



Ricerca di Sistema elettrico

Utilizzo dei materiali a cambiamento di fase per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche e qualitative delle celle frigorifero usate per stoccaggio e trasporto prodotti alimentari freschi.

L. Quercia, D. Palumbo, P. Di Lorenzo, A. Tati

UTILIZZO DEI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE
E QUALITATIVE DELLE CELLE FRIGORIFERO USATE PER STOCCAGGIO E TRASPORTO PRODOTTI ALIMENTARI
FRESCHI.

L. Quercia, D. Palumbo, P. Di Lorenzo, A. Tati

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: C1 "Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi"

Obiettivo: D "Tecnologie per l'industria del freddo"

Responsabile del Progetto: Ing. Ilaria Bertini



Si ringrazia in particolare l'Ing. Bertolini per la manifattura dei prototipi di pannello multistrato

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	11
2.1 PCM ALL'INTERNO DEI PANNELLI ISOLANTI DELLA CELLA FRIGORIFERO.....	11
2.1.1 <i>Realizzazione pannelli multistrato</i>	11
2.1.2 <i>Caratterizzazione pannelli multistrato mediante controlli non distruttivi</i>	15
2.2 PCM ALL'INTERNO DELLA CELLA FRIGORIFERO.....	39
2.2.1 <i>Caratterizzazione termica ed energetica celle frigorifero cariche</i>	42
2.2.2 <i>Confronto cella con PCM e cella di riferimento nel corso di una campagna sperimentale</i>	47
3 CONCLUSIONI.....	84
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	86
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	88

Sommario

L'attività dell'ENEA è stata finalizzata alla sperimentazione delle diverse possibilità di utilizzo dei Materiali a Cambiamento di Fase (PCM) per ottimizzare le prestazioni energetiche e qualitative delle celle frigorifero usate nella catena del freddo.

Nei due anni precedenti abbiamo sviluppato e caratterizzato strutture multistrato contenenti PCM per ottimizzare le celle frigorifero utilizzate per il trasporto nella catena del freddo. E' stato sviluppato un pannello multistrato con il packaging del PCM progettato per lavorare sui carichi termici esterni alla cella frigorifero. Lo sviluppo del packaging del PCM e la fabbricazione dei pannelli multistrato prototipo sono stati inizialmente mirati a pannelli costituiti da due lamiere metalliche isolate termicamente mediante uno strato di polistirolo espanso. Il PCM utilizzato, Rubitherm RT35, pensato come scudo termico, è stato dimensionato e scelto per funzionare sui lati esterni della cella frigorifero posta in ambienti esterni. Questa tipologia di pannelli ha evidenziato interessanti caratteristiche termiche e limiti meccanici attribuibili alle difficoltà di una fabbricazione artigianale, ma ha anche suscitato l'interesse della Plastoblok Italiana s.r.l., ditta che nasce per costruire furgonature per trasporti in regime di temperatura controllata ma anche ormai hangar per proteggere la strumentazione delle piattaforme petrolifere nel deserto. Il pannello sandwich in questo caso è realizzato da due laminati in fibra di vetro isolati termicamente con polistirene rigido in lastre calibrate. Le lastre di vetroresina ed i blocchi di polistirene vengono opportunamente assemblati a pressione con colla poliuretanica bicomponente. In stretta collaborazione con la Plastoblok sono stati quindi progettati e realizzati prototipi di pannelli multistrato di ottima qualità e con una metodologia compatibile anche con una produzione a livello industriale. Sono stati progettati realizzati e caratterizzati con tecniche non distruttive quattro prototipi di pannello multistrato, il primo utilizzato come riferimento, un secondo utilizzato per valutarne le prestazioni termiche con la sola introduzione di canali predisposti per il riempimento con PCM ma lasciati intenzionalmente vuoti, il terzo riempiendo opportunamente i canali col PCM ed infine il quarto realizzando i canali contenenti approssimativamente la metà del PCM ma adiacenti alla lastra in vetroresina esterna.

In considerazione dei buoni risultati raggiunti nell'inclusione di PCM all'interno dei pannelli isolanti di una cella frigorifero, abbiamo focalizzato la sperimentazione su altri possibili usi di PCM per l'ottimizzazione di celle frigorifero che potessero essere utilizzati anche in celle già esistenti. In particolare, anche in considerazione di quanto svolto sull'altro sub-obiettivo del progetto (vedi RdS/PAR2014/036), l'attività è stata focalizzata alla sperimentazione di una diversa tipologia di utilizzo dei PCM in una cella frigorifero, cioè a supporto del gruppo refrigerante. In collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche (UNIPM) è stato progettato, realizzato e verificato sperimentalmente uno scambiatore modulare contenente PCM accoppiato all'aria in uscita dall'evaporatore del gruppo refrigerante. L'obiettivo di questa attività è stato quello di sperimentare 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 impostata, funzionando ad integrazione o in sostituzione della macchina frigorifera. Per realizzare tale applicazione lo scambiatore contenente il PCM è stato installato in una intercapedine ventilata in corrispondenza all'interno di una delle due celle refrigeranti disponibili presso UNIPM. Sono state monitorati i consumi energetici ed i profili termici della nostra cella refrigerata durante diverse campagne sperimentali effettuate monitorando di diversi tipi di frutta per valutare l'effetto sul carico delle condizioni di funzionamento della cella frigo e del suo gruppo refrigerante. Infine è stata effettuata una campagna sperimentale con pesche noci presso UNIPM dove è stato possibile confrontare direttamente due celle frigo identiche cariche di frutta, usandone una come riferimento ed installando nell'altra il prototipo di scambiatore con PCM realizzato.

1 Introduzione

L'impatto energetico della catena del freddo sui consumi mondiali di energia è stato valutato intorno all'8% del consumo totale di energia nel mondo [1], quindi anche piccoli miglioramenti nelle prestazioni energetiche delle celle frigorifero possono portare a interessanti riduzioni di impatto energetico complessivo anche in un settore già molto avanzato a livello tecnologico.

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 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].

La "catena del freddo" si definisce come una Supply Chain a temperatura controllata. Una "catena del freddo ininterrotta" è pertanto costituita da una serie di ambienti ed attività distributive, in cui la temperatura viene mantenuta all'interno di un determinato range. Essa è definita come un sistema coordinato di organizzazioni, persone, attività, informazioni e risorse, coinvolto nel trasferimento fisico o virtuale di prodotti o servizi, dal produttore al consumatore finale. Le attività, che si svolgono all'interno della Supply Chain, trasformano le materie prime ed i componenti in prodotti finiti, che vengono distribuiti al consumatore finale. Oggigiorno la crescente complessità tecnica della distribuzione dei beni di consumo, combinata con l'altrettanto crescente dimensione e profondità del mercato globale, ha portato alla necessità di sviluppi tecnologici sempre più spinti nell'ambito delle tecnologie del freddo. Le necessità di sviluppo tecnologico interessano diversi livelli e varie funzioni che possono essere riassunti come di seguito. Nell'ambito della Produzione e Lavorazione:

- Riduzione dell'intervallo di tempo che intercorre tra la raccolta ed il raffreddamento, questa tendenza viene definita come raffreddamento precoce. L'obiettivo è quello di ridurre la perdita dell'acqua contenuta nei prodotti e la prevenzione della moltiplicazione dei batteri.
- Separazione ove possibile della refrigerazione dall'immagazzinamento; persino la frutta, tradizionalmente refrigerata all'interno dei magazzini, viene spesso refrigerata in apposite celle, prima di essere stoccata.
- Progettazione di sistemi flessibili, quali celle dedicate per ogni tipologia di frutta, al fine di garantire un ambiente di conservazione ideale ed un più rapido riempimento e svuotamento.
- Riduzione della perdita d'acqua dei prodotti tramite un significativo miglioramento nel controllo dell'umidità relativa degli ambienti, tramite utilizzo di aria umida per i prodotti ortofrutticoli.
- Controllo delle condizioni ambientali, tramite l'impiego di ambienti ad atmosfera controllata per i prodotti ortofrutticoli, in cui temperatura, umidità relativa, pressione, ricircolo e composizione dell'aria sono controllati.

Nell'ambito dello Stoccaggio:

- Riduzione del consumo di energia, attraverso l'installazione di saracinesche e porte automatiche invece delle tradizionali porte, coibentazioni dei magazzini e coperture esterne contro l'irraggiamento solare.
- Implementazione di sistemi di tracciabilità dei trattamenti termici dei prodotti.
- Proliferazione di magazzini intermedi posti lungo la catena distributiva, spesso finalizzati a soddisfare le esigenze dei clienti di grandi dimensioni (supermercati).

Nell'ambito del Trasporto:

- Incremento nell'utilizzo di veicoli multi comparto e multi temperatura.
- Utilizzo di condotti per la distribuzione dell'aria nei veicoli di grandi dimensioni.
- Elevata frequenza di rinnovo dell'aria all'interno dei veicoli.
- Impiego di sistemi di rilevazione della temperatura.
- Dotazione dei veicoli includente tende di plastica isolanti, al fine di ridurre l'incremento della temperatura in caso di apertura dei vani dei veicoli.
- Assicurazione della tracciabilità dei prodotti e della temperatura.

Nell'ambito della Vendita:

- Incremento delle vendite dei prodotti termosensibili nei grandi supermercati a discapito dei piccoli punti vendita.
- Tendenza alla riduzione dei consumi di energia, considerando che i processi di refrigerazione rappresentano il 30-50% del fabbisogno energetico dei supermercati.
- Particolare attenzione nei confronti della fiducia del consumatore nei riposta nella sicurezza degli alimenti surgelati (tramite uso di termometri, indicatori di tempo-temperatura e la rimozione dei prodotti dagli scaffali alcuni giorni prima della data di scadenza indicata sulle confezioni).

In particolare nel settore ortofrutticolo la competitività si gioca anche su piccoli miglioramenti nella gestione della Supply Chain. Il consumatore europeo è divenuto nel tempo sempre più informato ed esigente per quando riguarda i propri acquisti nel campo alimentare, rivolgendo la propria attenzione anche alle metodologie di coltivazione e di conservazione dei prodotti; pertanto è possibile affermare che la qualità del prodotto finito è divenuta una leva competitiva fondamentale. Qualità che, per quanto riguarda il settore ortofrutticolo, si ottiene sul campo di coltivazione, ma che deve essere preservata ed arricchita durante la fase post-raccolta. Ridurre infatti gli sprechi e le perdite, dovute ad una non corretta conservazione dei prodotti o all'errata esecuzione di attività lungo la catena distributiva, rappresenta una notevole opportunità di crescita. Mediamente gli scarti si distribuiscono lungo la Supply Chain secondo le seguenti percentuali:

Attività	Entità degli scarti (%)
Raccolta	16
Stoccaggio	7
Trasporto	1
Manipolazioni varie	2
Vendita	20
Consumo	54

Quindi è possibile affermare in sintesi che un'approssimativa gestione della Supply Chain comporta inevitabilmente scarti di prodotto, siano essi dovuti ad un decadimento qualitativo od alla completa perdita fisica della merce. Le conseguenze sono naturalmente un aumento complessivo del costo dell'intera filiera, una riduzione dei profitti ed un calo della competitività dell'intera Supply Chain. Un prodotto frutticolo fresco viene raccolto e come tale commercializzato, senza processi di trasformazione. È un prodotto vivo che continua la sua attività fisiologica, ma con modalità diverse da quello ancora attaccato alla pianta in quanto soggetto a stress di diversa entità. Esso va incontro a processi degradativi che porteranno alla sua senescenza e successiva morte, in tempi più o meno lunghi a seconda della tipologia, della sua deperibilità, che è funzione della sua attività metabolica e delle condizioni ambientali in cui è mantenuto. Un ruolo di grande importanza tra i diversi fattori ambientali è certamente quello svolto dalla temperatura, in grado di influenzare alcuni dei processi che interessano il frutto durante la sua vita post-raccolta.

