Dal punto di vista energetico, la riduzione delle accensioni determina un miglioramento dell'efficienza della macchina frigorifera; infatti si è potuto osservare come la potenza frigorifera generata nei momenti successivi all'accensione della macchina è inferiore rispetto alla potenza a regime, dato che dal momento dell'avviamento del compressore (e quindi dell'inizio dell'assorbimento elettrico) passa del tempo prima che l'evaporatore si raffreddi e quindi prima che generi potenza frigorifera. In questo frangente di tempo il rendimento della macchina risulta ridotto rispetto a quello a regime. Quindi riducendo il numero di accensioni e aumentando la lunghezza dei cicli di accensione e spegnimento, si riducono i periodi di transizione in cui l'efficienza energetica della macchina frigorifera è ridotta.

Dal punto di vista del funzionamento della macchina, il dimezzamento dei cicli di accensione comporta una minor usura del compressore della macchina e quindi una maggior durata ed efficienza durante la vita della cella.

Per quanto riguarda il consumo energetico si è potuta rilevare una riduzione del consumo elettrico di circa il 16%. (Figura 22.b).

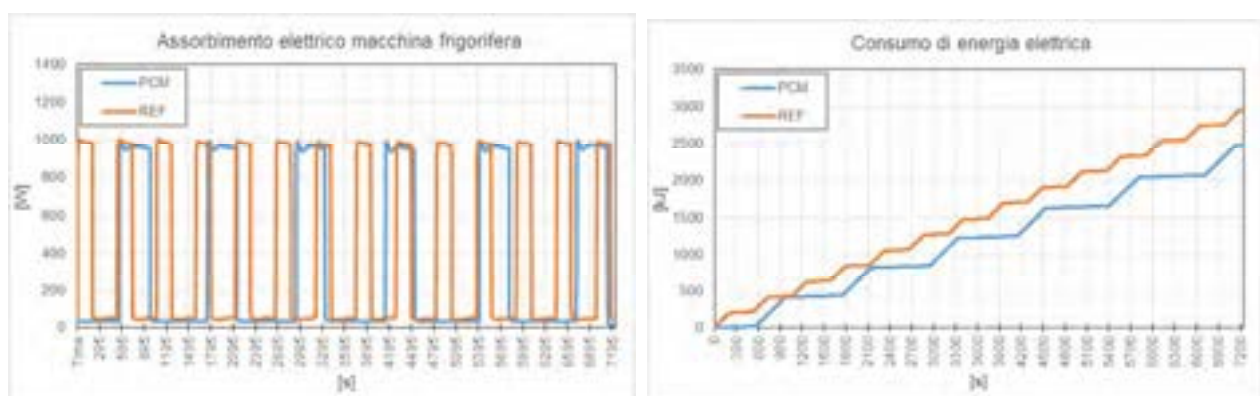


Figura 22. Grafico potenza elettrica-tempo (a) e energia elettrica-tempo (b)

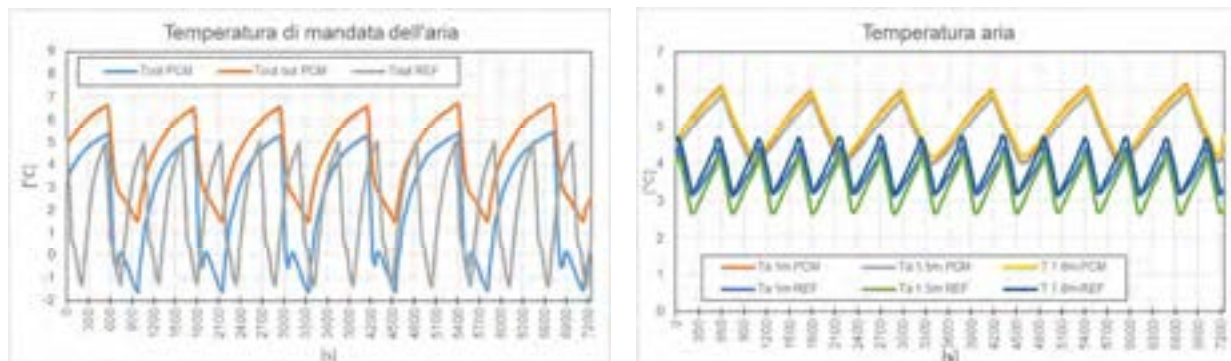


Figura 23. Grafico temperatura di mandata-tempo (a), temperatura dell'aria interna-tempo (b).

Dal punto di vista del miglioramento delle condizioni termiche all'interno alla cella, si può notare come lo scambiatore di PCM posto a valle dello scambiatore di calore consente una stabilizzazione della temperatura di mandata dell'aria. Tale temperatura rilevata dopo il PCM risulta avere un valore minimo $>1,5^{\circ}\text{C}$ superiore alla soglia dei 0°C che determina congelamento della merce direttamente esposta. Nella cella di riferimento invece tale valore minimo raggiunge il valore di $-1,5^{\circ}\text{C}$.

L'oscillazione della temperatura dell'aria di mandata misurata dopo lo scambiatore di PCM risulta essere pari a $5,2^{\circ}\text{C}$, mentre nella cella di riferimento è pari a $6,3^{\circ}\text{C}$. Nel caso del PCM tale differenza può essere ridotta ulteriormente aumentando la superficie di scambio tra aria e scambiatore.

La temperatura interna con la presenza di PCM risulta essere di molto più vicina di quella di set-point pari a 5°C , oscillando tra $4\text{--}6^{\circ}\text{C}$, mentre per la configurazione di riferimento la temperatura media risulta più bassa, oscillando tra $2,5\text{--}4,5^{\circ}\text{C}$.

Si può inoltre osservare dai dati che con la presenza del PCM e delle ventole che continuamente miscelano l'aria all'interno della cella, le temperature dell'aria misurate sui diversi livelli risultano essere più omogenee (media gradiente di temperatura con PCM = $0,15^{\circ}\text{C}$, mentre per la cella di riferimento = $0,35^{\circ}\text{C}$).

Per quanto riguarda il funzionamento del PCM si può notare dalla misura delle temperature superficiali (R3-R4-R5-R6-R7-R8) poste sulle superfici degli scambiatori contenente PCM, come le temperature siano sempre sotto i 5°C , variando tra $1\text{--}4,5^{\circ}\text{C}$ per le temperature rilevate vicino all'evaporatore e $2,5\text{--}4^{\circ}\text{C}$ per le temperature rilevate sul lato vicino alle ventole. Queste temperature dimostrano come per questa applicazione il calore latente del PCM venga sfruttato in maniera parziale, senza mai andare a lavorare nei livelli di temperatura (5°C) dove si ha il picco di assorbimento e rilascio di energia termica. Quindi, durante i normali cicli di accensione e spegnimento della macchina, solo una parte del calore latente viene utilizzato, mentre il resto rimane accumulato per eventuali picchi di carico termico o spegnimenti inaspettati della macchina frigorifera.

Se si volesse ottimizzare il sistema al fine di ridurre i consumi durante il funzionamento normale della cella, si dovrebbe incrementare la superficie di scambio del PCM e ridurre la quantità di materiale. Sarebbe inoltre opportuno scegliere un PCM con una temperatura di fusione di $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ rispetto a quanto utilizzato durante la sperimentazione. In questo caso però si avrebbe meno energia termica accumulata per coprire eventuali carichi termici.

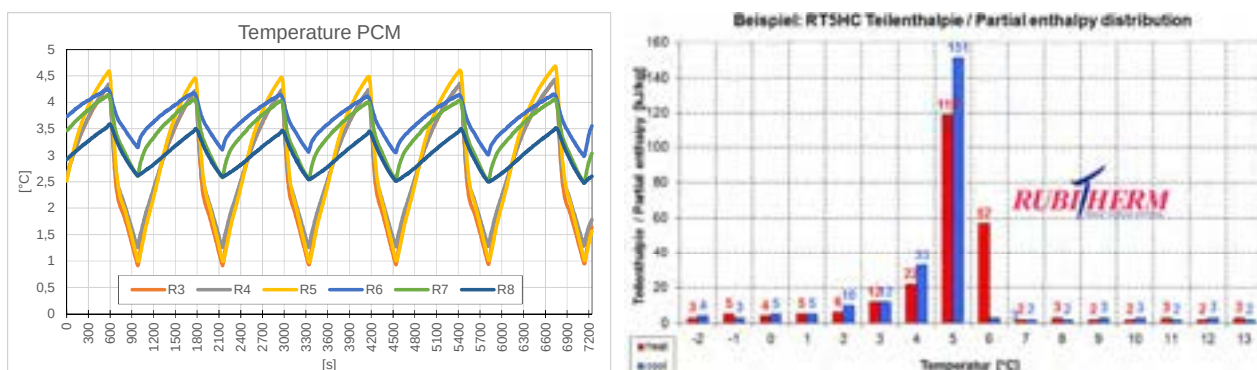


Figura 24. Temperatura superficiale scambiatori di PCM (a), Entalpia-temperatura del PCM RT5HC (b).

3.5.2 Confronto funzionamento in caso di black out (cella vuota)

Nel presente confronto viene effettuato la comparazione tra il funzionamento della cella in caso di black out, nella configurazione base (REF) e nella configurazione con lo scambiatore di PCM. Inoltre, per permettere al PCM di scambiare energia termica in maniera continua con l'aria dell'ambiente, è stato attivato un moto dell'aria continuo attraverso l'ausilio di ventole. Il comportamento delle due celle è stato studiato per circa 24 ore di black out consecutive. La temperatura dell'aria esterna è stata mantenuta a $32 \pm 1^\circ\text{C}$.

La figura 25a mostra la temperatura media misurata all'interno della cella con e senza PCM durante le 24 ore caratterizzate dal non funzionamento dell'intero sistema di refrigerazione. Come previsto la cella di riferimento ha riportato valori di temperatura dell'aria interna più elevati determinati appunto dall'assenza dell'unità di accumulo termico (PCM) all'interno della cella stessa. Difatti dal grafico si può notare come l'aria all'interno della cella di riferimento abbia raggiunto una temperatura di 15°C impiegando circa un'ora e quaranta minuti. Contrariamente per quanto riguarda la cella dotata di PCM che ha impiegato circa 8 ore per raggiungere la medesima temperatura di 15°C . Questo ritardo è direttamente correlabile al passaggio di fase, da solido a liquido, subito dal PCM (Figura 25b). E' quindi evidente come l'aggiunta di PCM all'unità refrigerante abbia permesso di mantenere bassa la temperatura media dell'aria all'interno della cella anche durante il mancato funzionamento dell'unità refrigerante. E' infatti noto come le variazioni di temperatura durante il trasporto e lo stoccaggio di prodotti ortofrutticoli rappresentano un aspetto molto critico per la qualità e sicurezza dei prodotti stessi. Da quanto appena descritto risulta pertanto evidente come l'applicazione di materiali con passaggio di fase risulti utile nel sostenere unità di trasporto e stoccaggio a basse temperature per lunghi periodi quando il sistema di refrigerazione è spento.

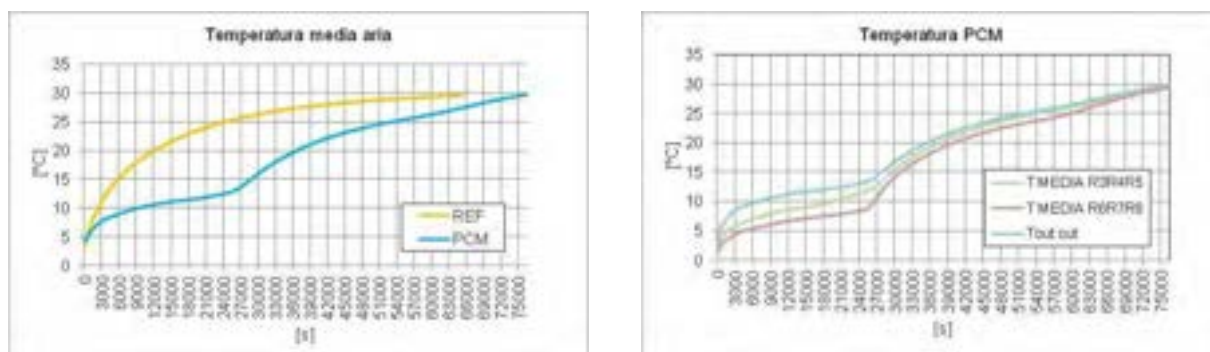


Figura 25. Confronto temperatura media dell'aria all'interno della cella frigorifera (a) e temperature PCM (b)

3.5.3 Confronto funzionamento in caso di black out (cella piena)

Nel presente confronto viene effettuato la comparazione tra il funzionamento della cella in caso di black out, nella configurazione base (REF) e nella configurazione con lo scambiatore di PCM entrambe in presenza di carico (120 kg di acqua). Anche in questo caso, per permettere al PCM di scambiare energia termica in maniera continua con l'aria dell'ambiente, è stato attivato un moto dell'aria continuo attraverso l'ausilio di ventole. Il comportamento delle due celle cariche (120 kg di acqua) è stato studiato per circa 24 ore di black out consecutive. Durante l'analisi sperimentale, la temperatura dell'aria esterna è stata mantenuta a $30 \pm 1^\circ\text{C}$.

La figura numero 26a mostra la temperatura media misurata all'interno della cella con e senza PCM durante le 24 ore caratterizzate dal non funzionamento dell'intero sistema di refrigerazione. Come previsto, anche in questo caso, la cella di riferimento ha riportato valori di temperatura dell'aria interna più elevati determinati appunto dall'assenza dell'unità di accumulo termico (PCM) all'interno della cella stessa. Difatti dal grafico si può notare come l'aria all'interno della cella di riferimento abbia raggiunto una temperatura uguale a 16°C impiegando all'incirca 7 ore. Contrariamente per quanto riguarda la cella dotata di PCM che ha impiegato circa 14 ore per raggiungere la medesima temperatura di 16°C . Anche in questo caso tale ritardo è correlabile all'azione del materiale in passaggio di fase che, rilasciando "l'energia fredda accumulata", permette di mantenere bassa la temperatura interna per un periodo di tempo più lungo. La temperatura di fusione rilevata sul PCM durante le 24 ore possono essere viste nella figura 26b. Il PCM risulta essere allo stato solido nella zona A per poi iniziare a fondere nella zona B all'aumentare della temperatura. Questa fase di fusione avviene su una ristretta gamma di temperatura come mostrato dalla linea per lo più orizzontale che indica appunto il processo di fusione. Una volta che il PCM è completamente fuso la temperatura dello stato di fusione aumenta come mostrato appunto nella zona C.

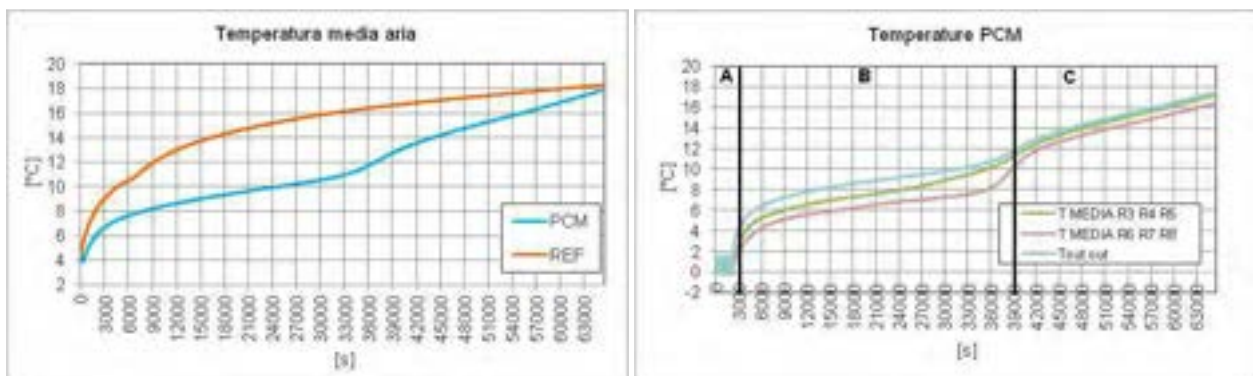


Figura 26. Confronto temperatura media aria all'interno della cella di riferimento e della cella con PCM (a) e temperature PCM (b)

La figura 27 mostra la temperatura del carico (120 kg di acqua) misurata all'interno della cella con e senza PCM durante le 24 ore caratterizzate dall'assenza di corrente elettrica. E' subito evidente come il materiale in passaggio di fase sia in grado di mantenere bassa la temperatura del prodotto refrigerato per un periodo più lungo (circa 9 ore) rispetto a quella di riferimento (circa 4 ore).