Quattro sono dunque i sopracitati processi fondamentali:

- Respirazione
- Traspirazione
- Produzione di etilene
- Maturazione

I primi due fenomeni sono influenzati in primo luogo dalla temperatura dell'ambiente di conservazione, sicuramente il parametro più importante per i prodotti alimentari deperibili da controllare lungo tutta la Supply Chain. L'ottimizzazione energetica e qualitativa delle celle refrigerate che vengono utilizzate a vari livelli va quindi affrontata con un approccio attento ad apportare miglioramenti al numero massimo di funzioni elencate precedentemente.

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. 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 di cloruro 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 $15\%\div 21\%$ 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' $11\%\div 17\%$ 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 perdite 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 le 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 particolar modo 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 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.

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.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 PCM all'interno dei pannelli isolanti della cella frigorifero

L'utilizzo dei materiali in passaggio di fase (PCM) per ridurre il consumo di energia elettrica per la conservazione di merci refrigerate nel trasporto, inserendo il suddetto materiale innovativo all'interno delle pareti che costituiscono l'involucro della cella frigorifera ha costituito il fulcro del lavoro nei primi due anni di attività, l'attività sperimentale ha permesso la validazione dei risultati teorici e la valutazione in campo di pannelli innovativi che potranno essere utilizzati nella realizzazione di container refrigerati. Sono state eseguite la progettazione e la costruzione prima di prototipi di packaging del PCM poi del pannello di tamponamento della cella. La tecnica di costruzione del prototipo del pannello multistrato si basava su quella utilizzata industrialmente per costruire i pannelli delle celle frigorifero MISA utilizzate per la sperimentazione presso il nostro laboratorio e presso UNIPM. Il pannello è costituito da due lastre metalliche verniciate che contengono uno strato isolante costituito da poliuretano espanso alla densità necessaria all'ottenimento di definite caratteristiche di isolamento termico. Il primo passo è stato la progettazione e realizzazione del sistema di packaging necessario al contenimento del PCM e di implementazione dei PCM con gli strati isolanti dei pannelli. E' stato studiato un sistema di impaccettamento del PCM la cui tecnologia è derivata dal packaging dei prodotti alimentari. Per il riempimento dei contenitori è stata utilizzato come PCM il Rubitherm RT 35, che ha le caratteristiche adatte ad essere usato come strato adiacente alla parete esterna del pannello. I prototipi del pannello ingegnerizzato sono stati realizzati utilizzando un lamierino di acciaio plastificato, schiuma poliuretanica, le strutture di contenimento del PCM realizzate ed infine un telaio laterale in tavola di legno. Le schiuma poliuretanica è stata scelta in base alle caratteristiche di espansione successive alla operazione di iniezione nell'intercapedine formatasi tra lo strato di PCM ed il lamierino di chiusura interno. Questa procedura ha fornito prototipi dalle interessanti caratteristiche termiche ma di complessa realizzazione. Questo lavoro ha poi suscitato l'interesse della Plastoblok Italiana s.r.l., una ditta che nasce per costruire furgonature per trasporti in regime di temperatura controllata ma anche ormai hangar per proteggere la strumentazione delle piattaforme petrolifere nel deserto. Il pannello sandwich in questo caso è realizzato da due laminati in fibra di vetro isolati termicamente con polistirene rigido in lastre calibrate (vedi Figura 1). Le lastre di vetroresina ed i blocchi di polistirene vengono opportunamente assemblati a pressione con colla poliuretanica bicomponente. In stretta collaborazione con la Plastoblok abbiamo progettato e realizzato prototipi di pannelli multistrato di ottima qualità e con una metodologia compatibile anche con una produzione a livello industriale. Inoltre quanto realizzato e caratterizzato su questa tipologia di pannelli multistrato utilizzando come PCM il Rubitherm RT 35, pensato per il lato esterno della cella frigorifero, può facilmente essere esteso alla realizzazione di un pannello multistrato che presenta anche uno strato con un diverso PCM, p.e. il Rubitherm RT 5 HC utilizzato all'interno della cella frigorifero per lo scambiatore in ausilio al gruppo refrigerante, adiacente alla lastra interna in vetroresina.



Figura 2.1.1: pannello sandwich tipico della Plastoblok. *Esterno:* Laminato in fibra di vetro, rinforzato con resina poliesteri (con oltre il 35% di Fibra di vetro e Gelacoat ca. RAL9010 a finire. *Isolante :* Poliuretano e/o Polistirene, rigido in lastre calibrate, a basso assorbimento d'acqua.

2.1.1 Realizzazione pannelli multistrato

Il grosso vantaggio nel realizzare il packaging del PCM in questi pannelli con lo strato isolante rigido è la maggiore stabilità meccanica del pannello che rende possibile ricavare la sede per il PCM direttamente fresando dei canali nel blocco di polistirene, lo strato isolante quindi può funzionare anche come strato di contenimento del PCM. Sono stati quindi progettati e realizzati quattro prototipi utilizzando per tutti due lastre di vetroresina esterne dello spessore di 2 mm ciascuna e con area 600x600 mm². Lo strato isolante ha sempre uno spessore complessivo di 100mm (come i pannelli isolanti delle celle MISA presso UNIPM) ma per i prototipi A,B e C è costituito da due lastre dallo spessore calibrato di 70 e 30 mm.



Figura 2.1.1.1: Vista complessiva dei prototipi A e B dei pannelli finiti, si nota che lo strato isolante è composto da due lastre di 70+30 mm di polistirene. Nel prototipo B le due lastre di polistirene sono state fresate con 14 canali su una e 13 sull'altra ed incollate con i canali in direzione perpendicolare in modo da realizzare una griglia.

Il prototipo di riferimento (A), è realizzato incollando con la metodologia usuale le lastre di vetroresina ai due pannelli di polistirene che vengono incollati tra loro solo per realizzare lo spessore totale di 100 mm dello strato isolante. Il prototipo B è stato realizzato con la stessa tecnica ma fresando sulla superficie dei due blocchi isolanti di polistirene rispettivamente 13 e 14 canali che formano una griglia di contenimento una volta che le lastre di polistirene sono state opportunamente incollate con i canali sulle due facce perpendicolari tra loro. Il prototipo B è stato realizzato per valutare le proprietà termiche e meccaniche dovute solo alla realizzazione delle strutture di contenimento del PCM realizzate direttamente nelle lastre di polistirene. Il prototipo C è realizzato come il B riempiendo i canali ottenuti con la fresatura con il PCM (Rubitherm RT35) attraverso il foro visibile nella Figura 2.1.1.2.



Figura 2.1.1.2: Vista complessiva dei prototipi C e D dei pannelli finiti, si nota sul prototipi C, realizzato con i canali identici al prototipo B, il foro utilizzato per riempire col PCM i canali dopo l'incollatura. Sono evidenziati i lati esterni dei pannelli a cui è adiacente (C) o a contatto (D) il PCM.

Infine, per ottenere un pannello multistrato con lo strato di PCM con un contatto termico migliore con il pannello di vetroresina montato sul lato esterno della cella, è stato realizzato anche un blocco di polistirene fresato con 14 canali decapitato da un lato ed incollato sul pannello di vetroresina esterno (vedi Figura 2.1.1.3). I canali sono stati successivamente riempiti col PCM, incollando il rimanente pannello in vetroresina ed il blocco di polistirene decapitato si è ottenuto il quarto pannello (D) dalle dimensioni esterne identiche ai primi tre. In Tabella 2.1.1.1 sono state riassunte le caratteristiche costruttive dei quattro prototipi. In particolare si nota come il riempimento dei canali col PCM sia stato molto efficace, nel prototipo C si è ottenuto un riempimento in peso superiore al 95% ed anche il prototipo D, che ha il PCM a stretto contatto con la lastra in vetroresina, mostra un riempimento dei canali superiore al 90%.

Le caratterizzazioni termiche e meccaniche sui quattro prototipi ci forniscono un quadro esaustivo sulle possibilità di utilizzo di PCM all'interno dei pannelli isolanti che costituiscono le celle frigorifero, completando il lavoro dei due anni precedenti. I risultati ottenuti hanno fornito indicazioni su come procedere dal punto di vista costruttivo nell'ingegnerizzazione di un pannello multistrato che contenga, oltre allo strato isolante, anche due strati PCM con diverse temperature di fusione, uno sul lato esterno della cella ed uno sul lato interno della stessa. Il tutto andrebbe però opportunamente dimensionato e sarebbe poi scelto in base alle temperature di funzionamento della cella stessa.



Figura 2.1.1.3: Prototipo D del pannello durante la costruzione per evidenziare la canalizzazione contenente Rubitherm RT35 a contatto col pannello in vetroresina esterno.

Tabella 2.1.1.1 Caratteristiche dei prototipi realizzati.

Prototipo pannello	A	B	C	D
Spessore polistirene (mm)	70+30	70+30	70+30	100
N° canali (vol. 0.208 l)	-	13+14	13+14	14
Volume canali	-	5,616	5,616	2,912
Peso stimato PCM (T<35°C)	-	-	4,94	2,56
Peso totale (Kg)	4,00	3,50	8,00	5,50
Dimensioni (m ³)	0,04	0,04	0,04	0,04
Densità (Kg/m ³)	111,11	97,22	222,22	152,78

2.1.2 Caratterizzazione pannelli multistrato mediante controlli non distruttivi

I prototipi realizzati di pannelli multistrato sono stati preliminarmente caratterizzati con alcuni controlli non distruttivi precedentemente utilizzati per caratterizzare il comportamento meccanico e termico delle precedenti tipologie di pannelli.

I controlli non distruttivi o indagini non invasive permettono la verifica di un oggetto. Questa verifica può assumere diversi significati:

- Analisi difettologica
- Integrità strutturale

Le tecniche sono diverse e complementari tra loro. Nel caso dei pannelli, visto il loro utilizzo come isolatori termici, sono state utilizzate tecniche che misurano l'energia (meccanica, elettromagnetica) trasmessa dall'oggetto.

Tabella 2.1.2.1 Dimensioni e peso

Pannello	A	B	C	D
Peso (Kg)	4,00	3,50	8,00	5,50
Dimensioni (m ³)	0,04	0,04	0,04	0,04
Densità (Kg/m ³)	111,11	97,22	222,22	152,78

Radiografia digitale: La radiografia digitale permette la visione interna dell'oggetto in modo non invasivo. I raggi X, una radiazione elettromagnetica più energetica della luce visibile, attraversano gli oggetti evidenziando le non uniformità macrostrutturali e i difetti presenti all'interno dell'involucro.

Nel pannello è possibile evidenziare con tale tecnica i pieni e i vuoti, la presenza del PCM e soprattutto rilevare la geometria interna.

Il sistema consta di una sorgente radiografica di tensione 160 KV e corrente 10 mA, di un rilevatore digitale della radiazione e un manipolatore porta oggetti, il tutto è contenuto in un bunker di protezione fino ad un massimo di 200 KV. Il rilevatore digitale converte la radiazione X, che attraversa il campione, in segnali elettrici ed in tempo reale vengono inviati al computer che visualizza l'immagine radiografica in toni di grigio.

Le gradazioni di grigio rappresentano l'assorbimento dei raggi proporzionale alla densità del campione attraversato dai raggi X. In nero gli oggetti più densi, nervature in fibra di vetro, metallo o PCM in bianco la schiuma polimerica.