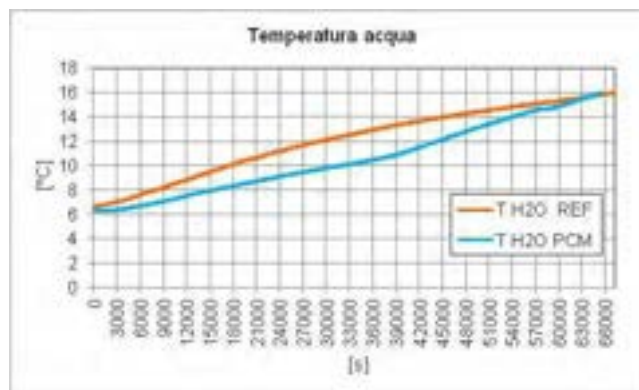


Figura 27. Confronto temperatura acqua all'interno della cella di riferimento e della cella con PCM

3.5.4 Confronto funzionamento in caso di apertura delle porte

Per le condizioni e la configurazione con cui sono state effettuate le prove, non si registrano variazioni tali da poter affermare che ci siano stati benefici o svantaggi dall'applicazione di PCM nel compensare il carico frigorifero richiesto a seguito dell'apertura della porta. Tale aspetto è dovuto principalmente alle modalità applicative con cui è stato inserito il PCM, che non consente una rapida cessione del calore accumulato, derivante dalla superficie di scambio disponibile, dalla velocità dell'aria nel canale e dalla differenza di temperatura tra PCM e temperatura dell'aria.

Nelle condizioni attuali la potenza frigorifera della macchina (circa 1200 W) è predominante rispetto a quella che può scambiare il PCM, e quindi in condizioni di richiesta (picchi), l'apporto del PCM non è rilevabile, anche perché gli stessi scambiatori cedono calore all'aria che fuoriesce dall'evaporatore (essendo a temperatura $< 5^{\circ}\text{C}$).

Tale aspetto può comunque essere migliorato attraverso una differente configurazione del PCM (superficie di scambio, temperatura e canalizzazione)

3.5.5 Confronto funzionamento durante le fasi di carico della merce

Per le condizioni e la configurazione con cui sono state effettuate le prove, non si registrano variazioni tali da poter affermare che ci siano stati benefici o svantaggi dall'applicazione di PCM nel compensare il carico frigorifero richiesto a seguito del carico della merce. Le cause sono le medesime esplicitate nel paragrafo precedente (§ 3.5.4).

4 Tool di dimensionamento del PCM

4.1 Premessa

Il tool di calcolo per il dimensionamento del PCM da inserire nella cella frigorifera è stato realizzato al fine di fornire uno strumento agli operatori per poter facilmente utilizzare il PCM nelle proprie applicazioni.

Il foglio di calcolo consente, una volta inseriti i parametri richiesti, di scegliere e dimensionare il PCM più adatto per tale applicazione. Il calcolo permette di prevedere il calore assorbito dal PCM per l'applicazione all'interno della cella frigorifera, nel quale il materiali a passaggio di fase viene inserito come accumulo termico. In tale proposta il PCM è dimensionato in modo tale da poter assorbire tutti quanti i carichi derivati dalle diverse azioni, in particolare:

- Carichi termici attraverso l'involucro per effetto della differenza di temperatura e per effetto della radiazione solare;
- Carico termico dovuto all'infiltrazione d'aria derivante dall'apertura della porta in fase di carico della merce;
- Carico termico sensibile dovuto alla differenza di temperatura tra la merce inserita e la temperatura dell'aria impostata all'interno della cella;
- Carico termico per effetto della maturazione e respirazione dei vegetali trasportati.

Così dimensionato, il PCM, può mantenere la cella frigorifera in condizioni ottimali senza l'ausilio della macchina frigorifera, oppure garantire le condizioni ottimali interne anche in condizioni di black-out elettrico.

I dati di input che l'operatore deve inserire per poter prevedere e dimensionare la quantità di PCM interessano sia le caratteristiche della cella che quelle dell'utilizzo, in particolare:

- geometria della cella (dimensioni esterne , spessore delle pareti, e dimensioni della porta)
- caratteristiche dell'involucro (trasmittanza termica ed emissività della superficie esterna)
- caratteristiche della macchina frigorifera (potenza e rendimento EER)
- contesto climatico
- mese, ora, durata del viaggio
- durata della fase di carico
- temperatura di set-up interno
- tipo, quantità e temperatura della merce trasportata.

Una volta inseriti questi parametri è possibile già calcolare i carichi termici, i consumi termici ed elettrici previsti e le emissioni di CO₂ previste.

Dai dati dei carichi termici e a partire dalla temperatura di set-up interno è possibile effettuare la scelta e il dimensionamento del PCM. Una volta fatta questa scelta è possibile avere le ore di autonomia prevista e l'energia termica che il PCM può assorbire.

I risultati vengono forniti in forma tabellare e grafica, e la finestra è pronta per essere stampata sotto formula di modulo in formato A4.

4.2 *Requisiti del sistema*

Il foglio di lavoro è stato sviluppato in ambiente Microsoft Excel® ed è compatibile con tutte le versioni più recenti di excel sia in ambiente Windows che Mac. L'estensione del file è del tipo .xls.

Non è stata verificata la compatibilità con altri software simili, tipo Open Office (open Source) o Number (Apple), ma non dovrebbero sussistere limiti per l'utilizzo con altri software similari.

Il foglio di calcolo non presenta dimensioni tali da avere la necessità di pc con elevate caratteristiche, e risulta idoneo all'utilizzo anche su computer non di ultima generazione.

Seppur nelle verifiche effettuate non si siano riscontrati problemi di alcun tipo riguardo la compatibilità software e hardware, non è possibile escludere malfunzionamenti nel caso di computer, sistemi operativi, o software troppo vecchi.

4.3 Struttura del foglio di calcolo



TOOL DI CALCOLO CELLE FRIGORIFERE


UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

Geometria e involucro



B	2	(m)
L	2	(m)
H	2	(m)

l	1	(m)
h	1	(m)

s	0,1	(m)
---	-----	-----

s	0,1	(W/m²K)
---	-----	---------

e	0,9	(0-1)
---	-----	-------

1	(kW)
---	------

1	(kW/kWh)
---	----------

Dati climatici

fascia climatica	Centro
mese	luglio

ora di partenza	12	h
durata prevista carico	600	sec
durata prevista viaggio	12	h
temperatura interna [°C]	5	

Carico e viaggio

n.	prodotto	kg	[°C]
1	BURRO	10	20
2			
3			
4			
5			

n.	prodotto	kg	[°C]
6	MELE	10	20
7			
8			
9			
10			

PCM

TIPO	RT10HC
QUANTITA' CONSIGLIATA (kg)	30
QUANTITA' INSERITA (kg)	5

TEMPERATURA DI FUSIONE PCM TROPPO ALTA

autonomia (h)	0	calore assorbito (kJ)	815
---------------	---	-----------------------	-----

RISULTATI

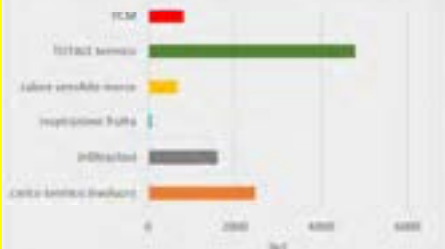
carico termico involucro	2462	(kJ)
infiltrazioni	1591	(kJ)
respirazione frutta	72,06	(kJ)
calore sensibile merce	655,9	(kJ)
TOTALE termico	4781	(kJ)

78,34	(W)
2651	(W)
2	(W)
1000	(W)

peso PCM	5	(kg)
volume PCM	0,006	(m³)
% in volume	0,1	(%)

consumo elettrico previsto	1,328	(kWh)
----------------------------	-------	-------

emissioni CO ₂ previste	0,507	(kgCO ₂)
------------------------------------	-------	----------------------



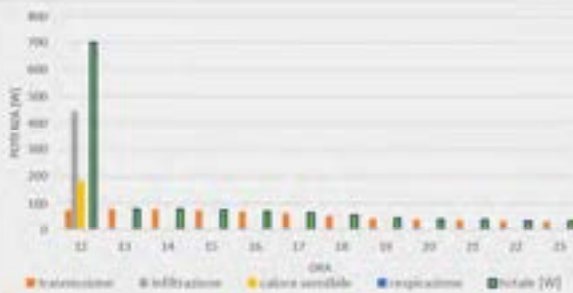
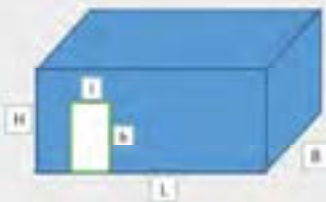


Figura 28: Schermata Tool di calcolo.

4.4 Dati di input

4.4.1 Caratteristiche geometriche e impiantistiche

Geometria e involucro



1

DIMENSIONI ESTERNE		
B	2	[m]
L	2	[m]
H	2	[m]

DIMENSIONI PORTA		
l	1	[m]
h	1	[m]

2

spessore parete		
s	0,1	[m]

trasmissione parete		
s	0,1	[W/m²K]

emissività esterna parete		
ε	0,9	[0-1]

3

potenza termica	1	[kW]
resa EER	1	[kWt/kWe]

4

Figura 29. Schermata Tool di calcolo: sezione inserimento caratteristiche cella.

Le caratteristiche geometriche della cella frigorifera devono essere inserite nell'apposito riquadro (1) ed espresse in metri [m]. Il parametro B è la larghezza, L è la lunghezza e H l'altezza esterna della cella. Nel riquadro (2) devono essere inserite le dimensioni della porta, larghezza (l) e altezza (h) sempre espresse in metri.

Ai fini del calcolo dei carichi termici la porta viene considerata realizzata con la stessa stratigrafica delle pareti, della copertura e del pavimento, mentre le dimensioni sono utilizzate nel calcolo delle infiltrazioni dovute all'apertura della porta.

Nel riquadro (3) si inseriscono le caratteristiche dell'involucro (parete, soffitti e copertura), in particolare:

- spessore della parete, espresso in metri [m] necessario per il calcolo del volume netto interno.
- trasmittanza termica dell'involucro, espressa in $[W/m^2K]$.

In assenza di dati tecnici del costruttore è possibile utilizzare la seguente tabella, che fornisce un valore U al variare dello spessore, considerando uno strato di materiale isolante con una conducibilità termica $\lambda=0,04$ W/mK (media valore di progetto tra poliuretani e polistireni da UNI 10351 [22]). Parete, copertura e pavimento vengono considerati con lo stesso valore anche se variano le resistenze superficiali esterne ed interne e possono variare gli strati. In presenza di forte disomogeneità tra i valori fare una media pesata con tutte le superfici dei valori di ciascuna tipologia.

spessore [cm]	trasmittanza termica U $[W/m^2K]$
4	0,85
5	0,70
6	0,60
7	0,52
8	0,46
9	0,41
10	0,37
11	0,34
12	0,32
13	0,29
14	0,27
15	0,26
16	0,24
18	0,21
20	0,19

Tabella 5. Valori approssimativi di trasmittanza termica in funzione dello spessore dello strato di isolamento termico

- coefficiente di assorbimento della radiazione solare, parametro adimensionale che può essere compreso tra i valori 0 e 1 che rappresenta la frazione di energia assorbita da una superficie rispetto a quella che assorbirebbe un corpo ideale nero. Più il colore sarà tendente al nero e più il coefficiente di assorbimento tenderà a 1, mentre più sarà chiaro e più il valore sarà basso, tendendo a un valore pari a 0 per una superficie a specchio perfettamente lucida. In assenza di dati riguardanti l'assorbimento si possono utilizzare i valori riportati in tabella

superficie	coefficiente di assorbimento solare
asfalto	0,93
acciaio zincato	0,90
pittura grigia	0,75
alluminio verniciato	0,55
pittura media	0,50
pittura bianca	0,29
metallo cromato	0,28
alluminio lucido	0,15

Tabella 5. Valori tipici del coefficiente di assorbimento solare per diverse superfici

4.4.2 Carico e viaggio

Dati climatici

fascia climatica	Centro
mele	luglio

A

ora di partenza	12	h
durata prevista carico	600	sec
durata prevista viaggio	12	h
temperatura interna [°C]	5	

B

Figura 30: Schermata Tool di calcolo: sezione inserimento dati climatici e di viaggio.

I dati climatici provengono “Dati climatici per la progettazione edile ed impiantistica” Appendice 1 alla “Guida al controllo energetico della progettazione” del Consiglio Nazionale delle Ricerche (Roma, 1982) [23] e sono riferiti alle località di:

- Milano – per la fascia climatica del Nord Italia
- Roma – per la fascia climatica del Centro Italia
- Messina – per la fascia climatica del Sud Italia

Nel software sono stati inseriti i dati relativi a:

- Temperatura dell’aria
- Umidità Relativa
- Irraggiamento sul piano
 - Orizzontale
 - Sud
 - Est
 - Ovest
 - Nord

Attraverso la selezione della fascia climatica e del mese di viaggio (A) si vanno a definire i parametri climatici esterni per il calcolo dei carichi termici dovuti alla trasmissione attraverso l’involucro e per il calcolo delle infiltrazioni d’aria derivanti dall’apertura della porta durante la fase di carico.

Per effettuare il calcolo si devono inserire inoltre i dati relativi all’ora di partenza che coincide con la fase di carico, alla durata di quest’ultima fase e dell’intero tragitto (B). Con l’inserimento di questi valori si vanno a definire i parametri per il calcolo dei carichi termici attraverso l’involucro. Inoltre, da questi dati si definiscono i parametri per il calcolo delle infiltrazioni d’aria al momento del carico, dovute all’apertura della porta.

Infine nella parte B si inserisce uno dei parametri chiave per il calcolo delle potenze e delle energie, che è la temperatura dell’aria impostata nell’ambiente interno.

Questo parametro dipende dal tipo di materiale trasportato e dal tipo di macchina refrigerante si ha a disposizione. La temperatura interna oltre ad influenzare il bilancio energetico della cella, va a condizionare la scelta del PCM che dovrà quindi avere una temperatura di fusione idonea con la temperatura di set-point interno.

4.4.3 Merce trasportata

In questa sezione è possibile inserire le caratteristiche della merce che verrà caricata e trasportata.

Ai fini del calcolo si devono inserire i seguenti dati:

- tipo di merce (categorie: vegetali, frutta, latticini, carne)
- quantità in peso [kg]
- temperatura al momento del carico.

Carico e viaggio							
n.	prodotto	kg	[°C]	n.	prodotto	kg	[°C]
1	BURRO	10	20	6	MELE	10	20
2				7			
3				8			
4				9			
5				10			

Figura 31. Schermata Tool di calcolo: sezione inserimento dati merce trasportata

Attraverso l'inserimento di queste grandezze è possibile calcolare l'eventuale carico termico sensibile derivante dall'inserimento nella cella frigorifera di materiale a temperatura diversa da quella dell'ambiente interno alla cella e che quindi dal momento del carico in poi andrà in equilibrio con l'ambiente della cella, richiedendo o rilasciando energia.

Nel caso che la merce sia alla stessa temperatura della cella la richiesta sarà pari a zero, nel caso che la merce sia a temperatura più alta sarà richiesta energia per abbassare la propria temperatura. Viceversa se la merce sarà a temperatura più bassa, contribuirà positivamente all'assorbimento del carico termico dovuto alle altre azioni (infiltrazioni, trasmissione, evaporazione). Il calcolo del calore specifico è effettuata basandosi su formule empiriche in funzione della percentuale di parte solida e acqua di ciascun materiale

Per i vegetali e la frutta, il tool calcola il calore emesso per effetto del metabolismo respiratorio, che dipende dal tipo di frutta o ortaggio, temperatura e infine quantità.

4.4.4 Scelta del PCM

In questa sezione è possibile andare a selezionare il tipo e la quantità di PCM.

Una volta inserito il tipo di PCM, appare la quantità consigliata, calcolata in modo da garantire l'autonomia completa della cella. Inoltre, sulla destra, compare il messaggio che indica se il tipo di PCM scelto è compatibile con i livelli di temperatura interni dell'aria della cella frigorifera.

Quando si va ad inserire la quantità inserita, il tool calcola l'autonomia in ore garantita dal PCM e il calore assorbito.

Una freccia indica se la quantità è inferiore, superiore o corretta rispetto a quanto consigliato.



PCM	
TIPO	RT10HC
QUANTITÀ CONSIGLIATA [kg]	30
QUANTITÀ INSERITA [kg]	5

autonomia [h]

0

calore assorbito [kJ]

815

Figura 32. Schermata Tool di calcolo: sezione inserimento tipo di PCM.

4.5 Risultati

4.5.1 Calcolo dei carichi termici attraverso l'involucro

Il calcolo dei carichi termici attraverso l'involucro viene effettuato considerando l'inerzia delle strutture dell'involucro nulle, avendo un'inerzia trascurabile. Con tale presupposto il carico termico della cella per effetto della differenza di temperatura tra esterno ed interno è, in un determinato istante, determinato dalla seguente relazione:

$$Q_{trasm} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot U_i \cdot (T_e - T_i)$$

Dove:

A_i = è la superficie dell'elemento i-esimo [m^2]

U_i = è la trasmittanza termica dell'elemento i-esimo [W/m^2K]

T_{est} = è la temperatura esterna [$^{\circ}C$]

T_{int} = è la temperatura interna [$^{\circ}C$]

Per tenere conto dell'effetto combinato della differenza di temperatura e dell'irraggiamento solare viene utilizzato un unico parametro sintetico, chiamato "temperatura aria-sole": esso rappresenta la temperatura che dovrebbe avere l'aria esterna per generare, su una parete in ombra, lo stesso scambio termico realizzato nella realtà dall'azione combinata della temperatura esterna e della radiazione solare. Il calcolo della temperatura aria-sole si effettua secondo la relazione:

$$T_{as} = T_e + \frac{I \cdot a_s}{h_{oe}}$$

in cui:

T_e = temperatura esterna [$^{\circ}C$]

I = irradianza solare [W/m^2]

a_s = coefficiente di assorbimento solare della finitura esterna

h_{oe} = coefficiente di adduzione esterno [W/m^2K]

Quindi la sommatoria dei carichi termici per il periodo di viaggio è l'energia termica che deve essere sottratta alla cella per mantenere l'aria interna alla temperatura impostata.

La trasmittanza termica della struttura dell'involucro può essere determinata utilizzando la seguente relazione:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + R_t + \frac{1}{h_i}}$$

Dove

H_i = coefficiente di adduzione interno

R_t = somma delle resistenze dei singoli strati che costituiscono l'involucro.

4.5.2 Calcolo delle infiltrazioni

Nel calcolo del carico termico vengono considerati carichi termici che derivano dall'apertura della porta. Per effetto della differenza di densità tra l'aria esterna e quella interna si genera un movimento d'aria tra l'interno e l'esterno attraverso la superficie della porta, in particolare l'aria più fredda tenderà a fuoriuscire dalla parte bassa della porta e l'aria calda a entrare dalla parte alta della porta.

Il flusso di scambio dell'aria sarà proporzionale alla differenza di temperatura e alle dimensioni della porta. In particolare viene utilizzata la seguente formula empirica [24]:

$$v = \frac{4.88 \cdot \sqrt{h \cdot 3.2808} \cdot \sqrt{\Delta T \cdot 1.8 + 32}}{60 \cdot 3.2808} = 0.044903 \cdot \sqrt{h} \cdot \sqrt{\Delta T \cdot 1.8 + 32}$$

Dove

V = velocità dell'aria espressa in m/s

H = altezza espressa in metri

Delta T = Test-Tint espressa in °C

Il volume di infiltrazione sarà pari a:

$$V = \frac{v \cdot h \cdot l}{2}$$

Dove

l = larghezza della porta [m]

h = altezza della porta [m]

V = volumi di ricambio [m³/sec]

Il calcolo è realizzato per iterazione e viene effettuato con un intervallo di un secondo, in modo da considerare che la temperatura dell'aria interna varia per effetto dell'apertura della porta. Infatti quando la porta è aperta, con il passare del tempo ci sarà una miscelazione dell'aria interna con il flusso dell'aria esterna che entra dalla porta. Quindi la temperatura dell'aria subirà un incremento della temperatura dipendente sia dal volume che dalla temperatura dell'aria interne e di ingresso. Risultante di questa miscelazione è che la temperatura interna innalzandosi determina progressivamente una riduzione della differenza di temperature, della velocità media dell'aria di ingresso e quindi del volume di rinnovo.

L'infiltrazione d'aria determina un carico termico totale caratterizzato da una componente sensibile e una componente latente di condensazione del vapore acqueo [25].

La componente sensibile si può calcolare attraverso la seguente relazione:

$$Q_{sensibile} = \dot{V}_{aria} \cdot \rho \cdot (h_{esterna} - h_{interna}) \quad [W]$$

dove:

Varia è la portata d'aria di rinnovo [m³/sec]

r è la densità dell'aria [kg/m³]

h_{esterna} è l'entalpia specifica dell'aria esterna [J/kg]

h_{interna} è l'entalpia specifica dell'aria interna [J/kg]

La componente latente si può calcolare attraverso la seguente relazione:

$$Q_{latente} = \dot{V}_{aria} \cdot \rho \cdot h_{fg} \cdot (X_{est} - X_{int})$$

dove

X_{est} è il contenuto d'acqua dell'aria ambiente esterno [kg/kg]

X_{int} è il contenuto d'acqua dell'aria ambiente interno [kg/kg]

H_{fg} è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua [J/kg]

Il carico termico totale per infiltrazione è dato dalla somma delle due componenti:

$$Q_{inf} = Q_{sensibile} + Q_{latente}$$

4.5.3 Calcolo del carico termico sensibile

L'introduzione della merce a una temperatura superiore di quella dell'aria interna determina un carico termico che deve essere assorbito dalla macchina frigorifera o dal PCM.

Per il calcolo del carico termico sensibile si utilizza la seguente formula

$$Q_{sen} = \sum_{i=1}^n c_{p,i} \cdot m_i \cdot (T_{merce,i} - T_{int})$$

Dove:

Q_{sen} = calore termico sensibile [kJ]

$c_{p,i}$ = calore sensibile della tipologie di merce i-esima [kJ/kg*K]

m_i = massa della merce i-esima [kg]

$T_{merce,i}$ = temperatura della merce i-esima al momento dell'inserimento nella cella [°C]

T_{int} = temperatura di set point dell'aria interna alla cella [°C]

n = è il numero delle tipologie di merce (tipo, temperatura) caricata

Dal momento dell'inserimento della merce, per effetto del trasferimento del calore con l'aria interna alla cella frigorifera, per effetto della differenza di temperatura, l'aria inizia a scaldarsi e la macchina frigorifera si accende per riportare la temperatura al valore di set-point. Questo avviene finché la merce non arriva alla stessa temperatura dell'ambiente. Quindi il processo di raffreddamento inizia al caricamento della merce e va avanti fino a quando questa non risulta in equilibrio. La velocità con cui avviene lo scambio termico tra merce e aria dipende dal coefficiente di scambio termico superficiale e dalla superficie a contatto con l'aria. Il coefficiente di scambio termico superficiale sarà composto da una parte derivante dallo scambio termico per irraggiamento e una seconda parte di convezione, naturale o forzata.

Questo meccanismo di scambio risulta complesso perché la geometria e la disposizione della merce non permette una facile valutazione sia del coefficiente di scambio termico sia della superficie della merce che è a contatto con l'aria.

Per semplificare il calcolo, si ipotizza che tutta la potenza frigorifera disponibile (potenza macchina – potenza già impegnata per gli altri carichi) concorra alla riduzione di temperatura, fino a completo assorbimento di tutto il calore sensibile. Tale approssimazione determina una sovrastima della potenza massima necessaria, ma non determina errori nella valutazione di energia.

Il calore sensibile delle diverse categorie di prodotto, vengono calcolate a partire dalla percentuale di acqua del prodotto, attraverso la seguente relazione [25]:

$$c_p = 3,35 \cdot a + 0,48$$

Dove:

C_p = è il calore specifico della tipologia di prodotto caricata [kJ/kg*K]

a = è la percentuale di acqua che esso contiene [%]

In allegato è possibile trovare le tabelle del contenuto d'acqua di gran parte di vegetali, frutta, carne, pesce e latticini.

4.5.4 Calcolo del carico termico dovuto alla respirazione

La frutta fresca e i vegetali sono prodotti "vivi" che continuano a respirare e ad avere un'attività metabolica anche dopo giorni e settimane dopo la raccolta. Durante la respirazione il glucosio si combina con la molecola di ossigeno per produrre anidride carbonica e acqua. Il calore di respirazione è rilasciato durante questa reazione esotermica che si aggiunge al carico frigorifero durante il raffreddamento e il trasporto della merce. La quantità di energia emessa varia sensibilmente con la temperatura: più la temperatura si abbassa più questa diminuisce. In aggiunta, il calore di respirazione varia al variare del prodotto. Il calore di respirazione di molti ortaggi diminuisce con il tempo, mentre aumenta con la maturazione per alcuni tipi di frutta (tipo mele e pesche). Il carico frigorifero prodotto dalla respirazione è:

$$Q_{resp} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot q_{resp}$$

Dove:

Q_{resp} = potenza frigorifera causata dalla respirazione della merce [W]

m_i = massa della merce i-esima [kg]

q_{resp} = potenza specifica emessa per respirazione [W/kg]

Il valore di potenza specifica emessa da ciascuna tipo di ortaggio o frutta è dipendente dalla temperatura e varia al variare di questa. Per il calcolo viene utilizzato il valore corrispondente alla temperatura al momento del carico.

Le tabelle con le potenze specifiche per i diversi tipi di frutta e ortaggi sono riportate in appendice.

4.5.5 Energia consumata

Il carico termico totale è dato dalla somma delle diverse componenti quindi dalla seguente relazione:

$$Q = Q_{trasm} + Q_{infiltr} + Q_{sens} + Q_{resp}$$

Nel parte bassa del tool vengono riportati i risultati sia in forma tabellare che grafica.

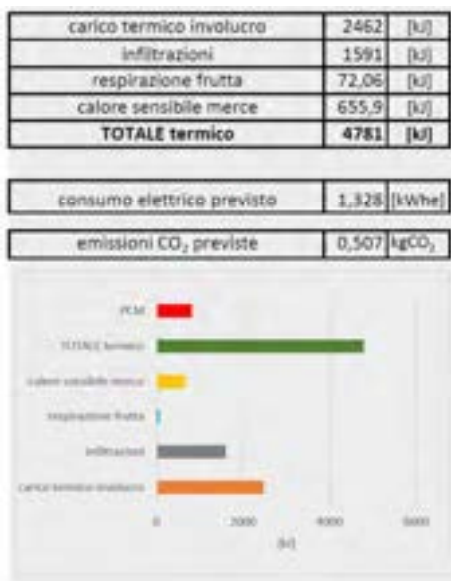


Figura 33. Schermata Tool di calcolo: sezione dei risultati.

I valori vengono riportati anche in termini di potenza:

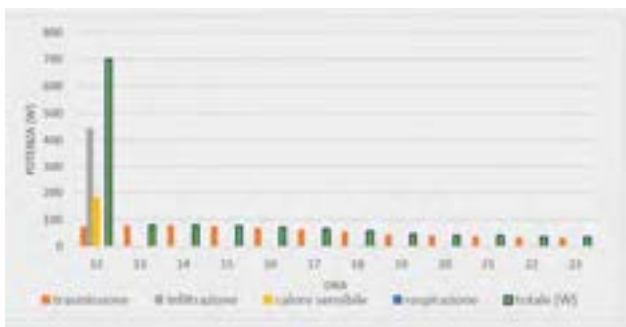


Figura 34. Schermata Tool di calcolo: sezione dei risultati con i valori orari.

4.5.6 Calcolo delle emissioni di CO₂

Il calcolo delle emissioni di CO₂ è fatto a partire dal consumo in energia elettrica. Infatti attraverso l'utilizzo del fattore di conversione del mix elettrico italiano (0,382 kgCO₂/kWh_e- Rapporto ISPRA 172/2012 (valore 2010 [26]) è possibile effettuare il calcolo moltiplicando il consumo elettrico per il suddetto coefficiente di conversione.

5 Conclusioni

5.1 PASSAGGI FONDAMENTALI DELLA RICERCA

Il bilancio energetico di una cella frigorifera è determinato da una serie di “carichi termici” legati ai componenti della cella stessa ed alle sostanze che vengono in essa introdotte. In particolare si possono individuare le seguenti entrate di calore:

- Carico dovuto alla trasmissione di calore dall'esterno verso l'interno attraverso le pareti, il pavimento ed il soffitto. Se la cella è in locali interni questo carico è legato alla differenza di temperatura tra l'aria del locale e quella interna alla cella stessa e ad eventuali sistemi che irradiano verso la cella stessa. Se invece la cella è posta all'esterno, per esempio montata su un carro semovente (treno, camion o nave), allora è necessario contabilizzare anche il calore derivato dall'assorbimento, da parte della superficie esterna dell'involucro, della radiazione solare incidente sui vari piani che formano il contenitore.
- Carico legato all'introduzione della merce che se in equilibrio con l'ambiente esterno ha una temperatura simile a quella dell'aria esterna (e così il contenitore della merce). Pertanto proporzionalmente al calore specifico del prodotto e del materiale costituente il contenitore, il calore introdotto potrà assumere valori importanti.
- Carico dovuto all'apertura e chiusura delle porte, fenomeno questo spesso legato alla movimentazione dei prodotti, che produce a sua volta la fuoriuscita di aria fredda e l'ingresso di aria più calda da riportare ai valori di temperatura di funzionamento della cella;
- Carico dovuto alle fonti energetiche presenti all'interno del vano cella come luci, motori per la ventilazione ecc., ecc..
- Carichi dovuti alle variazioni di maturazione delle merci se costituite ad esempio da frutta e verdura.

Il confronto nel comportamento energetico della cella implementata con materiale a passaggio di fase nella stratificazione delle pareti costituenti l'involucro con quello della cella tradizionale di riferimento è stato l'argomento di ricerca dei primi due anni di programma.

I temi sui quali a Settembre 2014 si era imperniata la proposta di ricerca del terzo anno erano i seguenti:

- A. L'analisi di comportamento della cella frigorifera modificata nel suo assetto con l'integrazione di uno scambiatore di calore contenente PCM in corrispondenza dell'evaporatore della macchina frigorifera. Secondo valutazioni teoriche i benefici sul comportamento termodinamico della cella frigorifera avrebbero riguardato:
 - 1. Innalzamento del valore di efficienza frigorifera e abbattimento dei costi energetici;
 - 2. Stabilizzazione della temperatura di uscita dall'evaporatore del flusso d'aria che, se troppo bassa o troppo alta, può determinare il deterioramento o congelamento della merce direttamente esposta;
 - 3. Incremento e il controllo dello scambio termico convettivo del PCM con l'ambiente refrigerato passando da naturale a forzato, con la possibilità di controllo al fine di stabilizzare la temperatura
 - 4. Uniforme distribuzione delle temperature dell'aria nel vano per evitare fenomeni di stratificazione termica che determinerebbe diversi gradi di maturazione delle sostanze organiche nella direzione verticale.
- B. Produzione di uno strumento rapido di calcolo destinato a fornire informazioni agli operatori della catena del freddo e soprattutto a quelli delle celle frigorifere. L'uso dello strumento di valutazione

deve permettere all'operatore di implementare la macchina frigorifera, prima di un trasporto, di un elemento di scambio termico contenente il PCM ottimizzato, per aumentare l'efficienza energetica in funzione dell'area geografica nella quale il trasporto dovrà essere effettuato.