La paletta dei toni di grigio dell'immagine radiografica è stata espansa tra il minimo e il massimo valore del pixel all'interno del rettangolo rosso.

Tabella 2.1.2.2 Setup Radiografico

Equipment	Seifert ISOVOLT TITAN 160 M2 0.4-1.5	Max. Tube Voltage (kV)	160
Tube Current (mA)	10	Focal Spot Size EN 12 543 (mm)	3.00
Detector	Pixel 512 x 512	Modello	PerkinElmer
KV	70	mA	1

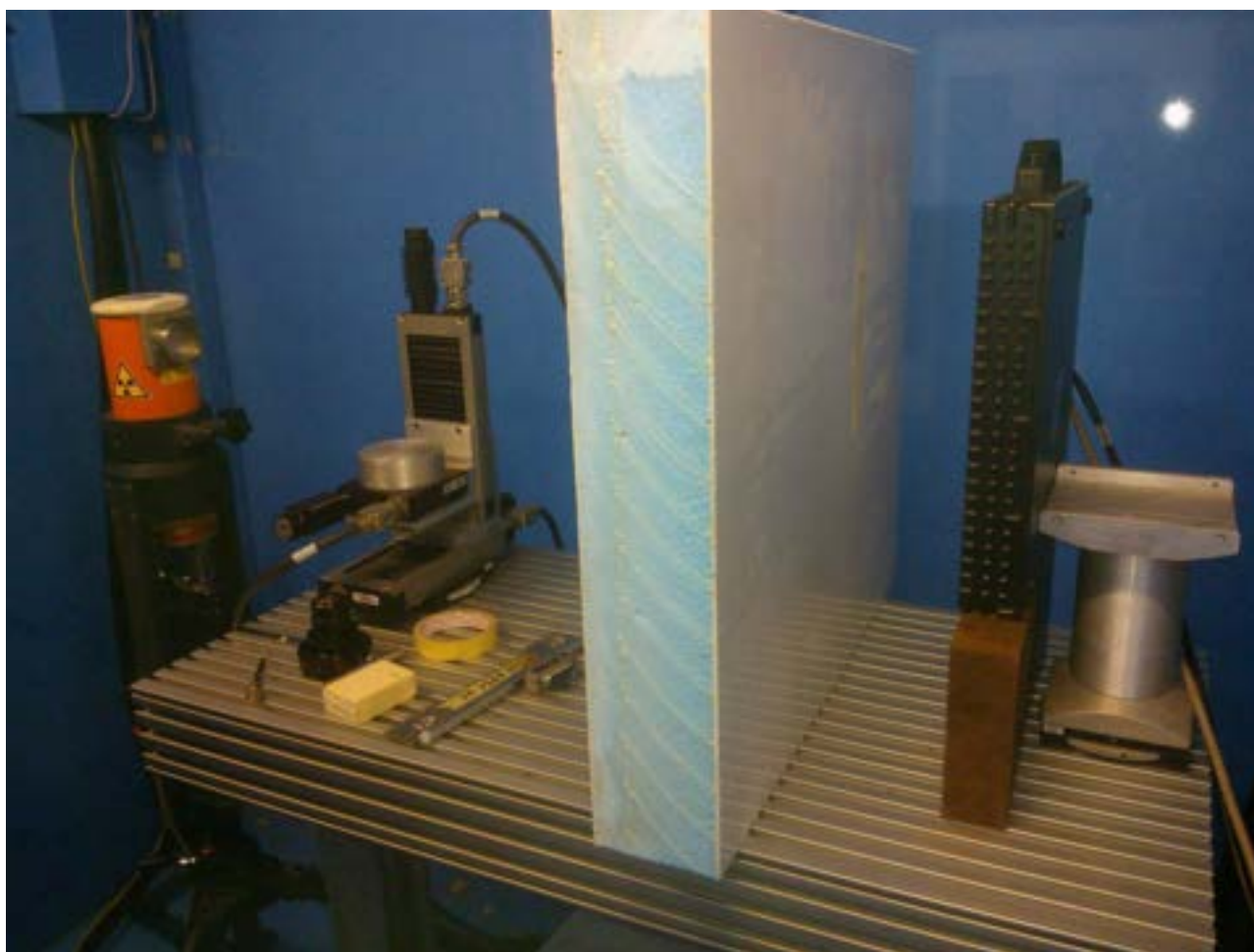


Figura 2.1.2.1: Interno della cabina radiografica con pannello da ispezionare, sorgente a raggi X e rilevatore elettronico di radiazione.

Pannello A (riferimento)

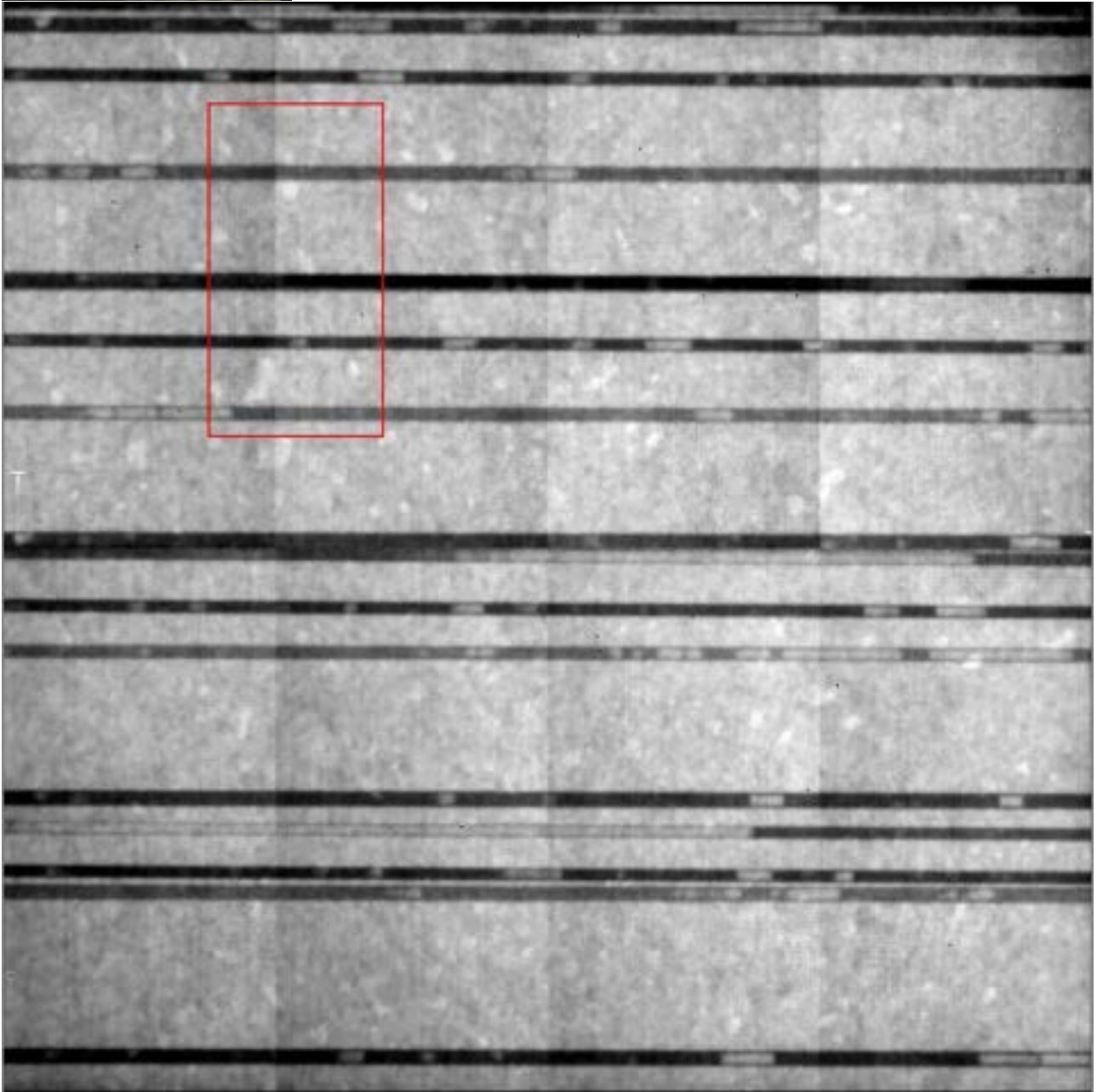


Figura 2.1.2.2: Immagine Radiografica pannello A.

Nell'immagine sottostante l'immagine radiografica digitale viene elaborata tramite programma sviluppato nel laboratorio in Labview per estrarre le seguenti informazioni:

- Profilo di una linea nella direzione X e Y dell'immagine

- visione tridimensionale in zona selezionata

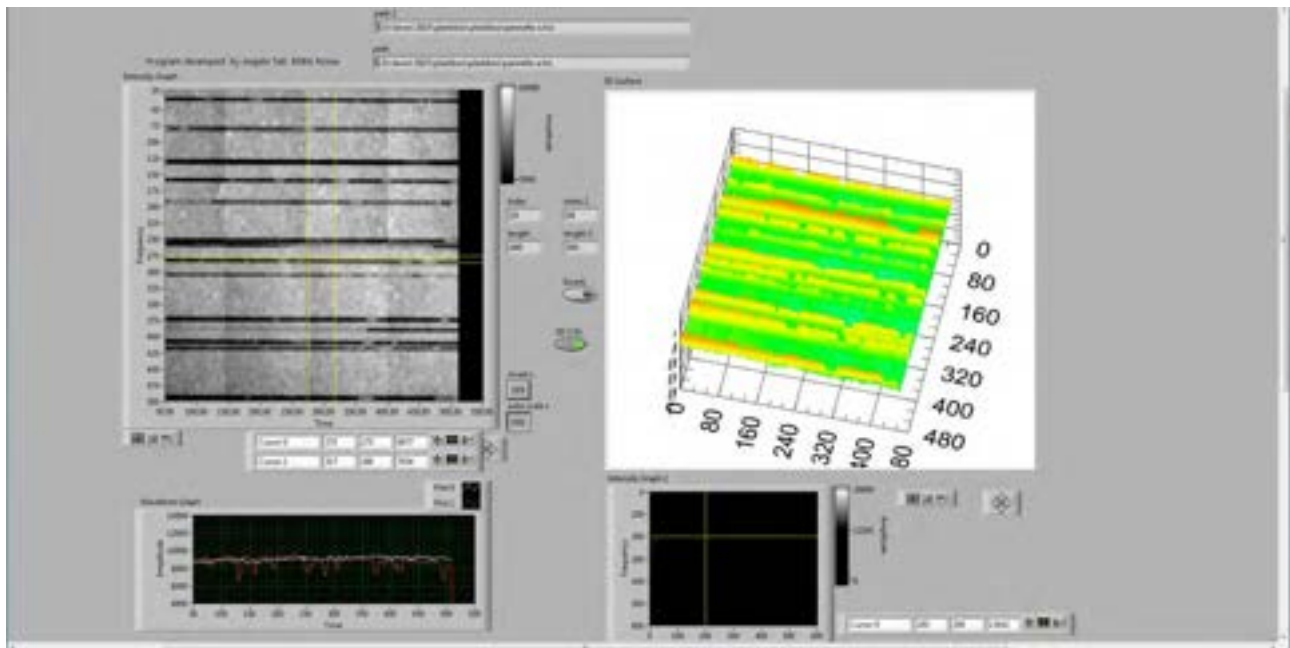


Figura 2.1.2.3: Elaborazione dell'immagine radiografica del pannello A.