Al termine del periodo nel quale il terzo anno di ricerca si è sviluppato si sono potuti elaborare i risultati di un articolato programma di prove sperimentali basate sul confronto di due celle identiche di cui una implementata con uno scambiatore di calore contenente un adeguato PCM. Per effettuare le varie campagne sperimentali sono stati approvvigionati sia una certa quantità di bottiglie di acqua che un carico di circa 170 kg di frutta fresca (pesche noce) che hanno costituito i carichi termici interni al vano refrigerato. I vari test sono stati eseguiti sottoponendo le celle frigorifere ad una serie di azioni che introducono nella cella carichi termici di differente origine.

Le azioni che normalmente creano un carico termico sono:

- Trasmissione del calore attraverso l'involucro;
- Apertura delle porte per simulare le operazioni svolte dagli operatori della catena del freddo;
- Introduzione di carico esterno a temperatura in equilibrio con quella dell'ambiente esterno.

E' stato altresì analizzato il comportamento della cella frigorifera che da regime stazionario passa alla assenza di alimentazione elettrica, al fine di verificarne il comportamento in caso di black-out elettrico.

Per quanto riguarda lo strumento di calcolo invece è stato prodotto un foglio in Excel la cui struttura permetterà in seguito una continua implementazione con ulteriori categorie di dati che permetterà di ottenere un tool molto importante per la gestione delle celle frigorifere nelle varie fasi della catena del freddo.

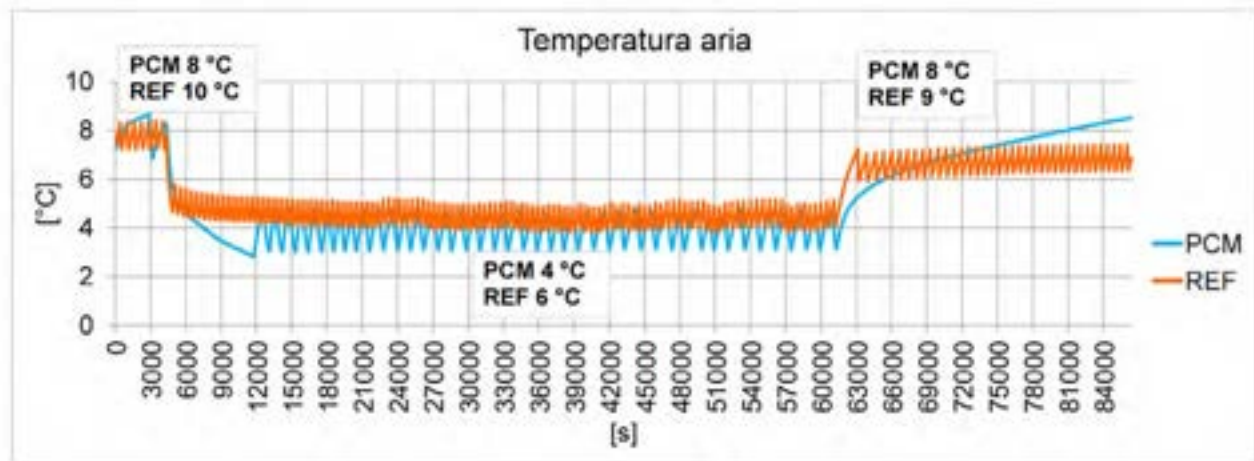
In conclusione, tutti gli obiettivi principali della proposta di ricerca sono stati raggiunti. In particolare è stata data dimostrazione di come l'implementazione con PCM del gruppo frigorifero installato a bordo di una cella possa aumentare le prestazioni energetiche dell'intero sistema, facendo diminuire i consumi di energia elettrica per il funzionamento. Considerando i positivi risultati raggiunti anche nei primi due anni, basati sull'applicazione dei PCM alla stratificazione di una cella collocata su un sistema di trasporto, si può concludere che l'uso dei materiali in passaggio di fase nei sistemi costituenti la catena del freddo potrà contribuire alla diminuzione dei consumi di energia elettrica. La realizzazione di uno strumento di calcolo semplificato ad uso degli operatori del settore catena del freddo per la scelta del sistema da installare sulla cella frigorifera per funzionare sotto particolari condizioni al contorno, potrà contribuire alla diffusione e all'uso di celle frigorifere implementate con PCM.

5.2 RISULTATI DELLA RICERCA

5.2.1 Analisi sperimentale

I risultati dell'intero periodo di ricerca hanno dato risposta a quanto preventivato, confermando come l'inserimento del PCM all'interno del vano refrigerato, in corrispondenza dell'evaporatore, porti effettivamente ad un aumento dell'efficienza energetica del sistema, ma indica anche come si possano avere benefici gestionali nella gestione della macchina stessa. Infatti, esaminando gli andamenti dei vari parametri misurati, si nota come l'uso del PCM abbatta di circa il 50% il numero di cicli nel tempo di intervento del gruppo frigorifero per dare le stesse condizioni di temperatura all'interno del vano refrigerato. Considerando comunque le aree sottese alle curve di funzionamento si evince come i cicli riguardanti in PCM, caratterizzati da una frequenza nettamente inferiore, mostrino anche una minore energia impegnata fino al raggiungere percentuali molto interessanti fino al 16%. Questo dato che a prima vista potrebbe non impressionare è invece interessante poiché si riscontra su un sistema che ha ormai raggiunto un grado di ottimizzazione molto elevato. La rilevante riduzione dei cicli di funzionamento indica anche una riduzione altrettanto elevata di utilizzo dei componenti elettro-meccanici della compressione e delle valvole di regolazione con un proporzionale aumento della vita della macchina nel suo complesso.

La presenza di materiale in passaggio di fase all'interno del box refrigerato garantisce altresì gli operatori dai rischi di black-out elettrico della rete in quanto il quantitativo di PCM utilizzato nelle sperimentazioni (circa 17 kg), se preventivamente portato allo stato solido permette il mantenimento, dopo spegnimento, della temperatura al di sotto di quella di una identica cella di riferimento senza PCM, alimentata elettricamente, per un periodo superiore di 2 ore e addirittura può registrare un aumento di temperatura dell'aria interna da 3,5°C fino a 7.5 °C per un periodo di inattività del gruppo frigo di tre ore come è possibile evincere dal diagramma riportati i dati registrati in una fase della sperimentazione.



In pratica si può dire che la cella funziona in caratteristiche di semi passività. Sullo stesso diagramma è poi possibile aggiungere una ulteriore considerazione sulle modalità di utilizzo del sistema di distribuzione elettrico nazionale. Infatti la capacità del PCM di mantenere a cella spenta i valori di temperatura dell'aria interna alla cella per un tempo assai lungo, suggerisce la modalità di utilizzo di tutte le macchine frigo costituenti gli anelli attivi della catena del freddo in modalità notturna durante la quale si fanno passare di fase allo stato solido raggiungendo valori di temperatura compatibili con le temperature di mantenimento dei materiali organici refrigerati. I materiali in passaggio di fase. Successivamente all'inizio del periodo diurno, le macchine frigorifere vengono disinserite da rete. In questo modo si possono utilizzare fasce orarie durante le quali la rete elettrica è sottoutilizzata, alleggerendone invece il carico nei periodi di massimo picco di utilizzo dell'energia elettrica. Considerando quanto percentualmente sul consumo elettrico nazionale pesi la catena del freddo, si può concludere che l'uso dei PCM in modo diffuso potrebbe portare rilevanti benefici al sistema elettrico. Gli operatori avrebbero la possibilità di avere significativi risultati economici in quanto le fasce notturne di utilizzo prevedono una diminuzione dei costi dell'energia e ciò potrebbe riflettersi anche sul costo finale del prodotto, incentivandone l'acquisto e quindi aumentandone i consumi.

L'uso delle macchine solamente durante il periodo notturno aumenta ulteriormente l'efficienza del gruppo frigorifero in quanto lo smaltimento del calore da parte del condensatore può avvenire ai bassi livelli di temperatura caratteristici del periodo notturno facendo innalzare l'isoterma del ciclo inverso di Carnot, diminuendo il lavoro di compressione ed il conseguente utilizzo di energia elettrica.

Dal punto di vista del miglioramento delle condizioni termiche all'interno alla cella, si può notare come lo scambiatore di PCM posto a valle dell'evaporatore consente una stabilizzazione della temperatura di mandata dell'aria. Tale temperatura rilevata dopo il PCM risulta avere un valore minimo $>1,5^{\circ}\text{C}$ superiore alla soglia dei 0°C che determina congelamento della merce direttamente esposta. Nella cella di riferimento invece tale valore minimo raggiunge il valore di $-1,5^{\circ}\text{C}$.

5.2.2 Tool di calcolo

Come evidenziato in precedenza ed ampiamente descritto, lo strumento di calcolo prodotto permetterà di implementare la cella con un sistema inerziale intercambiabile nel tipo di PCM, con lo spessore ottimizzato per aumentare il rendimento della macchina frigorifera, in funzione del tipo di merci da trasportare e dell'area geografica nella quale la cella si troverà ad operare. Per questo l'utente dovrà unicamente richiamare i dati climatici della zona di transito e fissare il tipo di merci da inserire nella cella.

5.3 INDICAZIONI PROGETTUALI

I risultati della ricerca hanno dato anche evidenti indicazioni alla ingegnerizzazione del sistema proposto. Un primo effetto della sperimentazione è quello che ha evidenziato come il fenomeno di scambio termico tra l'aria refrigerata e il PCM sia poco efficace ai fini del corretto funzionamento del sistema.

Come dettagliatamente specificato all'interno della relazione lo scambiatore di calore utilizzato è formato da n°6 elementi in alluminio a forma di parallelepipedo allungato, schiacciato sulla cui superficie esterna sono realizzate alette poco sviluppate in altezza e in numero limitato. Questo ovviamente è determinato, nell'oggetto utilizzato, dal fatto che lo scambiatore è prodotto per estrusione di un condotto a sezione rettangolare che tagliato a misura, viene successivamente chiuso sulle superfici di testata con rettangoli anch'essi di alluminio, informa rettangolare, uno dei quali provvisto di foro filettato per l'introduzione del PCM in fase liquida. La modalità costruttiva di estrusione permette ovviamente di realizzare alette di sezione consistente, di altezza limitata e soprattutto sviluppate longitudinalmente. Questo non ha permesso nella configurazione evaporatore-scambiatore PCM di realizzare uno scambio termico efficace a flussi incrociati. Inoltre, essendo la sezione del vano contenente il PCM di altezza rilevante, durante il processo di scambio termico la parte di PCM a contatto con la superficie interna dello scambiatore passa di fase, creando uno spessore di materiale che a sua volta determina una resistenza termica capace di rallentare prima e inibire poi il processo di scambio termico. In questo modo non tutta la massa del PCM partecipa al fenomeno di attenuazione del funzionamento della macchina frigorifera, soprattutto per il fatto che in tempi dei cicli sono brevi e quindi non idonei al completo passaggio della fase del PCM. Invece nelle fasi di black-out, essendo il periodo di funzionamento notturno lungo durante il quale viene abbassata la temperatura per portare il PCM allo stato solido, l'inconveniente del poco efficace fenomeno di scambio termico non influisce sul completamento del fenomeno. A seguito di queste considerazioni, l'indicazione progettuale è quella di utilizzare uno scambiatore liquido aria che permetta di instaurare un coefficiente di scambio termico globale più elevato aria-liquido, aria-solido come ad esempio una batteria di scambio termico in rame con pacco lamellare in alluminio, fortemente sviluppato e con passo delle alette molto breve, per avere una elevata superficie di scambio con l'aria. Ovviamente facendo passare il PCM all'interno di un tubo la sezione diminuisce permettendo al PCM di passare in sezione completamente di fase. In questo modo anche la massa del materiale sarà dimensionata per l'effettivo utilizzo. Sempre come indicazione progettuale, per aumentare ulteriormente l'efficacia dello scambio, sarebbe opportuno diminuire le fasi di scambio e quindi trasformare il sistema (evaporatore-aria-scambiatore PCM-aria) in (scambiatore evaporatore - PCM-aria).

Un secondo risultato della ricerca fissa l'attenzione sul tipo di PCM da utilizzare. Infatti il PCM si trova a lavorare tra la temperatura in uscita dall'evaporatore e la temperatura di set-point della cella frigorifera. Essendo la prima ad un livello inferiore a quella della seconda ed essendo lo scambiatore a contatto con tutte e due, se lo scambiatore non è ottimizzato (come detto in precedenza) e se la temperatura di passaggio di fase non è accuratamente scelta, più vicina a quella dell'aria in uscita dall'evaporatore, il PCM stesso passerà sempre parzialmente di fase.

Le celle frigorifere utilizzate durante la sperimentazione sono di tipo commerciale i cui componenti non sono stati progettati per funzionare con l'implementazione del PCM. Tra questi l'apparato elettronico e soprattutto la scheda di gestione che non tenendo conto della presenza di una massa inerziale che collabora

con la cella stessa non ne esalta il contributo in termini di risparmio energetico ed efficacia del processo di refrigerazione. Pertanto è auspicabile anche la riprogettazione di questi componenti della macchina frigorifera.

5.4 CONSIDERAZIONI FINALI

Nei tre anni in cui si è sviluppata la ricerca riguardante l'uso dei materiali in passaggio di fase PCM all'interno nelle macchine frigorifere si sono studiate, analizzate teoricamente attraverso simulazione numeriche e sperimentate soluzioni diverse quali:

1. Il thermal-shield (lo scudo termico) che prevede l'implementazione del PCM sulla superficie esterna dei pannelli stratificati costituenti l'involucro della cella frigorifera,
2. Lo scambiatore abbinato al gruppo frigorifero in corrispondenza dell'evaporatore,
3. La massa interna necessaria ad assorbire i carichi interni dovuti alle aperture delle porte e l'introduzione di materiale organico a temperatura superiore a quella dell'aria all'interno della cella a regime stazionario.

Se la prima delle soluzioni ha lo scopo di ridurre i carichi termici diurni all'interno della cella dovuti all'assorbimento della radiazione solare da parte della superficie esterna dell'involucro di una cella che viaggia all'esterno e alla differenza di temperatura tra aria interna e quella esterna che varia in funzione dell'ora del giorno, della stagione e della latitudine del luogo, nelle altre due si è dato enfasi ai carichi termici che si manifestano all'interno del vano refrigerato per la presenza del materiale organico e legati alla introduzione di aria calda che sostituisce quella fredda a seguito della apertura della porta del vano cella.

Questi vari tipi di applicazione del PCM alle celle frigorifere non sono alternativi gli uni agli altri, ma nel caso di celle frigorifere che viaggiano su rotaia, gomma o nave risultano complementari.

In caso di celle fisse all'interno di siti industriali-commerciali, lo scudo termico risulta inutile, mentre rimangono valide le soluzioni di uso interno del PCM.