Pannello B (predisposto per il PCM con i 27 canali vuoti)

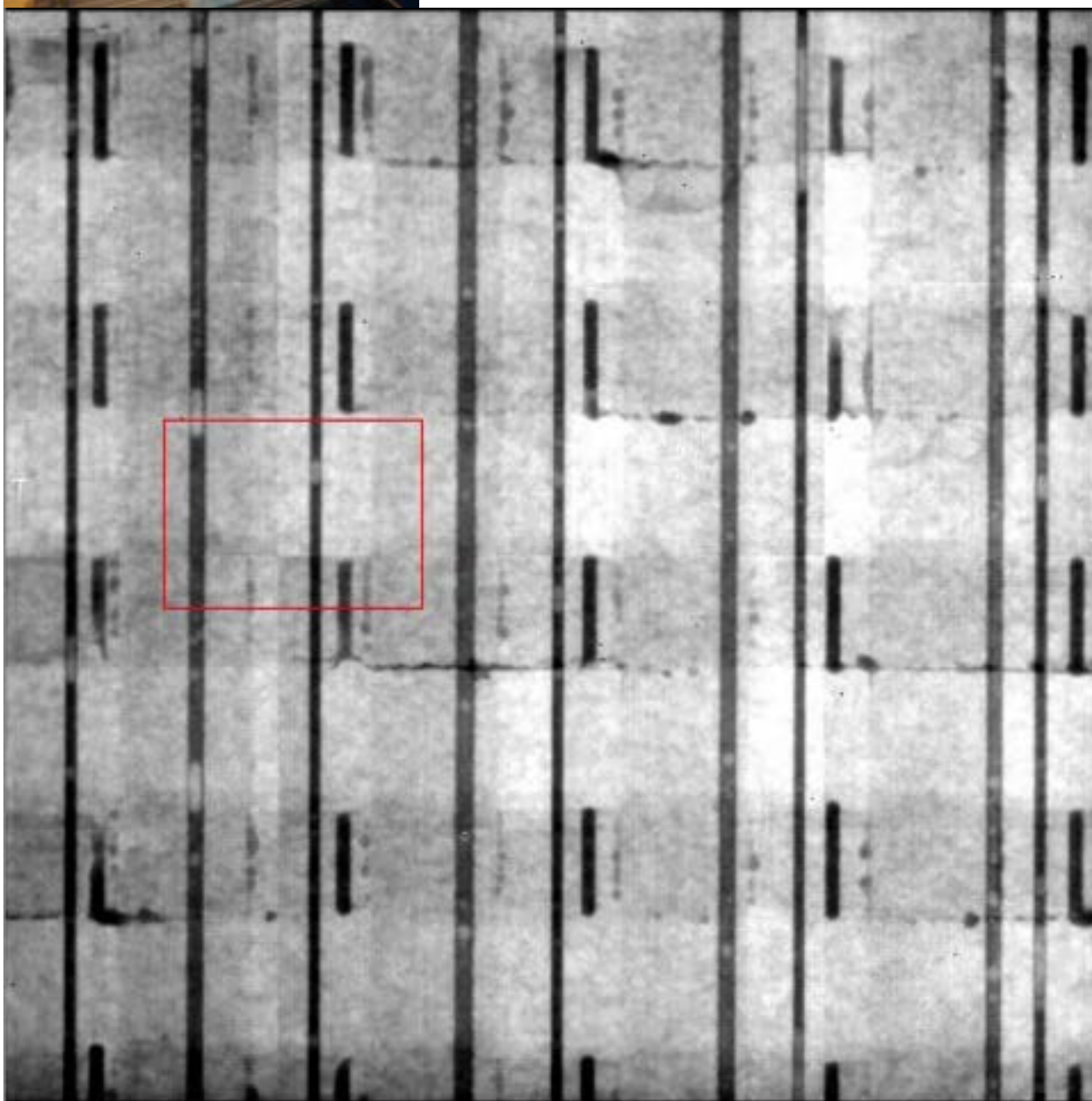


Figura 2.1.2.4: Radiografia Digitale pannello B.

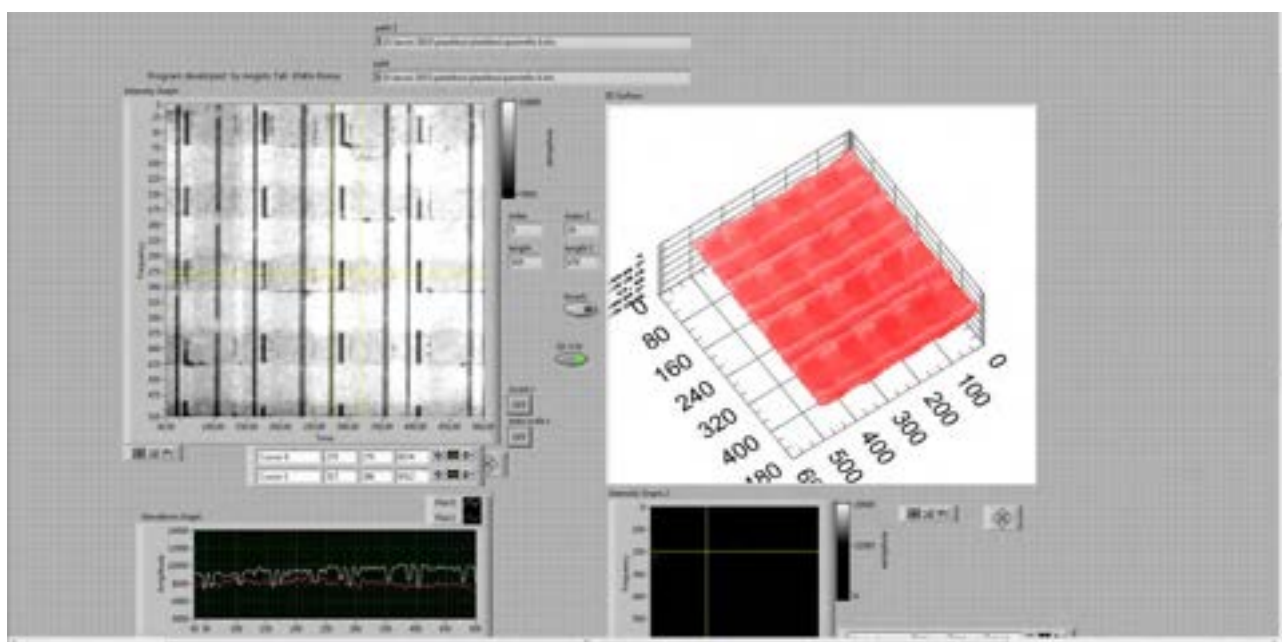


Figura 2.1.2.5: Elaborazione dell'immagine radiografica del pannello B.

Pannello C (con i 27 canali riempiti di PCM)

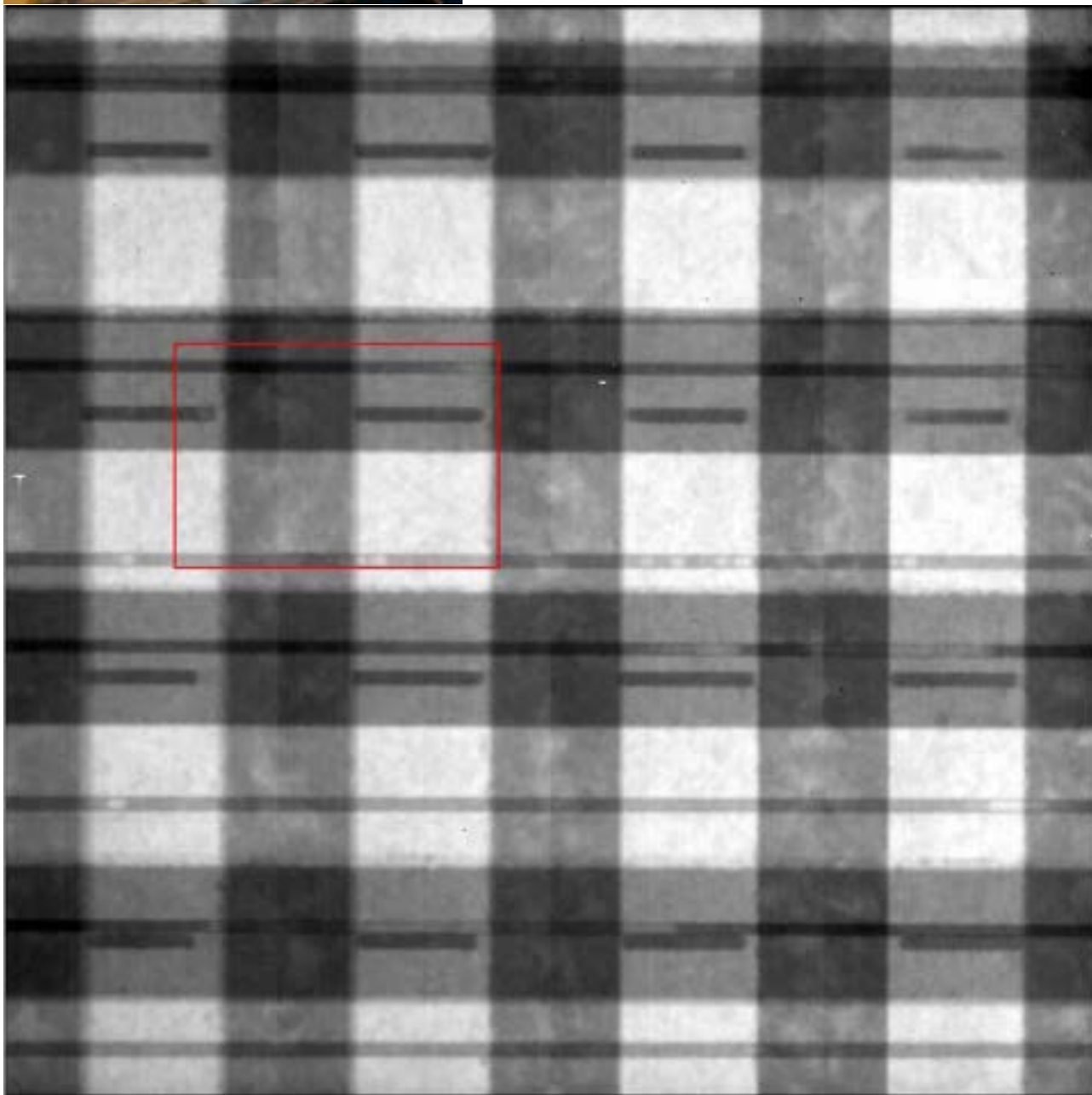


Figura 2.1.2.6: Immagine Radiografica del pannello C.

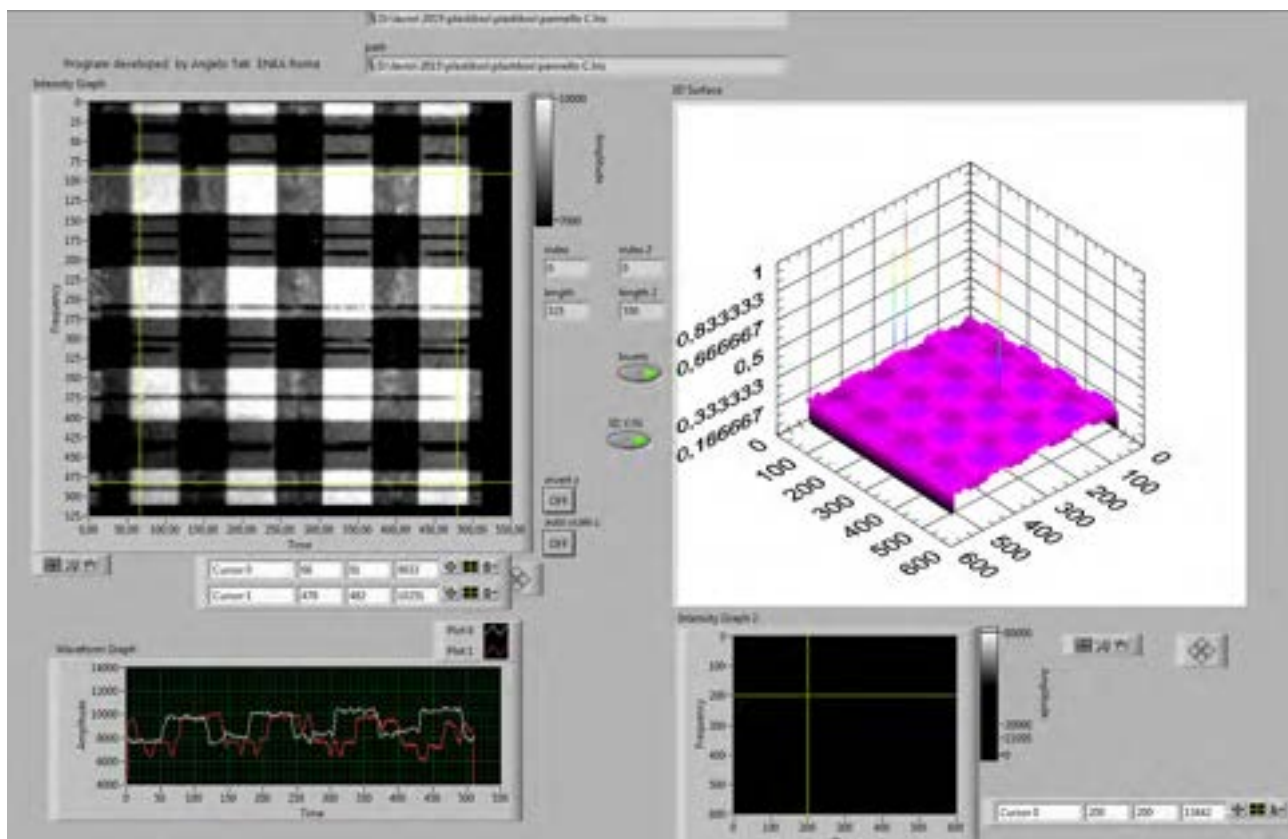


Figura 2.1.2. 7: Elaborazione dell'immagine radiografica del pannello C.

Pannello D (con i 14 canali, adiacenti alla pelle in vetroresina esterna, riempiti con PCM)



Figura 2.1.2.8: Immagine Radiografica del pannello D.

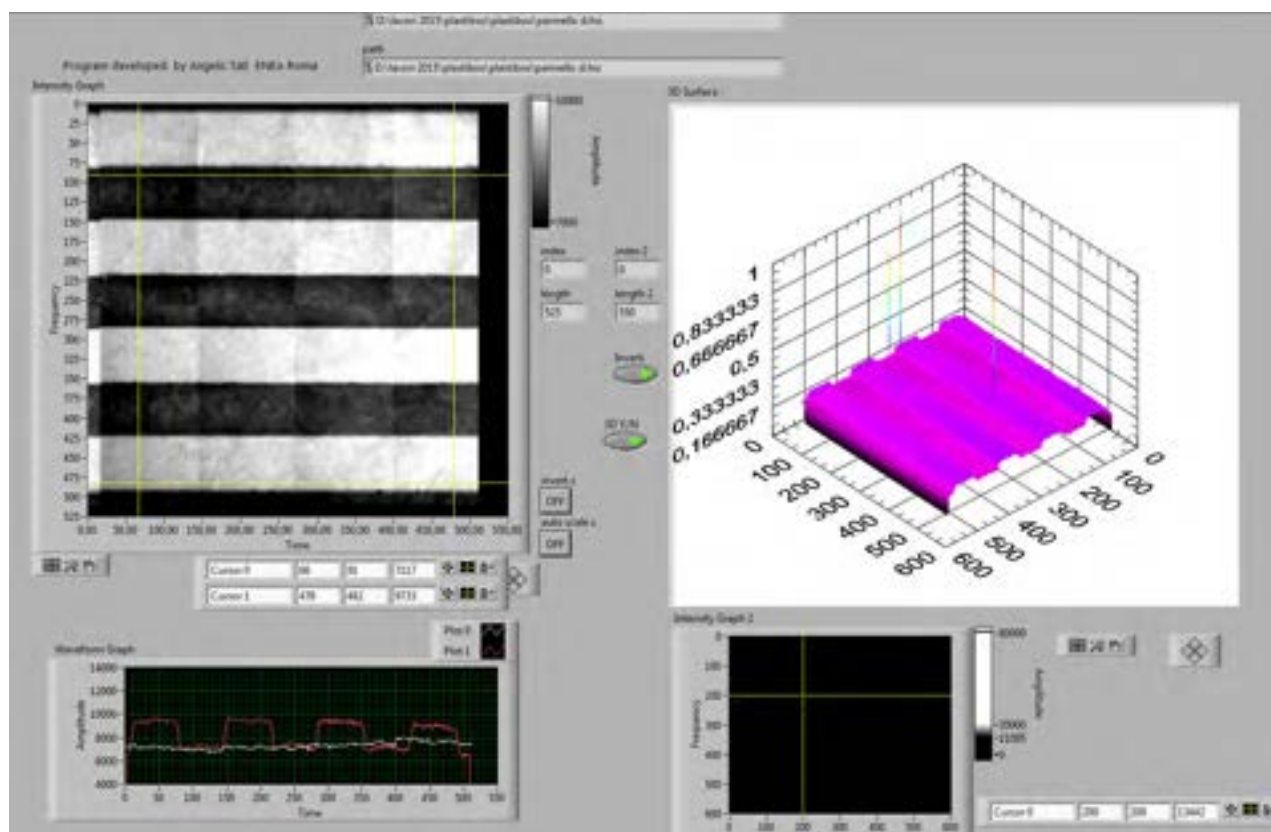


Figura 2.1.2.9: Elaborazione dell'immagine radiografica del pannello D.

Ultrasuoni a bassa frequenza: Gli ultrasuoni sono vibrazioni meccaniche che attraversano la materia. Nel caso specifico l'oggetto viene attraversato da ultrasuoni ad una frequenza di 50 KHz. Il campione è esaminato attraverso 2 sonde, una trasmittente ed un'altra ricevente poste ai lati del campione come mostrato nelle figure seguenti. Il risultato della misura ultrasonora effettuata in un punto prescelto è la velocità del suono nel mezzo. Questo valore pari a 340 m/s per l'aria e per l'acciaio a 5900 m/s è relazionato alla densità del mezzo e al modulo elastico. I valori ottenuti dal pannello si aggirano intorno ai 1000 m/s a garanzia di una bassa densità ma notevole rigidità. La presenza del PCM nel pannello non cambia molto il valore di velocità a significare che la struttura rimane rigida anche se più pesante del pannello tal quale.

Tabella 2.1.2.3: Setup Ultrasonoro

Equipment	Krautkramer 23 LF	Probe	2 x 50 KHz Size 1"
Tecnica	Trasmissione	Contatto	A secco

Tabella 2.1.2.4: Misura delle velocità ultrasonore per tutti i pannelli.

Pannello	A	B	C	D
Velocità Media (m/s)	1025	1024	1101	999
Standard Deviation	5,78	9,96	23,6	32,68
Variance	33,40	99,22	531,80	1067,90

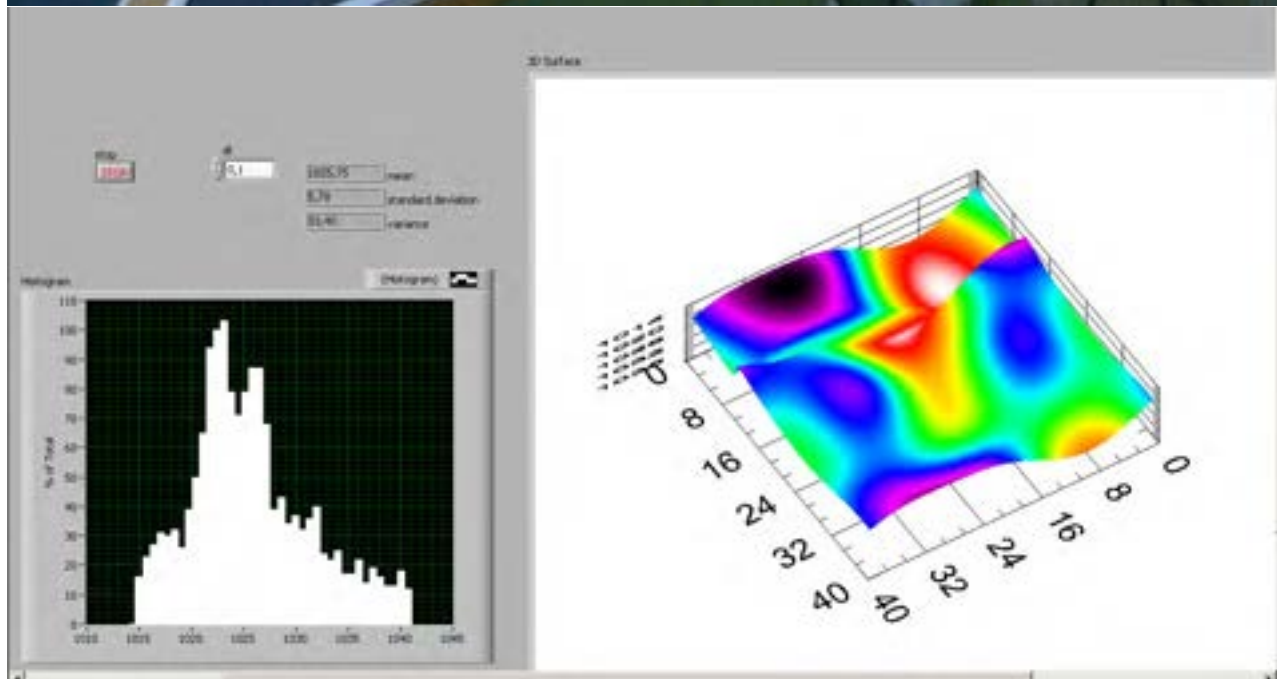


Figura 2.1.2.10: Esame Ultrasonoro del pannello A e sintesi grafica dei risultati.