6 Riferimenti bibliografici

- [1] Family of International Standards addresses food safety management.
- [2] S.A. Tassou, G. De-Lille, Y.T. Ge, Food transport refrigeration - approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport, *Applied Thermal Engineering* 29(2009) 8-9.
- [3] UKCERK. Catering Policy (available online, http://www.ukerc.ac.uk/component/option,com_docman/task,doc_download/gid,235).
- [4] V. Stahl, F.T. Ndoeye, M, El Jabri, J.F. Le Page, B. Hezard, A. Lintz, A.H. Geeraerd, G. Alvarez and D. Thuault, "Safety and quality assessment of ready-to-eat pork products in cold chain," *J. Food Eng.* vol. 148, pp. 43-52, March 2015.
- [5] E. Orò, A. de Gracia and L.F. Cabeza, "Active phase change materials package for thermal protection of ice cream containers," *Int. J. Refrig.* vol. 36, pp. 102-109, January 2013.
- [6] S.J. James and C. James, "The food cold-chain and climate change," *Food Res. Int. Soc.* vol. 43, pp. 1944-1956, August 2010.
- [7] S.J. James, C. James and J.A. Evans, "Modeling of food transportationsystem – a review," *Int. J. Refrig.* vol. 29, pp. 947-957, September 2006.
- [8] K. Azzouz, D. Leducqa, D. Gobinb, Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage, *international journal of refrigeration* 31 (2008) 892-901.
- [9] Azzouz, D. Leducq, D. Gobin, Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: An experimental investigation, *international journal of refrigeration* 32 (2009) 1634 – 1644.
- [10] Wen-Long Chenga, Bao-Jun Meia, Yi-Ning Liub, Yong-Hua Huang, Xu-Dong Yuana, A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condensers: An experimental investigation, *Energy* 36 (2011) 5797e58047
- [11] B. Gin, M.M. Farid, P.K. Bansal, Effect of door opening and defrost cycle on a freezer with phase change panels, *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 2698–2706.
- [12] B. Gin, M. M. Farid, The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food, *Journal of Food Engineering* 100 (2010) 372–376.
- [13] E. Oro', L. Miro', M.M. Farid, L.F. Cabeza, Improving thermal performance of freezers using phase change materials, *international journal of refrigeration* 35 (2012) 984 e 991.
- [14] E. Oro', L. Miro', M. M. Farid, L. F. Cabeza, Thermal analysis of a low temperature storage unit using phase change materials without refrigeration system, *international journal of refrigeration* 35 (2012) 1709 e 1714.
- [15] A.P. Simard, M. Lacroix, Study of the thermal behavior of a latent heat cold storage unit operating under frosting conditions, *Energy Conversion and Management* 44 (2003) 1605–1624.
- [16] S.A. Tassou, G. De-Lille, Y.T. Ge, Food transport refrigeration - approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport, *Applied Thermal Engineering* 29(2009) 8-9.

- [17] M. Liu, W. Saman, F. Bruno, Development of a novel refrigeration system for refrigerated trucks incorporating phase change material, *Applied Energy* 92 (2012) 336–342.
- [18] M. Ahmed, O. Meade and M.A. Medina, “Reducing heat transfer across the insulated walls of refrigerated truck trailers by the application of phase change materials,” *Energ. Convers. Manage. Lawrence*, vol. 51, pp. 383-392, March 2010.
- [19] Paolo Principi, Roberto Fioretti (2013) Realizzazione di strutture multistrato contenenti Materiali a Cambiamento di Fase (PCM) per la realizzazione di celle frigorifere - Report RdS/2013/101 – Ricerca di sistema elettrico – ENEA – Ministero dello sviluppo economico.
- [20] Paolo Principi, Roberto Fioretti, Benedetta Copertaro, “SVILUPPO DI STRUTTURE MULTISTRATO CONTENENTI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM) PER LA REALIZZAZIONE DI CELLE FRIGORIFERE PER TRASPORTO SU VAGONI FERROVIARI” - Report rds/PAR2013/075 - Report Ricerca di Sistema Elettrico - Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA.
- [21] B. Copertaro, R. Fioretti, L. Sangelantoni, P. Principi (2015) Numerical study on the thermal performance of a refrigerated container envelope provided by phase change materials (PCMs). Proceeding of 15 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering. 10-13 giugno 2015. Roma. Italy.
- [22] UNI 10351- Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore.
- [23] Dati climatici per la progettazione edile ed impiantistica: appendice 1 alla Guida al controllo energetico della progettazione elaborata dal Sottoprogetto Risparmio di energia nel riscaldamento degli edifici (RERE) del Progetto finalizzato Energetica del CNR : Roma, febbraio 1982.
- [24] J.K. Welch, Heat Load Calculations for Refrigerated Space
- [25] Yunus A. Çengel, heat and mass transfer - Chapter17 - REFRIGERATION AND FREEZING OF FOODS
- [26] ISPRA – “Fattori di emissione di CO₂ nel settore elettrico e analisi della decomposizione delle emissioni” – Rapporto 172 / 2012 - ISBN: 978-88-448-0580-7
- [27] Rubiterm Technologies GmbH. www.rubitherm.de
- [28] Climator Sweden AB. www.climator.com

7 Curriculum scientifico dei componenti del gruppo di lavoro impegnato nell'attività.

7.1 CV - Paolo Principi

Paolo Principi è Professore Ordinario di Fisica Tecnica Ambientale presso l'Università Politecnica delle Marche, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche. Attualmente è titolare dei corsi di:

Progettazione di impianti di climatizzazione per il corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica,

Fisica tecnica ambientale nel il corso di laurea

e Risorse energetiche ed energie alternative per il corso di laurea magistrale in Sostenibilità Ambientale e Protezione Civile, Facoltà di Scienze..

E' stato responsabile di unità locale di ricerca di programmi Nazionali MURST 40% di Rilevante interesse nazionale - Anno 1994 –Titolo: "Controllo fisico-tecnico degli ambienti di lavoro. Innovazione tecnologica", Anno 1995 –. Titolo :“ Problematiche energetiche e condizioni ambientali determinate dall'utilizzo di sistemi integrati componente edilizio-impianto”. Anno 1996 –. Titolo :“ Problematiche energetiche e condizioni ambientali determinate dall'utilizzo di sistemi integrati componente edilizio-impianto”.

E' stato responsabile di unità locale di ricerca di programmi Nazionali PRIN 2006 e PRIN 2008

E' stato membro del Comitato Tecnico Amministrativo del Ministero dei Lavori Pubblici, Provveditorato Regionale alle Opere Pubbliche per la Regione Marche, in qualità di esperto di impianti tecnologici.

E' stato responsabile scientifico del settore energetica del gruppo di ricerca europea, dal titolo: Changeable Thermal Inertia Dry Enclosures C-TIDE, nell'ambito del 5th Framework Programme della Comunità Europea , ricerca CRAFT .

E' stato responsabile del gruppo di ricerca locale nell'ambito Annex 35 "Control Strategies for Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings (HybVent)" dell'IEA (International Energy Agency).

E' stato membro del Consiglio dei docenti del Dottorato di ricerca in "Ingegneria, Architettura ed Economia per la sostenibilità dell'ambiente urbano e rurale" con sede presso l'Università degli Studi di Ancona.

E' stato membro del Consiglio di Amministrazione dell'Università Politecnica delle Marche in qualità di rappresentante dei professori associati.

E' stato membro del Consiglio Direttivo ISES Italia (International Solar Energy Society Italia)

E' stato membro della Commissione Spin-Off del Consiglio di Amministrazione per la redazione del regolamento di Ateneo prima e per la valutazione delle proposte di nuove società di Spin-Off.

E' coordinatore del curriculum di Protezione Civile ed Ambientale della Scuola di Dottorato dell'Università Politecnica delle Marche.

E' componente del gruppo di lavoro per il "supporto alle attività di individuazione di tipologie di moduli-container ad uso tecnico-sanitario, sociale, logistico e dei relativi capitolati" della Presidenza del Consiglio dei Ministri-Dipartimento della Protezione civile.

Autore di più di 120 pubblicazioni scientifiche riportate su riviste internazionali, nazionali, proceedings di congressi nazionali ed internazionali e pubblicazioni monografiche, ha sviluppato la propria attività scientifica e di ricerca nei seguenti campi:

comportamento termoigrometrico dell'edificio, pompe di calore, trasmissione del calore, uso in edilizia di materiali in passaggio di fase (PCM) , efficienza energetica degli edifici, tetti verdi, tecniche per l'utilizzo dell'energia solare, componenti innovativi di Impianti termotecnici, sistemi solari passivi, ventilazione ibrida e naturale, dissalazione con metodi termici, solar pond, ottimizzazione di elementi per l'involucro in edilizia, protocolli di certificazione energetico ambientale, uso di biomasse ai fini della protezione civile *ACCORDO DI PROGRAMMA MSE-ENEA*

68

7.2 CV- Roberto Fioretti

Roberto Fioretti, ingegnere edile architetto con laurea conseguita presso L'Università Politecnica delle Marche con una tesi sull'applicazione dei materiali a passaggio di fase (PCM) negli involucri edilizi. Consegue il dottorato di ricerca in energetica proseguendo il lavoro sui PCM. Collabora dal 2005 con il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) dell'Università Politecnica delle Marche, seguendo le ricerche riguardanti l'efficienza energetica in edilizia, ricerca e sviluppo di prodotti e sistemi innovativi per l'edilizia, green roof, comfort microclimatico, LCA e sistemi di certificazioni della sostenibilità energetica e ambientale. Svolge inoltre l'attività di libero professionista ed è autore di diverse pubblicazioni su riviste scientifiche nazionali ed internazionali.

7.3 CV- Benedetta Copertaro

Benedetta Copertaro, ha conseguito la laurea triennale in Biologia applicata all'ambiente presso l'Università degli Studi di Camerino e la laurea magistrale in Sostenibilità Ambientale e Protezione Civile presso l'Università Politecnica delle Marche, con una tesi relativa all'analisi di Rischio Ecologico di sedimenti contaminati provenienti dall'area portuale di Trapani. Da novembre 2013 sta svolgendo il dottorato di ricerca in Protezione Civile ed Ambientale presso l'UNIVPM sull'innovazione tecnologica di materiali per uso energetico (PCM) al fine di perseguire la sostenibilità ambientale

8 Allegato A – Dati climatici

Milano

Temperatura dell'aria

ORA	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0,2	1	7,1	10,4	13,7	17,1	19,4	19,5	16,8	11,2	6,8	1,6
2	0,1	0,7	6,9	10	13,2	16,7	18,8	19,1	16,5	11	6,6	1,4
3	0	0,6	6,6	9,5	12,7	16,3	18,3	18,7	16,2	10,8	6,4	1,2
4	-0,3	0,5	6,5	9	12,3	15,9	17,8	18,4	15,9	10,7	6,1	1
5	-0,5	0,4	6,2	8,8	12,3	16	17,9	18,2	15,7	10,5	6,1	0,9
6	-0,7	0,2	6	8,7	12,5	16,5	18,2	18,2	15,5	10,4	6,1	0,8
7	-1	0,1	5,7	8,8	12,9	17,1	18,9	18,4	15,3	10,3	6,3	0,7
8	-1	0,4	6,1	9,9	14,1	18,1	20,2	19,2	16	10,7	6,4	0,9
9	-0,9	1	6,7	11,4	15,8	19,3	22	20,6	17,3	11,3	6,6	1,2
10	-0,7	1,8	7,6	13,5	18,1	20,8	24,2	22,3	19	12,2	6,9	1,6
11	-0,1	2,8	8,5	14,6	19,2	21,8	25,6	23,5	20,2	13,2	7,5	2,3
12	0,7	4,1	9,5	15,4	20,1	22,7	26,7	24,5	21,5	14,4	8,3	3,3
13	1,8	5,5	10,6	16	20,6	23,6	27,6	25,5	22,9	15,7	9,3	4,4
14	2,3	6,4	11,3	16,5	21,1	23,9	28,1	26,1	23,5	16,4	9,7	4,9
15	2,7	7,1	11,7	17	21,4	24	28,3	26,6	23,7	16,9	9,8	5,1
16	3	7,6	12	17,3	21,6	23,8	28,3	26,8	23,6	17,2	9,8	5,1
17	2,8	7	11,8	17	21,2	23,5	27,9	26,4	23	16,6	9,4	4,6
18	2,2	5,9	11,2	16,3	20,6	23,1	27,2	25,5	22	15,6	8,7	3,9
19	1,3	4,2	10,3	15,3	19,6	22,5	26,2	24,1	20,6	14	7,8	2,8
20	0,9	3,4	9,6	14,3	18,5	21,4	25	23,1	19,6	13,3	7,4	2,4
21	0,5	2,8	9	13,1	17,2	20,1	23,6	22	18,6	12,7	7,2	2,2
22	0,3	2,4	8,3	11,8	15,8	18,4	22	20,9	17,6	12,3	7,1	2,2
23	0,1	1,9	7,8	11,1	14,9	17,7	21	20,2	17,1	11,8	6,9	2
24	0,1	1,5	7,4	10,7	14,3	17,3	20,2	19,7	16,9	11,5	6,7	1,7

Milano

Umidità Relativa

ORA	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	92	93	93	90	82	90	76	88	96	99	93	93
2	92	93	94	91	84	91	78	89	96	99	93	94
3	91	93	94	92	85	93	80	90	96	99	93	94
4	91	93	94	93	86	94	81	91	97	99	94	95
5	92	93	94	93	87	94	82	91	97	99	94	95
6	92	92	95	93	87	92	81	91	97	99	94	95
7	93	92	95	92	87	90	79	91	97	99	94	95
8	93	91	94	88	82	86	74	87	95	98	93	95
9	93	89	92	82	74	82	66	82	91	97	92	94
10	93	88	89	74	64	76	56	74	87	95	92	94
11	91	85	85	70	60	72	51	70	82	92	89	91
12	89	80	81	66	57	68	47	66	77	88	86	86
13	85	75	75	64	56	64	45	63	72	83	82	79
14	84	72	72	62	54	62	44	60	69	80	81	77
15	83	69	69	61	52	63	43	58	67	78	80	77
16	82	67	67	61	51	64	44	56	67	76	81	78
17	84	69	68	62	53	66	45	58	70	79	82	79
18	86	74	71	66	55	67	47	63	76	85	85	83
19	89	82	76	71	60	70	51	70	84	93	89	87
20	90	85	80	75	64	74	55	74	89	95	91	89
21	92	88	84	81	69	80	59	79	92	97	92	91
22	93	90	88	87	74	87	65	83	96	98	93	92
23	94	91	91	90	78	90	69	86	97	98	93	93
24	93	92	92	91	80	91	73	88	97	99	93	93

Milano

Radiazione – Sud

ORA	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	12	19	11	0	0	0	0	0
6	0	0	0	24	44	51	44	25	1	0	0	0
7	0	14	66	72	79	86	80	75	84	14	0	0
8	42	112	163	170	151	142	163	197	223	164	49	12
9	124	191	251	26	244	239	276	315	353	287	152	121
10	176	249	320	339	319	316	367	410	455	377	217	190
11	207	284	364	387	367	367	426	471	520	433	255	228
12	217	297	379	404	384	384	447	492	542	452	268	240
13	207	284	364	387	367	367	426	471	520	433	255	228
14	176	249	320	339	319	316	367	410	455	377	217	190
15	124	191	251	264	244	239	276	315	353	287	152	121
16	42	112	163	170	151	142	163	197	223	164	49	12
17	0	14	66	72	79	86	80	75	84	14	0	0
18	0	0	0	24	44	51	44	25	1	0	0	0
19	0	0	0	0	12	19	11	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Milano

Radiazione – Ovest

OVEST	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	12	19	11	0	0	0	0	0
6	0	0	0	24	44	51	44	25	1	0	0	0
7	0	8	32	59	79	86	80	62	34	8	0	0
8	15	37	65	93	112	119	114	97	70	40	15	6
9	38	63	93	123	140	147	144	129	102	69	39	29
10	56	83	115	145	162	169	166	153	127	92	58	47
11	68	96	129	159	176	183	181	168	143	107	70	59
12	72	100	134	164	181	188	186	173	148	112	74	63
13	106	156	218	268	291	306	329	314	285	210	121	103
14	126	194	282	350	380	403	447	428	395	283	150	125
15	119	206	316	400	437	467	526	500	457	312	145	110
16	54	172	305	406	453	487	551	513	446	261	64	13
17	0	26	211	348	412	451	505	438	301	28	0	0
18	0	0	0	173	293	339	356	211	0	0	0	0
19	0	0	0	0	51	115	58	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Milano