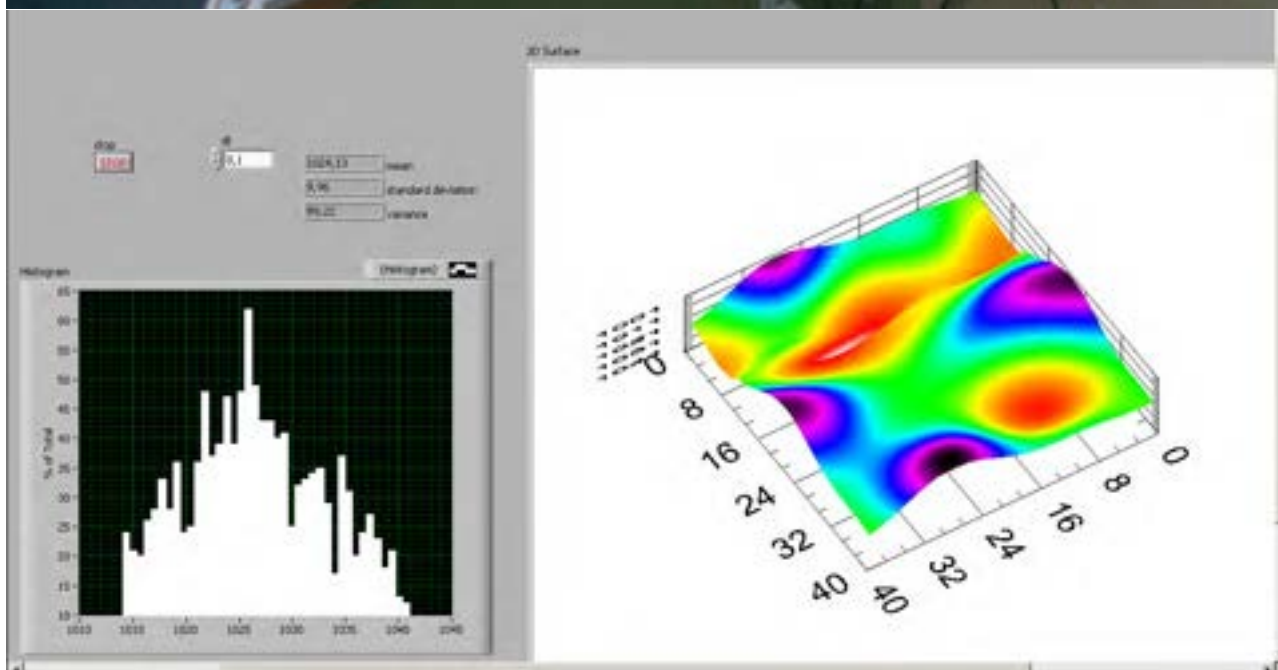


Figura 2.1.2.11: Esame Ultrasonoro del pannello B e sintesi grafica dei risultati.

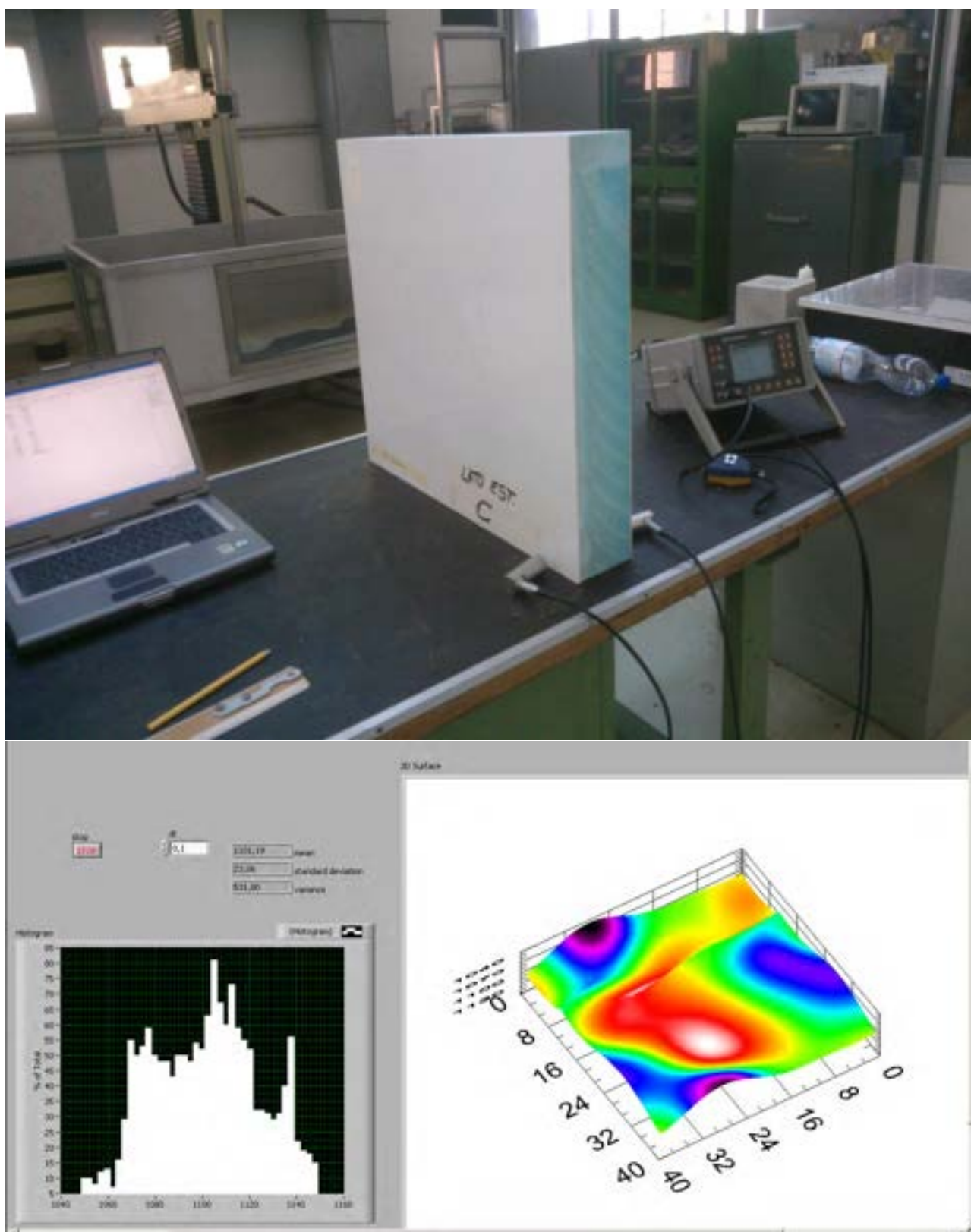


Figura 2.1.2.12: Esame Ultrasonoro del pannello C e sintesi grafica dei risultati.

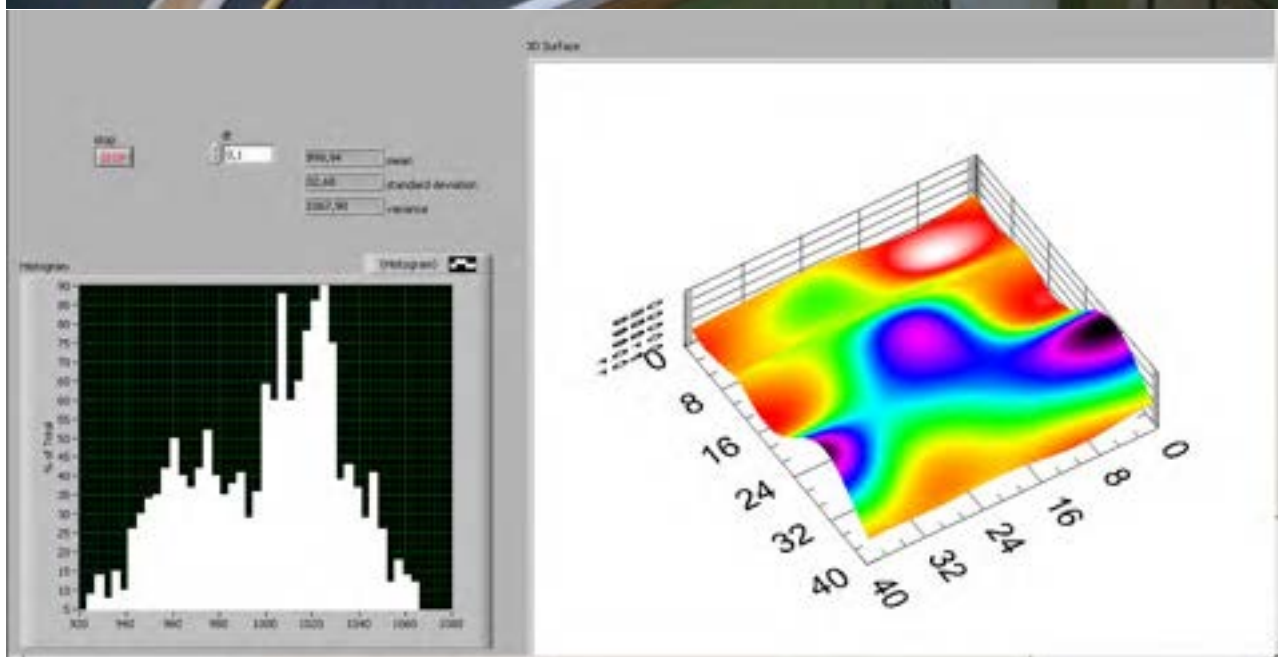


Figura 2.1.2.13: Esame Ultrasonoro del pannello D e sintesi grafica dei risultati.

Termografia: La termografia utilizza i raggi infrarossi per esaminare oggetti sottoposti ad un gradiente termico, quest'ultimo può essere applicato in modo attivo o passivo. La termocamera rileva la radiazione infrarossa tramite sensori CCD bolometrici raffreddati elettricamente, questo principalmente per ridurre il rumore termico. Attraverso opportuni lenti con filtri si elimina la radiazione nel visibile. Nel caso dei pannelli è stata utilizzata la tecnica a trasmissione per mezzo di una sorgente luminosa ad alta densità, circa 2000 Watt, per riscaldare il lato del pannello (esterno). Sul lato opposto la termocamera rileva la radiazione infrarossa trasmessa.

Tabella 2.1.2.5: Setup Termografico.

Equipment	Flir S60	Range	
Tecnica	Trasmissione	Sorgente di calore	Lampada alogena 2000 KW
Datalogger	Msr 165	Sensori	Temperatura, Umidità Luminosità, Pressione
Campionamento Datalogger	1 sec	Campionamento Termocamera	60 s



Figura 2.1.2.14: Setup sperimentale per l'esame termografico dei pannelli

Pannello A

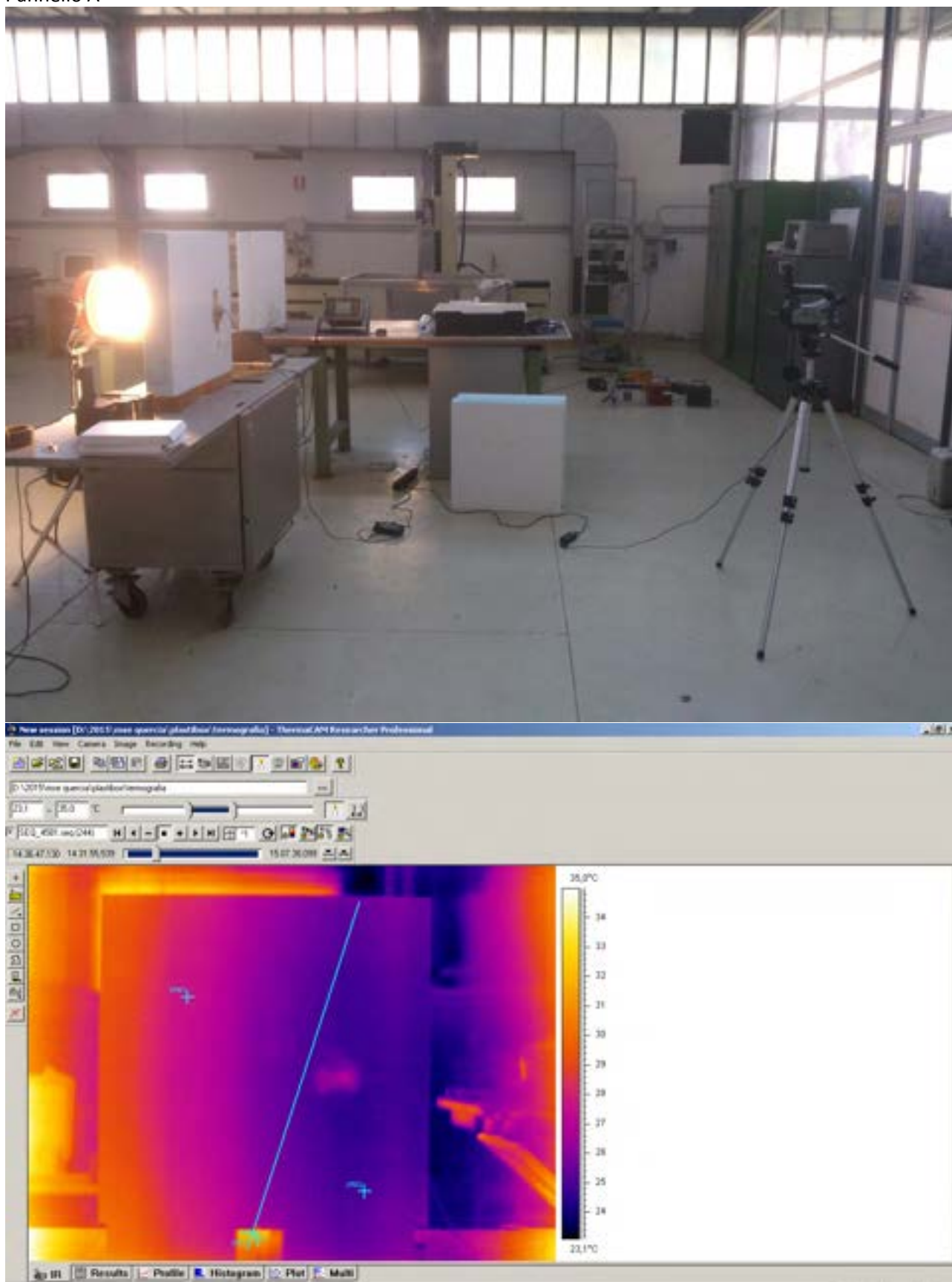


Figura 2.1.2.15: Esame Termografico del pannello A.

L'immagine termografica viene processata offline tramite software dedicato chiamato Thrmacam Researcher Professional 2.8 della FLIR. Il software dedicato legge i file salvati con la termocamera nel formato .seq che contiene l'insieme di immagini termografiche memorizzate ogni 60 sec. Queste sequenze di immagini contengono i valori di temperatura di ogni punto dell'oggetto testato. Tramite elementi di indagini come punti o linee è possibile monitorare l'andamento delle temperature nel tempo di ripresa.

In particolare la schermata è suddivisa nei seguenti riquadri:

- in alto a sx: Termogramma o immagine infrarossa dell'oggetto al tempo T
- in alto a dx: Andamento nel tempo delle temperature dei punti denominati SP0n scelti sul termogramma
- in basso a dx: Profilo delle temperature della linea evidenziata nel termogramma in azzurro
- in basso a sx: Istogramma delle temperature della stessa linea

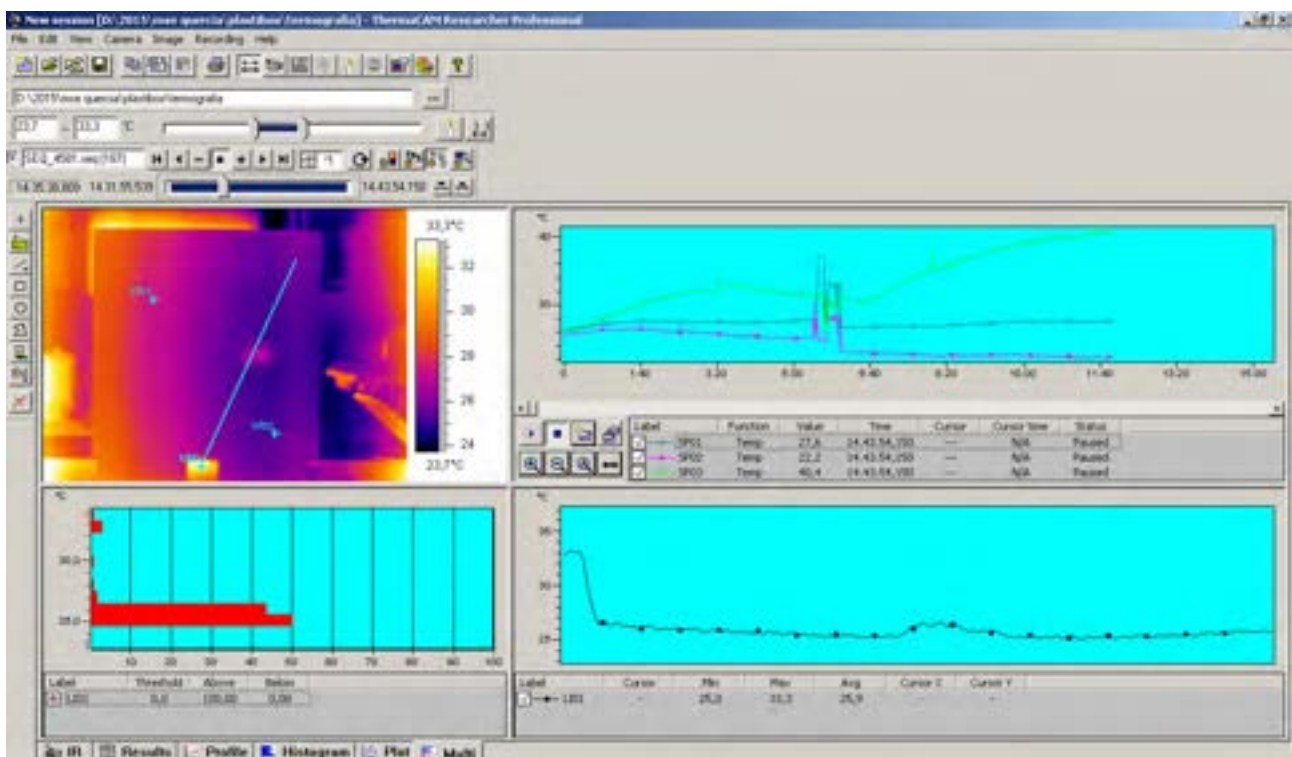


Figura 2.1.2.16: Esame Termografico del pannello A e sintesi grafica dei risultati.

A questo punto viene rimosso il pannello e spenta la sorgente luminosa per la caratterizzazione della sorgente termica in termini geometrici:

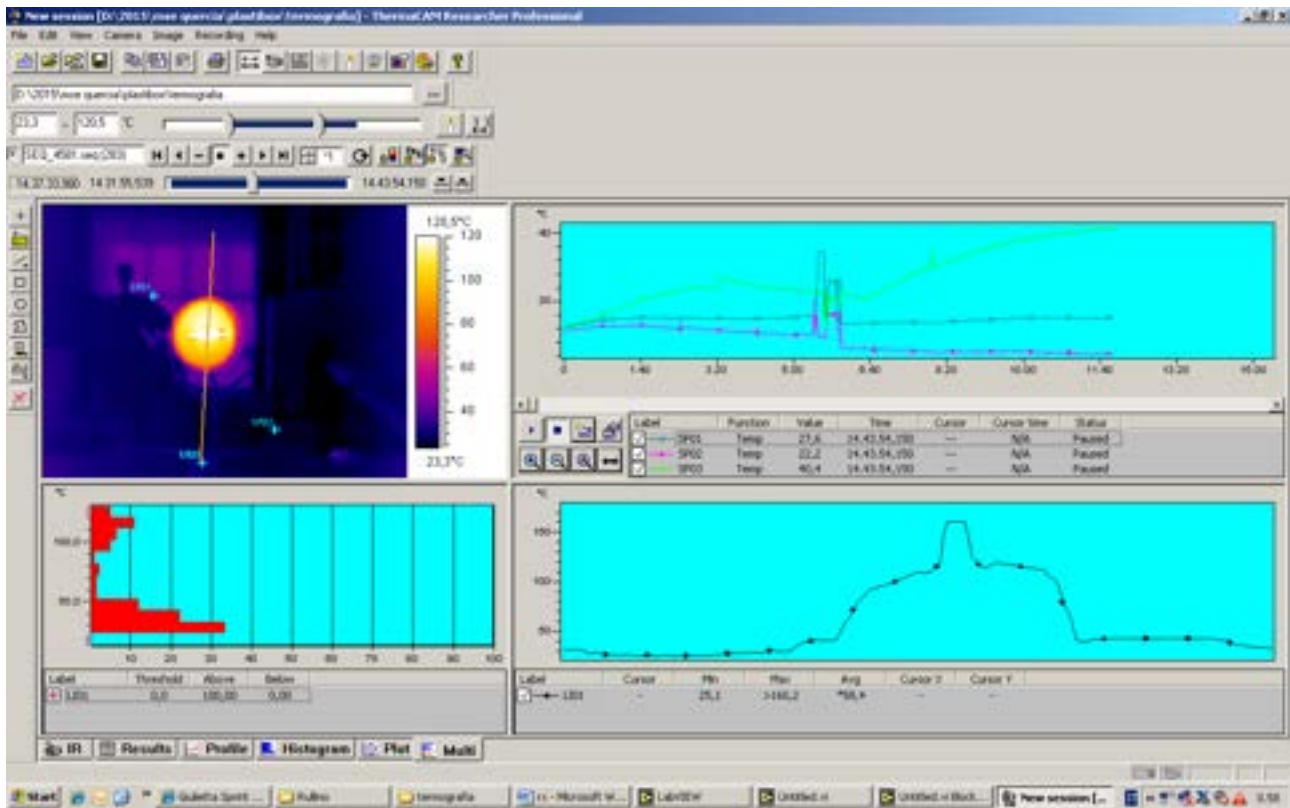
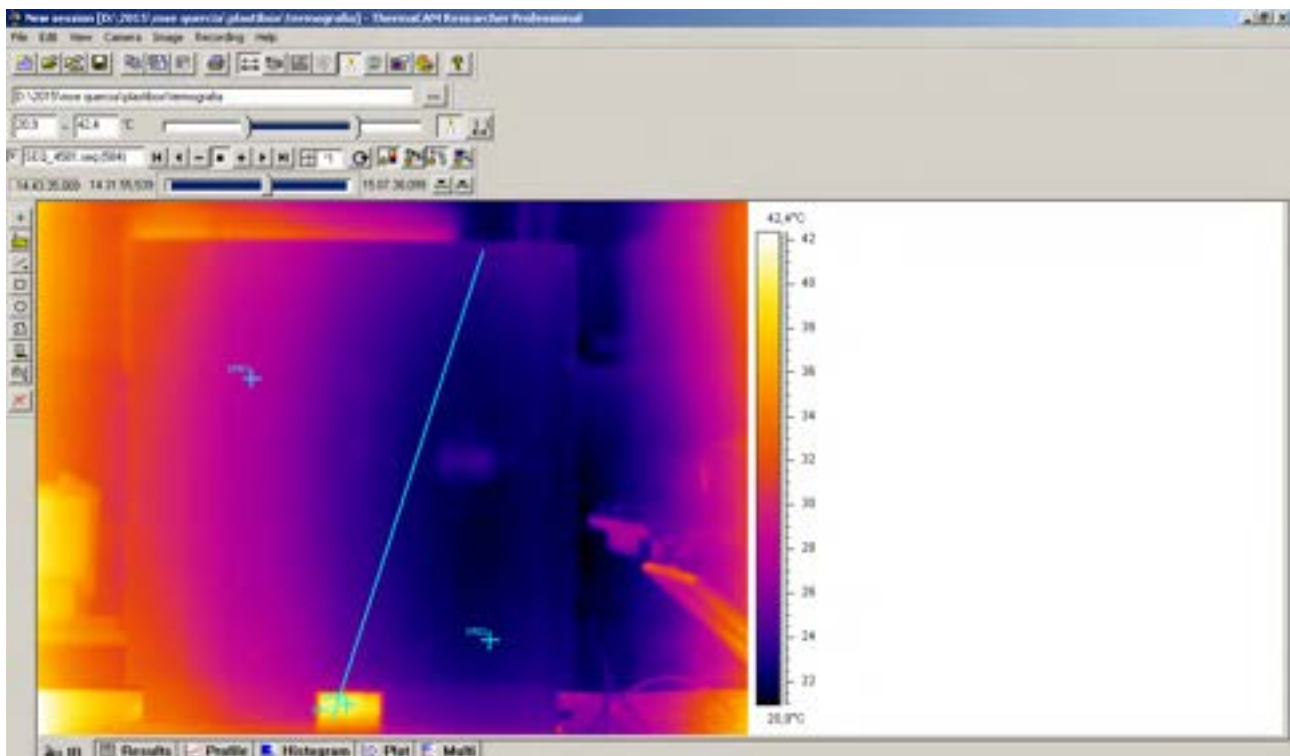


Figura 2.1.2.17: Esame Termografico della sorgente termica e sintesi grafica dei risultati.