Radiazione – Nord

	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	30	67	33	0	0	0	0	0
6	0	0	46	0	108	138	125	53	1	0	0	0
7	0	8	59	32	104	130	112	62	34	8	0	0
8	15	37	93	65	112	119	114	97	70	40	15	6
9	38	63	123	93	140	147	144	129	102	69	39	29
10	56	83	145	115	162	169	166	153	127	92	58	47
11	68	96	159	129	176	183	181	168	143	107	70	59
12	72	100	164	134	181	188	186	173	148	112	74	63
13	68	96	159	129	176	183	181	168	143	107	70	59
14	56	83	145	115	162	19	166	153	127	92	58	47
15	38	63	123	93	140	147	144	129	102	69	39	29
16	15	37	93	65	112	119	114	97	70	40	15	6
17	0	8	59	32	104	130	112	62	34	8	0	0
18	0	0	46	0	108	138	125	53	1	0	0	0
19	0	0	0	0	30	67	33	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Milano

Radiazione - Est

	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	51	115	58	0	0	0	0	0
6	0	0	0	173	293	339	356	211	0	0	0	0
7	0	26	211	348	412	451	505	438	301	28	0	0
8	54	172	305	406	453	487	551	513	446	261	64	13
9	119	206	316	400	437	467	526	500	457	312	145	110
10	126	194	282	350	380	403	447	428	395	283	150	125
11	106	156	218	268	291	306	329	314	285	210	121	103
12	72	100	134	164	181	188	186	173	148	112	74	63
13	68	96	129	159	176	183	181	168	143	107	70	59
14	56	83	115	145	162	169	166	153	127	92	58	47
15	38	63	93	123	140	147	144	129	102	69	39	29
16	15	37	65	93	112	119	114	97	70	40	15	6
17	0	8	32	59	79	86	80	62	34	8	0	0
18	0	0	0	24	44	51	44	25	1	0	0	0
19	0	0	0	0	12	19	11	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Milano

Radiazione Orizzontale

	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	22	41	22	0	0	0	0	0
6	0	0	1	58	127	159	141	65	1	0	0	0
7	0	14	82	180	259	297	296	211	99	14	0	0
8	28	90	189	305	387	431	448	363	246	113	29	11
9	87	167	286	415	499	548	581	498	380	220	95	67
10	135	227	362	499	586	638	685	603	485	305	151	118
11	166	265	409	553	640	695	750	669	551	359	187	151
12	176	278	425	571	659	714	772	692	574	378	199	163
13	166	265	409	553	640	695	750	669	551	359	187	151
14	135	227	362	499	586	638	685	603	485	305	151	118
15	87	167	286	415	499	548	581	498	380	220	95	67
16	28	90	189	305	387	431	448	363	246	113	29	11
17	0	14	82	180	259	297	296	211	99	14	0	0
18	0	0	1	58	127	159	141	65	1	0	0	0
19	0	0	0	0	22	41	22	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Roma

Temperatura dell'aria

ORA	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	5,6	6	8,1	10	13,4	17,5	20,3	20,8	18	13,4	10,9	7,5
2	5,4	5,7	7,8	9,6	13,1	17,1	19,7	20,3	17,6	12,8	10,6	7,4
3	5,2	5,4	7,4	9,3	12,8	16,8	19,2	19,8	17,2	12,3	10,1	7,3
4	5,1	5,2	7	9,1	12,6	16,4	18,8	19,3	16,8	11,8	9,6	7,2
5	5,1	5	6,8	9	12,9	16,8	19,1	19,2	16,5	11,5	9,4	7
6	5,3	4,9	6,6	9	13,4	17,5	19,7	19,3	16,4	11,3	9,3	6,9
7	5,5	4,9	6,6	9,2	14,3	18,6	20,6	19,6	16,3	11,1	9,3	6,6
8	5,9	5,5	7,5	10,5	15,7	19,9	22,2	21	17,8	12,2	9,9	6,8
9	6,5	6,6	9	12,6	17,7	21,4	24,1	23,2	20,1	14,1	11	7,2
10	7,2	8	11,1	15,3	20,1	23,2	26,5	26	23,2	16,6	12,5	7,8
11	8,2	9,2	12,3	16,4	21,2	24,2	27,9	27,4	24,8	18,4	13,7	8,6
12	9,6	10,5	13,4	17,2	21,8	25	28,9	28,5	26,1	20,2	15	9,6
13	11,1	11,8	14,4	17,6	22	25,5	29,7	29,2	27	21,9	16,4	10,8
14	11,6	12,3	14,7	17,7	22,1	25,6	29,9	29,4	27,3	22,4	16,8	11,2
15	11,8	12,4	14,6	17,6	21,9	25,4	29,7	29,3	27	22,2	16,8	11,3
16	11,5	12,2	14,1	17,1	21,5	24,8	29,1	28,7	26,2	21,4	16,3	11,1
17	10,8	11,5	13,4	16,4	20,8	24,2	28,4	28	25,2	20,4	15,5	10,6
18	9,6	10,4	12,3	15,4	19,8	23,6	27,4	26,9	23,8	18,8	14,3	9,8
19	8	8,9	10,9	14,2	18,6	22,7	26,2	25,6	22,1	16,9	12,7	8,7
20	7,4	8,2	10,1	13,3	17,5	21,7	25	24,6	21,1	16	12	8,3
21	7	7,6	9,6	12,5	16,3	20,5	23,7	23,5	20,2	15,3	11,6	7,9
22	6,9	7,2	9,2	11,8	15	19,1	22,2	22,5	19,6	15	11,5	7,7
23	6,6	6,9	8,8	11,1	14,2	18,3	21,4	21,7	19	14,4	11,3	7,5
24	6,3	6,5	8,5	10,6	13,7	17,9	20,7	21,2	18,5	13,7	11,1	7,3

Roma

Umidità Relativa

ORA	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	88	87	77	82	86	89	78	82	85	88	87	84
2	89	88	79	84	87	90	80	83	86	90	88	84
3	89	89	81	86	87	91	82	85	87	91	89	84
4	90	90	83	88	88	92	84	87	88	92	90	84
5	90	91	83	88	88	91	83	87	89	93	91	85
6	89	90	83	89	88	89	81	86	89	92	91	86
7	89	89	81	89	87	86	78	85	90	91	91	87
8	88	88	78	84	81	79	71	80	85	88	89	87
9	86	85	74	77	72	71	62	72	76	83	86	85
10	84	82	69	66	59	61	51	61	64	77	82	83
11	80	76	64	62	55	57	46	56	58	71	77	81
12	74	68	59	58	54	55	43	53	53	64	73	78
13	68	59	54	56	56	54	42	51	48	57	67	74
14	65	56	53	55	56	54	41	49	48	56	66	73
15	64	57	54	56	56	55	42	49	49	57	66	72
16	64	59	57	58	56	58	44	51	53	60	67	72
17	66	63	61	62	59	61	47	54	59	65	71	74
18	72	68	66	67	64	64	51	59	66	71	77	77
19	80	75	72	74	70	68	56	65	75	80	84	81
20	82	79	74	76	75	74	61	70	79	83	86	82
21	84	81	76	78	80	80	67	75	81	85	87	83
22	84	83	76	79	85	88	73	81	82	85	86	83
23	85	85	77	80	87	90	76	83	83	86	86	84
24	86	86	77	82	88	90	78	83	85	87	87	84

Roma

Radiazione - Sud

ORA	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	7	12	6	0	0	0	0	0
6	0	0	0	23	41	46	37	21	1	0	0	0
7	0	29	75	68	79	83	73	65	93	33	0	0
8	117	158	186	175	145	125	144	202	250	226	127	65
9	260	257	287	277	252	235	269	337	395	378	292	241
10	351	330	365	359	339	324	370	446	508	489	398	344
11	405	375	415	411	395	382	436	516	581	558	459	402
12	423	390	432	429	414	401	458	540	605	581	480	421
13	405	375	415	411	395	382	436	516	581	558	459	402
14	351	330	365	359	339	324	370	446	508	489	398	344
15	260	257	287	277	252	235	269	337	395	378	292	241
16	117	158	186	175	145	125	144	202	250	226	127	65
17	0	29	75	68	79	83	73	65	93	33	0	0
18	0	0	0	23	41	46	37	21	1	0	0	0
19	0	0	0	0	7	12	6	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Roma

Radiazione - Ovest

	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	7	12	6	0	0	0	0	0
6	0	0	0	23	41	46	37	21	1	0	0	0
7	0	12	35	61	79	83	73	58	35	11	0	0
8	23	45	72	99	115	118	108	95	73	48	23	13
9	52	75	104	131	146	149	139	128	108	82	53	41
10	75	98	129	156	171	172	162	153	134	108	77	64
11	89	113	144	172	186	187	177	168	151	125	93	78
12	94	118	150	177	191	192	182	174	156	131	98	83
13	179	200	254	298	332	343	359	354	325	268	197	165
14	239	261	335	395	448	468	506	503	461	375	267	220
15	252	287	380	455	525	552	607	601	543	426	283	220
16	159	253	371	464	548	581	642	624	539	376	174	82
17	0	66	263	396	499	538	588	534	373	79	0	0
18	0	0	0	180	339	390	396	235	0	0	0	0
19	0	0	0	0	19	79	19	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Roma

Radiazione - Nord

NORD	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	13	47	12	0	0	0	0	0
6	0	0	47	0	122	156	136	55	1	0	0	0
7	0	12	61	35	123	153	128	58	35	11	0	0
8	23	45	99	72	115	118	108	95	73	48	23	13
9	52	75	131	104	146	149	139	128	108	82	53	41
10	75	98	156	129	171	172	162	153	134	108	77	64
11	89	113	172	144	186	187	177	168	151	125	93	78
12	94	118	177	150	191	192	182	174	156	131	98	83
13	89	113	172	144	186	187	177	168	151	125	93	78
14	75	98	156	129	171	172	162	153	134	108	77	64
15	52	75	131	104	146	149	139	128	108	82	53	41
16	23	45	99	72	115	118	108	95	73	48	23	13
17	0	12	61	35	123	153	128	58	35	11	0	0
18	0	0	47	0	122	156	136	55	1	0	0	0
19	0	0	0	0	13	47	12	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Roma

Radiazione - Est

EST	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	19	79	19	0	0	0	0	0
6	0	0	0	180	339	390	396	235	0	0	0	0
7	0	66	263	396	499	538	588	534	373	79	0	0
8	159	253	371	464	548	581	642	624	539	376	174	82
9	252	287	380	455	525	552	607	601	543	426	283	220
10	239	261	335	395	448	468	506	503	461	375	267	220
11	179	200	254	298	332	343	359	354	325	268	197	165
12	94	118	150	177	191	192	182	174	156	131	98	83
13	89	113	144	172	186	187	177	168	151	125	93	78
14	75	98	129	156	171	172	162	153	134	108	77	64
15	52	75	104	131	146	149	139	128	108	82	53	41
16	23	45	72	99	115	118	108	95	73	48	23	13
17	0	12	35	61	79	83	73	58	35	11	0	0
18	0	0	0	23	41	46	37	21	1	0	0	0
19	0	0	0	0	7	12	6	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Roma

Radiazione - Est

EST	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	19	79	19	0	0	0	0	0
6	0	0	0	180	339	390	396	235	0	0	0	0
7	0	66	263	396	499	538	588	534	373	79	0	0
8	159	253	371	464	548	581	642	624	539	376	174	82
9	252	287	380	455	525	552	607	601	543	426	283	220
10	239	261	335	395	448	468	506	503	461	375	267	220
11	179	200	254	298	332	343	359	354	325	268	197	165
12	94	118	150	177	191	192	182	174	156	131	98	83
13	89	113	144	172	186	187	177	168	151	125	93	78
14	75	98	129	156	171	172	162	153	134	108	77	64
15	52	75	104	131	146	149	139	128	108	82	53	41
16	23	45	72	99	115	118	108	95	73	48	23	13
17	0	12	35	61	79	83	73	58	35	11	0	0
18	0	0	0	23	41	46	37	21	1	0	0	0
19	0	0	0	0	7	12	6	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Roma

Radiazione - Orizzontale

ORIZ	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	12	26	11	0	0	0	0	0
6	0	0	1	56	129	159	135	60	1	0	0	0
7	0	23	97	197	290	327	317	234	115	23	0	0
8	56	125	228	343	449	491	498	420	291	159	58	28
9	155	226	346	472	588	635	658	586	452	300	167	119
10	237	306	437	571	689	746	782	714	578	413	258	200
11	289	356	495	634	764	816	860	796	657	484	317	252
12	307	373	514	656	787	840	886	823	684	508	337	269
13	289	356	495	634	764	816	860	796	657	484	317	252
14	237	306	437	571	696	746	782	714	578	413	258	200
15	155	226	346	472	588	635	658	586	452	300	167	119
16	56	125	228	343	449	491	498	420	291	159	58	28
17	0	23	97	197	290	327	317	234	115	23	0	0
18	0	0	1	56	129	159	135	60	1	0	0	0
19	0	0	0	0	12	26	11	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Messina

Temperatura dell'aria.

T	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	10	11,7	11,4	13	17	20,1	23,5	24,3	22,4	17,7	15,1	12,8
2	9,9	11,6	11,4	12,9	16,9	19,9	23,3	24,2	22,3	17,6	15	12,8
3	9,9	11,4	11,5	12,7	16,7	19,6	23,2	24	22,2	17,4	14,8	12,8
4	9,9	11,2	11,6	12,7	16,5	19,3	23,1	24	21,1	17,4	14,7	13
5	9,9	11,2	11,6	12,7	16,6	19,4	23,1	23,9	22	17,2	14,6	12,9
6	9,9	11,1	11,5	12,8	16,9	19,7	23,4	23,8	21,9	17,1	14,7	12,9
7	10	11	11,5	13	17,3	20,3	23,7	23,8	21,9	16,9	14,7	12,7
8	10,3	11,3	11,9	13,6	18	21	24,3	24,7	22,5	17,6	15,3	12,9
9	10,8	11,9	12,5	14,3	19	21,8	25,2	25,9	23,4	18,9	16,1	13,1
10	11,4	12,6	13,4	15,3	20,3	22,9	26,3	27,7	24,6	20,5	17,1	13,5
11	11,8	12,9	13,8	15,9	20,8	23,5	27	28,3	25,1	21	17,7	13,8
12	12,2	13,2	14	16,3	21,1	24,1	27,6	28,7	25,5	21,2	18,2	14,1
13	12,5	13,5	14,1	16,5	21,2	24,5	28,1	28,7	25,8	21	18,5	14,8
14	12,6	13,6	14,1	16,6	21,1	24,6	28,2	28,7	25,6	20,9	18,6	14,5
15	12,5	13,6	14,2	16,4	20,8	24,5	28	28,4	25,1	20,7	18,5	14,4
16	12,2	13,5	14,1	16,1	20,4	24,1	27,5	28	24,3	20,3	18,2	14,2
17	11,9	13,2	13,8	15,7	20	23,6	27	27,6	24	20	17,7	14
18	11,5	12,8	13,3	15,2	19,6	22,9	26,4	27	23,7	19,5	17	13,7
19	11,1	12,3	12,7	14,7	19,1	22	25,6	26,4	23,6	19	16	13,3
20	10,9	12,1	12,4	14,4	18,7	21,5	25,1	25,9	23,3	18,7	15,7	13,2
21	10,7	12	12,1	14,2	18,3	21,1	24,6	25,5	22,8	18,5	15,4	13,1
22	10,5	12	11,9	14,1	18	20,8	24,1	25,1	22,3	18,3	15,4	13,1
23	10,4	11,9	11,8	13,8	17,8	20,6	23,8	24,8	22,2	18,1	15,3	13
24	10,3	11,7	11,6	13,6	17,5	20,3	23,5	24,5	22,1	17,9	15,2	12,9

Messina

Umidità Relativa

UR	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	70	66	71	72	78	81	74	64	72	71	75	75
2	70	66	71	73	78	81	74	64	72	72	75	75
3	70	66	69	73	78	81	75	65	73	73	75	76
4	70	66	68	73	78	80	75	66	73	73	74	76
5	69	67	68	73	79	79	75	66	73	74	73	76
6	69	69	68	73	80	78	75	67	73	74	72	76
7	69	71	70	73	81	77	75	67	72	75	71	76
8	67	69	68	71	78	75	71	64	69	71	69	74
9	66	66	66	68	73	72	67	59	65	66	67	72
10	63	61	63	63	66	68	61	52	59	59	63	69
11	61	59	61	60	63	65	57	50	56	56	61	68
12	59	58	59	57	61	63	54	49	54	55	59	67
13	56	58	58	55	59	60	50	49	53	55	57	66
14	56	58	56	56	60	60	50	50	54	55	58	66
15	57	57	56	58	63	61	52	51	57	57	59	67
16	59	57	55	62	67	63	55	53	61	59	62	68
17	61	58	57	65	69	66	58	55	63	60	64	68
18	63	61	61	67	72	70	62	58	65	62	67	69
19	66	65	65	69	74	75	67	61	67	64	69	70
20	67	67	67	70	75	77	69	62	69	65	71	71
21	68	67	68	71	75	78	70	63	70	67	73	72
22	68	67	68	71	75	78	70	62	71	68	75	74
23	69	67	68	72	76	79	71	63	72	69	75	75
24	70	67	69	72	77	81	73	64	72	70	75	76

Messina

Radiazione – sud

SUD	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	3	8	2	0	0	0	0	0
6	0	0	0	21	37	41	31	18	1	0	0	0
7	0	46	79	62	77	80	67	55	96	53	0	0
8	150	190	192	168	126	116	116	186	255	251	193	117
9	283	299	295	271	230	208	240	319	401	403	373	280
10	370	380	375	353	314	296	341	427	516	515	490	377
11	422	430	425	406	369	352	407	497	589	584	559	434
12	440	447	442	424	387	372	430	521	614	608	583	453
13	422	430	425	406	369	352	407	497	589	584	559	434
14	370	380	375	353	314	296	341	427	516	515	490	377
15	283	299	295	271	230	208	240	319	401	403	373	280
16	150	190	192	168	126	116	116	186	255	251	193	117
17	0	46	79	62	77	80	67	55	96	53	0	0
18	0	0	0	21	37	41	31	18	1	0	0	0
19	0	0	0	0	3	8	2	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Messina

Radiazione – ovest

OVEST	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	3	8	2	0	0	0	0	0
6	0	0	0	21	37	41	31	18	1	0	0	0
7	0	15	38	62	77	80	67	55	35	14	0	0
8	30	53	77	101	115	116	103	94	75	54	31	21
9	61	86	112	136	148	148	134	127	110	90	65	51
10	86	112	138	162	174	173	158	153	138	118	92	76
11	101	128	155	179	190	188	173	169	155	136	109	91
12	107	134	161	185	195	194	178	175	161	142	115	96
13	196	234	272	313	339	352	370	366	344	292	242	186
14	261	310	360	417	458	483	531	525	494	410	336	248
15	280	346	410	481	536	572	642	630	586	470	369	259
16	206	316	403	490	558	601	681	655	587	429	270	149
17	0	115	290	415	502	551	619	558	415	135	0	0
18	0	0	0	170	322	381	393	219	0	0	0	0
19	0	0	0	0	3	29	3	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Messina

Radiazione – nord

NORD	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	3	19	3	0	0	0	0	0
6	0	0	45	0	119	156	136	51	1	0	0	0
7	0	15	62	38	133	166	142	59	35	14	0	0
8	30	53	101	77	115	132	103	94	75	54	31	21
9	61	86	136	112	148	148	134	127	110	90	65	51
10	86	112	162	138	174	173	158	153	138	118	92	76
11	101	128	179	155	190	188	173	169	155	136	109	91
12	107	134	185	161	195	194	178	175	161	142	115	96
13	101	128	179	155	190	188	173	169	155	136	109	91
14	86	112	162	138	174	173	158	153	138	118	92	76
15	61	86	136	112	148	148	134	127	110	90	65	51
16	30	53	101	77	115	132	103	94	75	54	31	21
17	0	15	62	38	133	166	142	59	35	14	0	0
18	0	0	45	0	119	156	136	51	1	0	0	0
19	0	0	0	0	3	19	3	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Messina

Radiazione – est

EST	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	3	29	3	0	0	0	0	0
6	0	0	0	170	322	381	393	219	0	0	0	0
7	0	115	290	415	502	551	619	558	415	135	0	0
8	206	316	403	490	558	601	681	655	587	429	270	149
9	280	346	410	481	536	572	642	630	586	470	369	259
10	261	310	360	417	458	483	531	525	494	410	336	248
11	196	234	272	313	339	352	370	366	344	292	242	186
12	107	134	161	185	195	194	178	175	161	142	115	96
13	101	128	155	179	190	188	173	169	155	136	109	91
14	86	112	138	162	174	173	158	153	138	118	92	76
15	61	86	112	136	148	148	134	127	110	90	65	51
16	30	53	77	101	115	116	103	94	75	54	31	21
17	0	15	38	62	77	80	67	55	35	14	0	0
18	0	0	0	21	37	41	31	18	1	0	0	0
19	0	0	0	0	3	8	2	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Messina

Radiazione – orizzontale

ORIZ	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	5	14	4	0	0	0	0	0
6	0	0	1	51	115	144	120	52	1	0	0	0
7	0	33	108	203	286	324	318	238	126	33	0	0
8	79	159	252	363	456	502	517	440	321	190	91	50
9	189	279	382	504	604	657	693	619	498	348	229	157
10	277	374	483	613	719	778	829	759	636	472	341	245
11	334	433	546	681	792	854	915	847	724	551	413	302
12	353	454	568	705	817	880	944	878	754	578	437	322
13	334	433	546	681	792	854	915	847	724	551	413	302
14	277	374	483	613	719	778	829	759	636	472	341	245
15	189	279	382	504	604	657	693	619	498	348	229	157
16	79	159	252	363	456	502	517	440	321	190	91	50
17	0	33	108	203	286	144	318	238	126	33	0	0
18	0	0	1	51	115	144	120	52	1	0	0	0
19	0	0	0	0	5	14	4	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

9 Allegato B – Tabella contenuto d’acqua e calore emesso per evaporazione dei materiali

VEGETALI	CONTENUTO ACQUA [%]	RESPIRAZIONE (mW/kg)				
		0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C
CARCIOFI	84,94	100,4	136,3	153,85	226,55	366,2
ASPARAGI	92,4	159,3	283,25	611,05	721,85	1146,7
FAGIOLI	90,27	60,1	82,45	167,3	333,15	462,65
BARBABIETOLE	87,58	18,65	27,65	37,6	59,45	
BROCCOLI	90,69	59	288		761,6	917,55
CAVOLETTI DI BRUSSELS	86	58,45	119,75	218,95	299,5	415,5
CAVOLO	92,15	19	31,5	44,85	69,1	113,95
CAROTE	87,79	45,6	58,2	93,1	117,4	209
CAVOLFIORE	91,91	52,9	60,6	100,4	136,8	238,1
SEDANO	94,64	21,3	32,5	54,5	110,6	191,6
BIETOLE	90,55	18,65	27,65	37,6	59,45	
GRANO	75,96	126,1	230,4	332,2	483	855
CETRIOLI	96,01			76,5	84,5	117
AGLIO	58,58	20,5	22,5	27,8	56,75	41,4
RAFANO	78,66	16,75	23,5	70,8	89,5	143
LATTUGA	95,89	31	39,3	64,5	106,7	168,8
FUNGHI	91,81	106,25	210,5			860,45
PEPERONCINI VERDI	89,58			42,7	67,9	130
CIPOLLA	89,68	8,7	10,2	21,3	33	50
PREZZEMOLO	87,71	117,25	223,5	437	544	668,5
PISELLI	78,86	126,5	194,5		565	900
PATATE	78,96		34,9	51,5	66	93
RABARBARO	93,61	31,5	42,5		112,5	143
SPINACI	91,58	48,5	136,3	328,3	530,5	682,3
POMODORI	93				60,6	102,8

FRUTTA	CONTENUTO ACQUA [%]	RESPIRAZIONE (mW/kg)				
		0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C
MELE	83,93	20,4	35,9	50,2	106,2	166,8
ALBICOCCHIE	86,35	16,5	22,5	44	82	121,1
AVOCADO	74,27				324,3	623,55
BANANA	74,26				94,5	121,1
MIRTILLI	84,61	18,9	31,5		142	206,35
MORE	85,64	56,5	109,9	218	319,5	484,5
MELONE	89,78		27	46,1	106,5	161,8
CILIEGIE	86,13	28	38		114,5	131,5
FICHI	79,11		31	66	166	224,5
UVA	90,89	8,2	16	22,8	47	97
LIMONE	87,4				47	67,4
LIME	88,26			13	26	37,5
MANGO	81,71				133,4	335,5
PESCHE	86,28	11,2	19,4	46,6	101,8	181,9
OLIVE	79,99				89,5	129,75
ARANCIO	82,3	9,2	18,9	36,4	62,1	89,2
PERA	83,81	15	21,5	39	111	146,5
CACHI	64,4		17,5		37	65
ANANAS	86,5			16,5	38,3	71,8
PRUGNE	85,2	7	18,5	29,5	35	65
LAMPONI	86,57	63	102,5	123	271,5	173,35
FRAGOLE	91,57	44	73	213	241	442

CARNE	CONTENUTO ACQUA [%]
MANZO	65,15
MAIALE	44,45
SALSICCE	48,32
POLLO	65,99
ANATRA	48,5
TACCHINO	70,4
AGNELLO	74,11

PESCE	CONTENUTO ACQUA [%]
MERLUZZO	81,22
ARINGA	59,7
SGOMBRO	63,55
PERSICO	78,7
MERLUZZO GIALLO	78,18
SALMONE	76,35
TONNO	68,09
MERLANO	80,27
VONGOLE	81,82
ARAGOSTA	76,76
OSTRICHE	85,16
CAPELANTE	78,57
GAMBERETTO	75,86

LATTICINI	CONTENUTO ACQUA [%]
BURRO	17,94
MOZZARELLA	54,14
PARMIGIANO	29,16
EMMENTALER	37,21
ROQUEFORT	39,38
CHEDDAR	36,75

10 Allegato C – Schede tecniche dei PCM

Data sheet



RT0



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

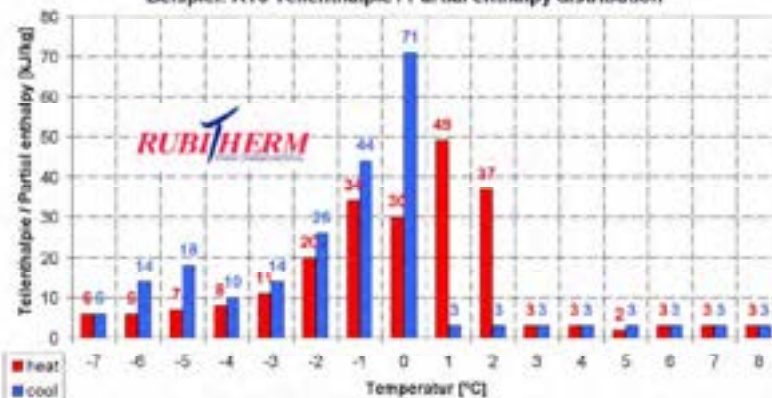
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area	-1 bis 2	[°C]
	main peak: 1	
Congeeing area	-1 bis 0	[°C]
	main peak: 0	
Heat storage capacity ± 7,5%	225	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of -7 °C to 8 °C.	63	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid at -15°C	0,88	[kg/l]
Density liquid at 15 °C	0,77	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point (PCM)	110	[°C]
Max. operation temperature	40	[°C]



Beispiel: RT0 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 02.07.2013

Data sheet



RT2HC



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area

Typical Values

1-3 [°C]

main peak: 2

Congeeing area

2-1 [°C]

main peak: 2

Heat storage capacity $\pm 7,5\%$

205 [kJ/kg]*

Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of -5 °C to 10 °C.

57 [Wh/kg]*

Specific heat capacity

2 [kJ/kg·K]

Density solid

0,88 [kg/l]

at -15 °C

Density liquid

0,77 [kg/l]

at 15 °C

Heat conductivity (both phases)

0,2 [W/(m·K)]

Volume expansion

12,5 [%]

Flash point (PCM)

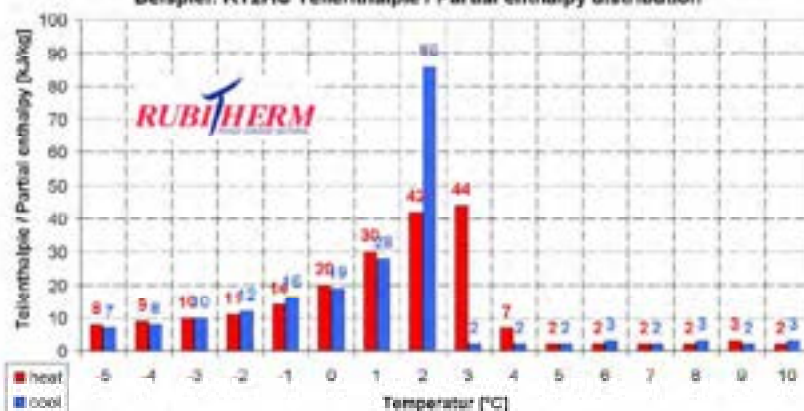
>100 [°C]

Max. operation temperature

40 [°C]



Beispiel: RT2HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 02.07.2013

Data sheet



RT3HC_1



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area

Typical Values

1-3 [°C]

main peak: 3

Congeeing area

3-1 [°C]

main peak: 3

Heat storage capacity ± 7,5%

200 [kJ/kg]*

Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of -5 °C to 9 °C.

55 [Wh/kg]*

Specific heat capacity

2 [kJ/kg·K]

Density solid

0,88 [kg/l]

at -15°C

Density liquid

0,77 [kg/l]

at 15 °C

Heat conductivity (both phases)

0,2 [W/(m·K)]

Volume expansion

12,5 [%]

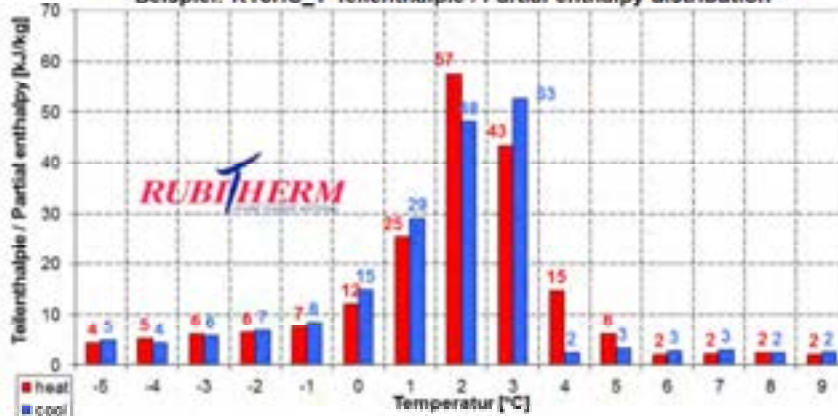
Flash point (PCM)

>110 [°C]

Max. operation temperature

40 [°C]

Beispiel: RT3HC_1 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 20.03.2014

*Measured with 3-layer-calorimeter.

Data sheet



RT4



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

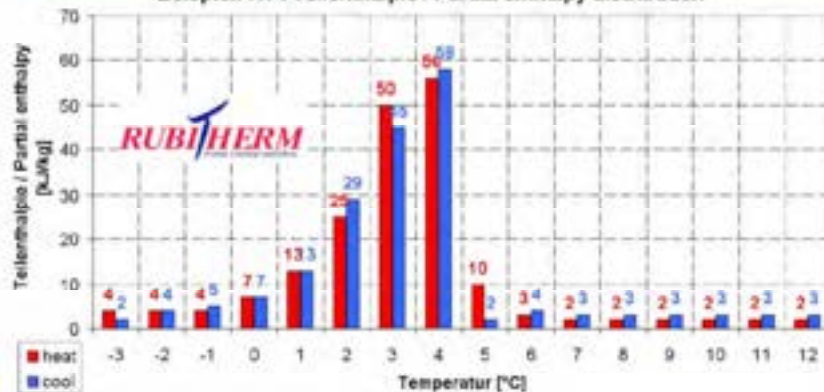
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area	2-4	[°C]
	main peak: 4	
Congeeing area	4-2	[°C]
	main peak: 4	
Heat storage capacity ± 7,5%	182	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of -5 °C to 10°C.	51	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid at -15°C	0,88	[kg/l]
Density liquid at 15 °C	0,77	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point (PCM)	110	[°C]
Max. operation temperature	30	[°C]



Beispiel: RT4 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 13.08.2013

*Measured with 3-layer-calorimeter.

Data sheet



RT5



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

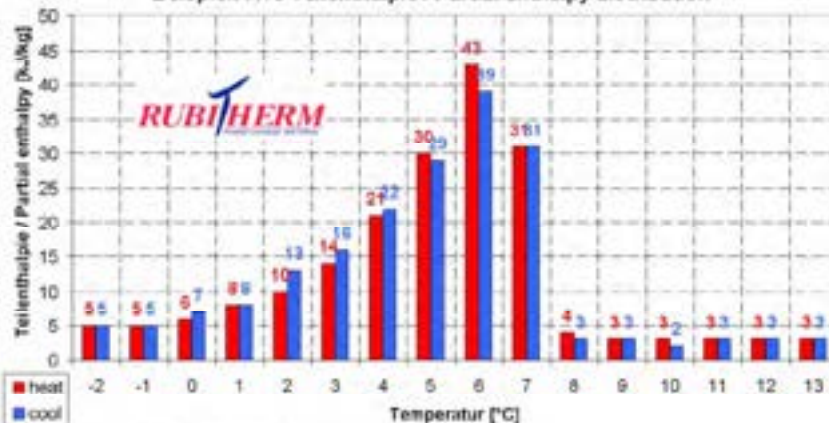
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area	1-6	[°C]
	main peak: 5	
Congeeing area	6-1	[°C]
	main peak: 5	
Heat storage capacity ± 7,5%	180	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of -2 °C to 13°C.	50	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid at -15°C	0,88	[kg/l]
Density liquid at 15 °C	0,77	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point (PCM)	113	[°C]
Max. operation temperature	30	[°C]



Beispiel: RT5 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 13.11.2013

Data sheet



RT5HC



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

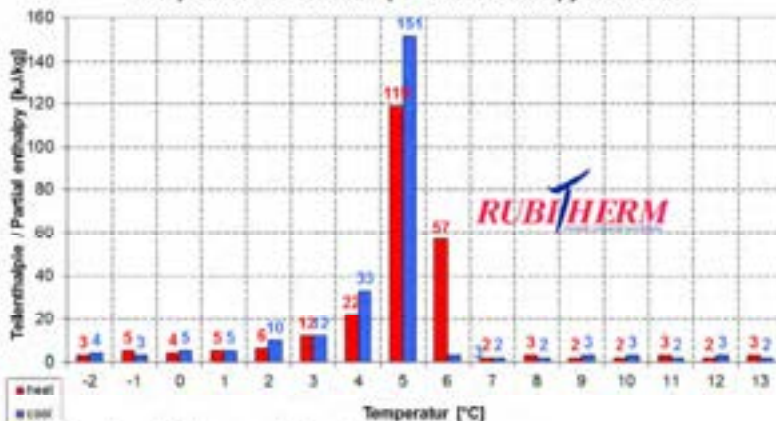
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area	5-6	[°C]
	main peak: 5	
Congealing area	6-5	[°C]
	main peak: 5	
Heat storage capacity ± 7,5%	240	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of -2 °C to 13°C.	67	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid at -15°C	0,88	[kg/l]
Density liquid at 20 °C	0,76	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	13	[%]
Flash point (PCM)	115	[°C]
Max. operation temperature	30	[°C]



Beispiel: RT5HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 02.07.2013

Data sheet



RT6



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

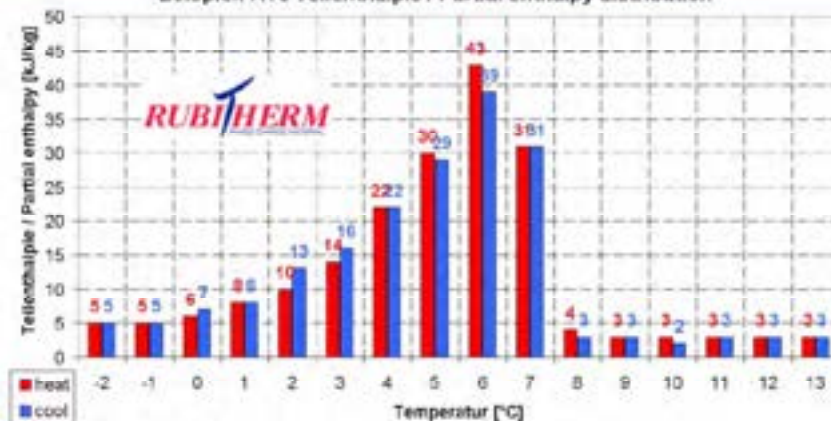
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area	4-7	[°C]
	main peak: 6	
Congeeing area	6-2	[°C]
	main peak: 6	
Heat storage capacity ± 7,5%	175	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of -2 °C to 13°C.	49	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid	0,88	[kg/l]
at -15°C		
Density liquid	0,77	[kg/l]
at 15 °C		
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point (PCM)	113	[°C]
Max. operation temperature	30	[°C]



Beispiel: RT6 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 14.08.2013

Data sheet



RT8



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

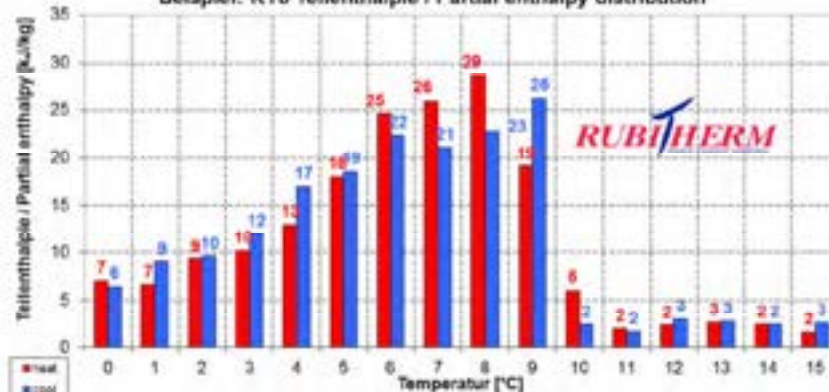
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area	6-9	[°C]
	main peak: 7	
Congeeing area	9-6	[°C]
	main peak: 8	
Heat storage capacity ± 7,5%	180	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat	50	[Wh/kg]*
in a temperatur range of 0 °C to 15°C.		
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid	0,88	[kg/l]
at -15°C		
Density liquid	0,77	[kg/l]
at 15 °C		
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	14	[%]
Flash point (PCM)	116	[°C]
Max. operation temperature	40	[°C]



Beispiel: RT8 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 14.08.2013

*Measured with 3-layer-calorimeter.

Data sheet



RT9



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

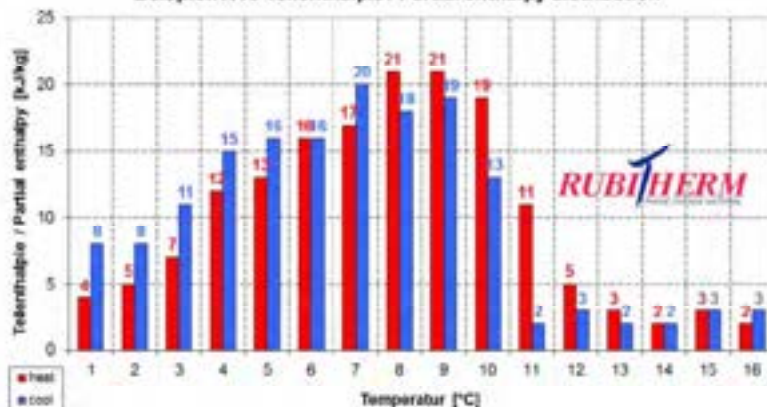
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area	8-11	[°C]
	main peak: 9	
Congeeing area	11-8	[°C]
	main peak: 9	
Heat storage capacity ± 7,5%	160	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 2 °C to 17°C.	44	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid at -15°C	0,88	[kg/l]
Density liquid at 15 °C	0,76	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	14	[%]
Flash point (PCM)	120	[°C]
Max. operation temperature	40	[°C]



Beispiel: RT9 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 14.08.2015

Data sheet



RT10



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

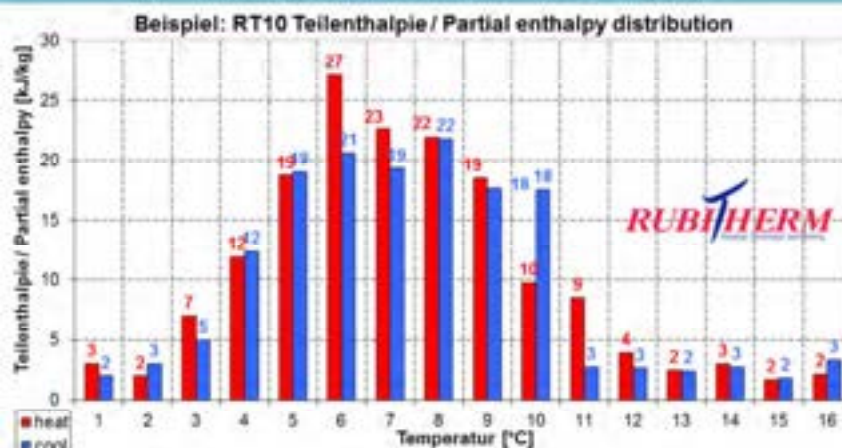
We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area	4-10	[°C]
	main peak: 10	
Congeeing area	10-4	[°C]
	main peak: 10	
Heat storage capacity ± 7,5%	150	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat		
In a temperatur range of 2 °C to 17°C.	42	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid	0,88	[kg/l]
at -15°C		
Density liquid	0,77	[kg/l]
at 15 °C		
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point (PCM)	123	[°C]
Max. operation temperature	45	[°C]



Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 13.11.2013

*Measured with 3-layer-calorimeter.

Data sheet



RT10HC



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

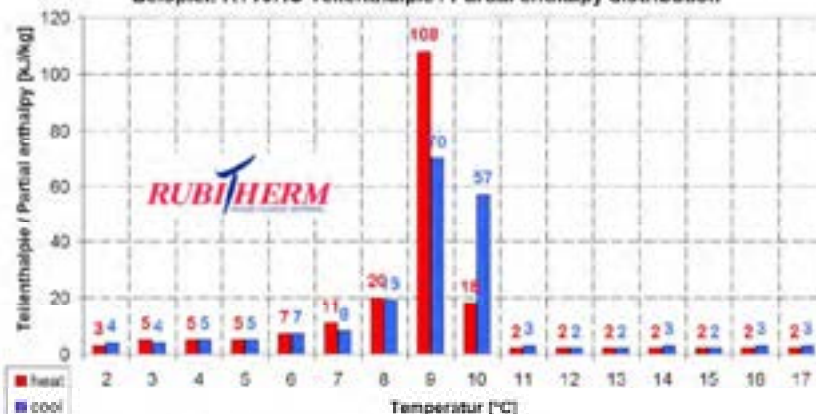
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

	Typical Values	
Melting area	9-10	[°C]
	main peak: 9	
Congeeing area	10-9	[°C]
	main peak: 10	
Heat storage capacity ± 7,5%	195	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 2 °C to 17°C.	54	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid	0,88	[kg/l]
at 0 °C		
Density liquid	0,77	[kg/l]
at 20 °C		
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point (PCM)	132	[°C]
Max. operation temperature	50	[°C]



Beispiel: RT10HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version:

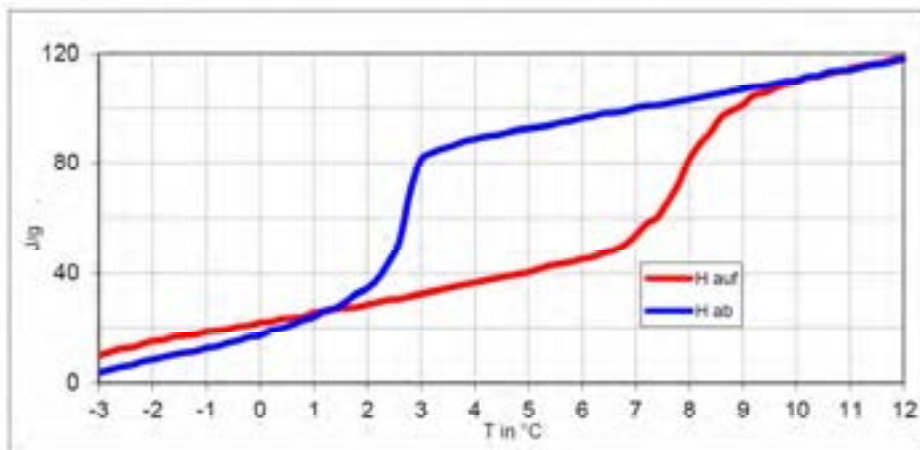
23.07.2013

*Measured with 3-layer-calorimeter.

Climator

ClimSel C7

Main ingredients: Sodium Sulphate, Water and Additives.



Physical Data for ClimSel C7

Phase Change Temperature:	7°C
Maximum Temperature:	35°C
Storage Capacity 0-15°C:	69 Wh/ Litre
Latent Heat of Fusion:	49 Wh/ Litre
Approx. Specific Heat in PCM:	1 Wh/kg/°C
Specific Gravity:	1,40 kg/ Litre
Thermal Conductivity:	0,5-0,7 W/m/°C

Use: Temperature stabilizing for medicine etc.

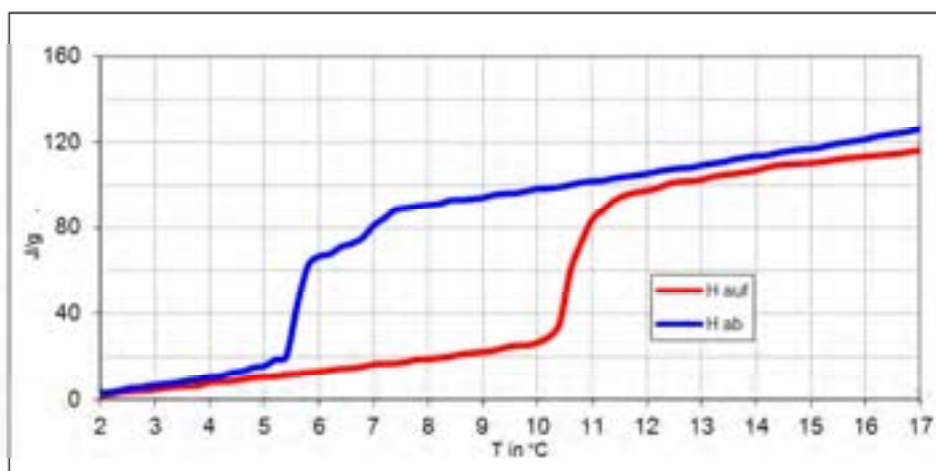
Moving Energy In Time

Climator



ClimSel C10

Main ingredients: Sodium Sulphate, Water and Additives.



Physical Data for ClimSel C10

Phase Change Temperature: (Melting)	10,5°C
Phase Change Temperature: (Freezing)	5,5°C
Maximum Temperature:	35°C
Storage Capacity 0-15°C:	70 Wh/ Litre
Latent Heat of Fusion:	49 Wh/ Litre
Approx. Specific Heat in PCM:	1Wh/kg/°C
Specific Gravity:	1,40kg/ Litre
Thermal Conductivity:	0,5-0,7W/m/°C

Use: Temperature stabilizing for medicine etc.

Moving Energy In Time