Pannello B



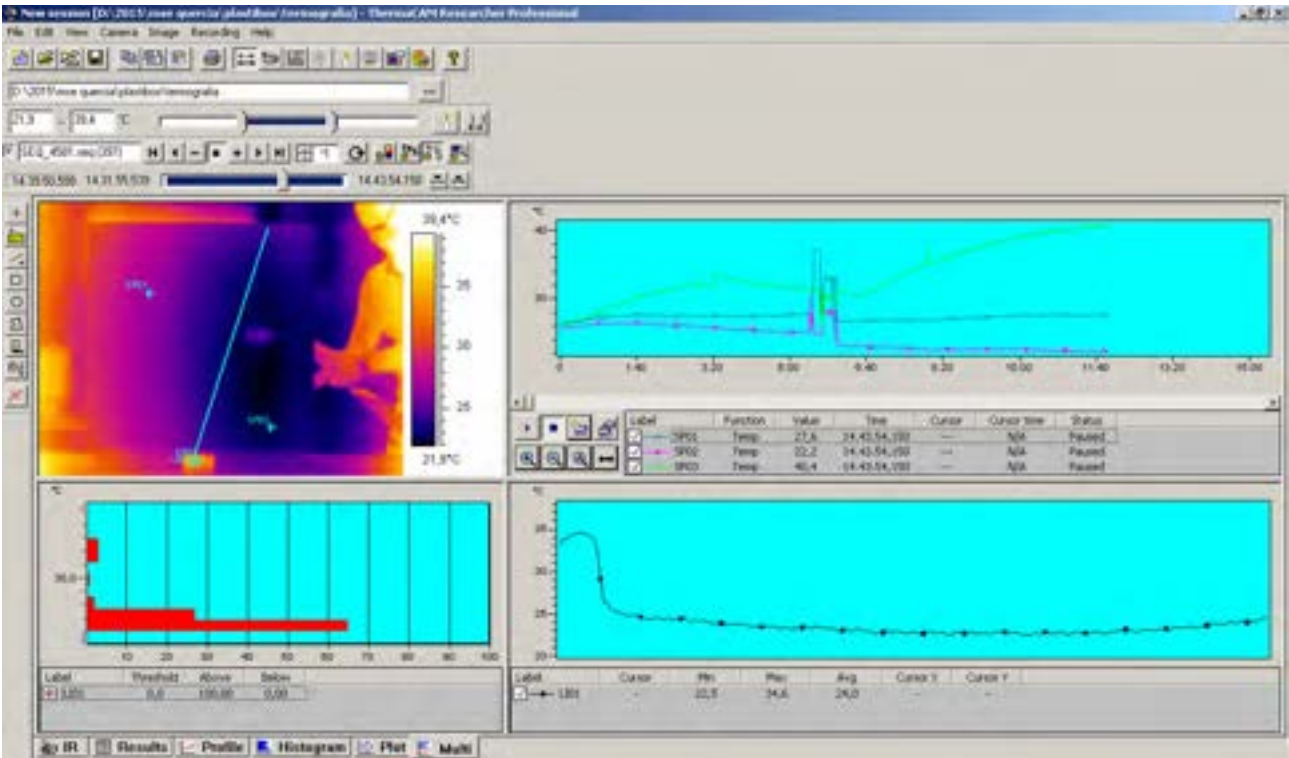


Figura 2.1.2.18: Esame Termografico del pannello B e sintesi grafica dei risultati.

Pannello C

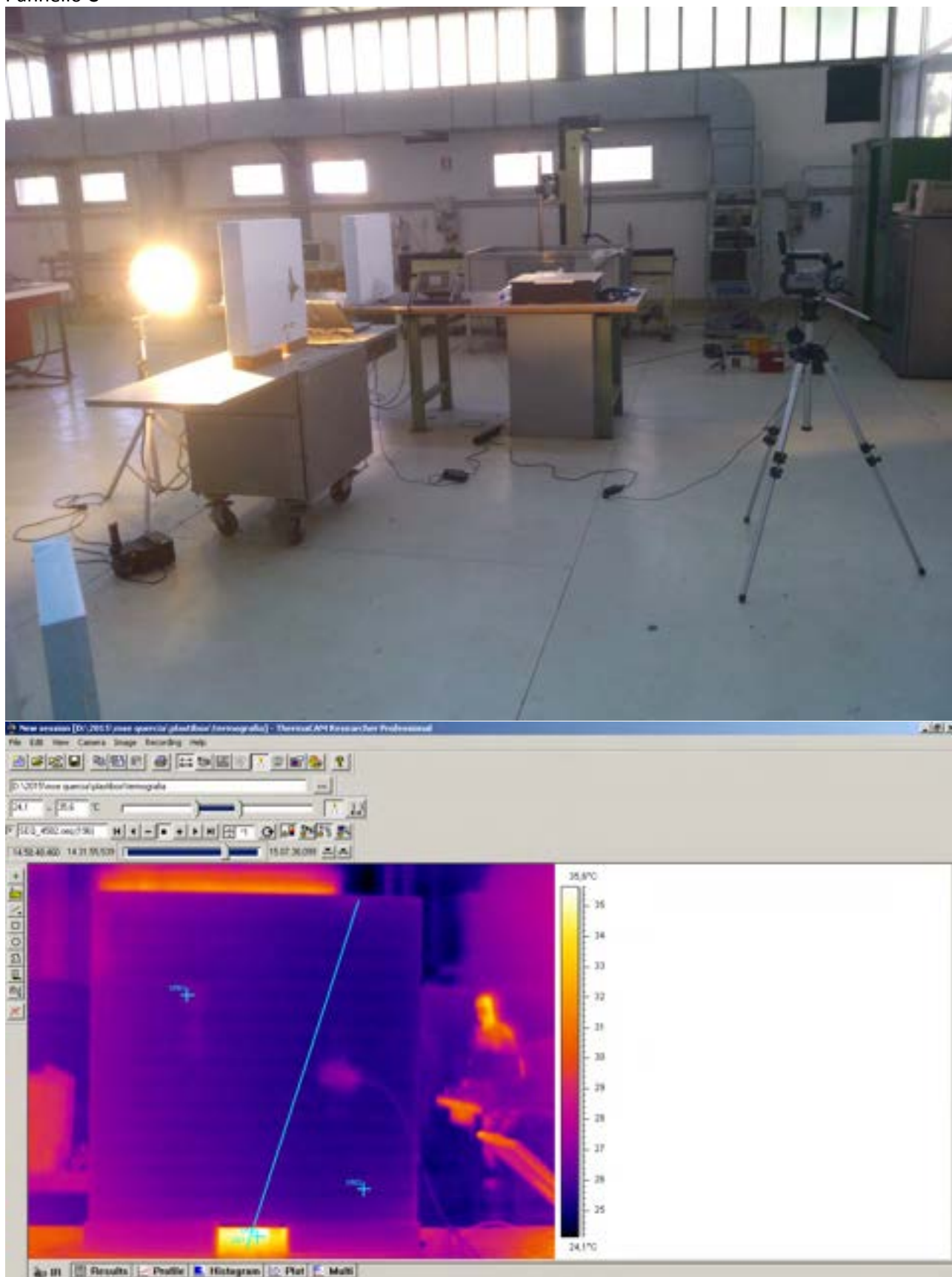


Figura 2.1.2.19: Esame Termografico del pannello C.

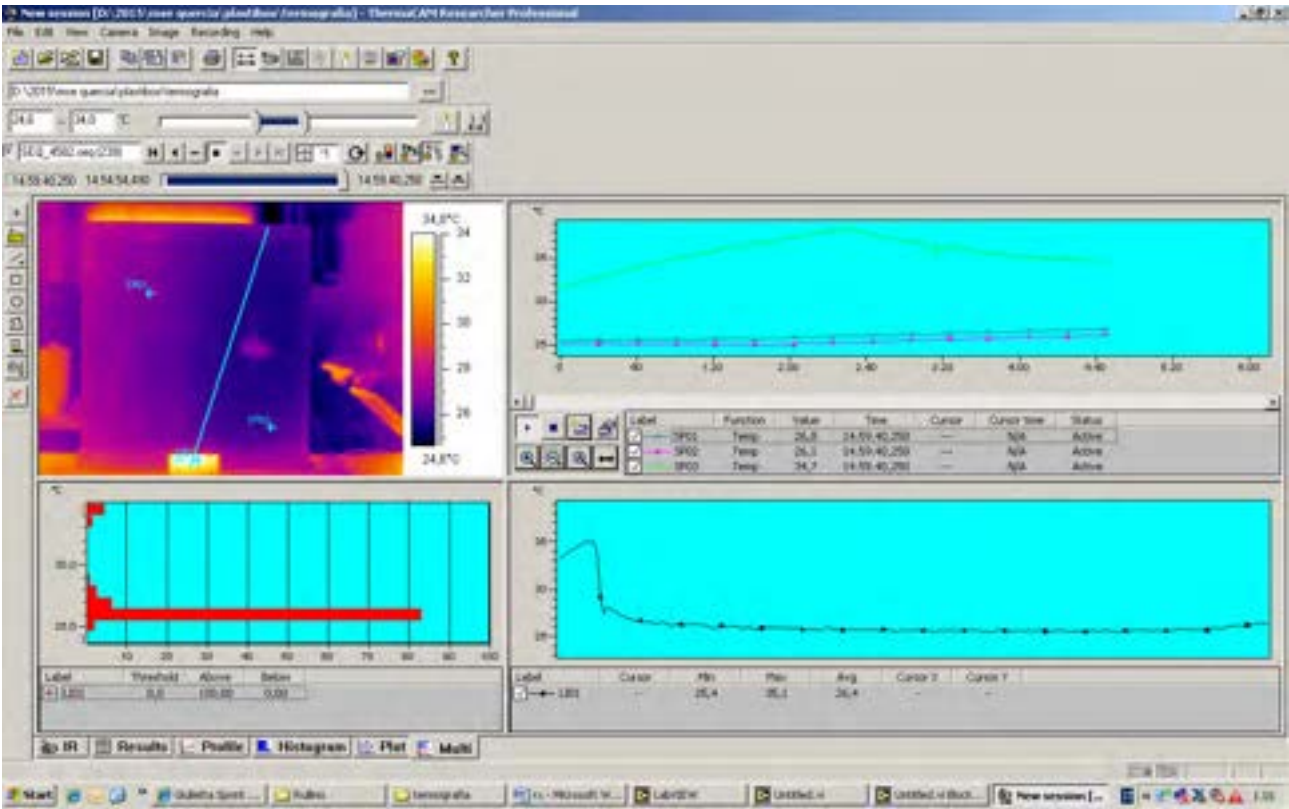
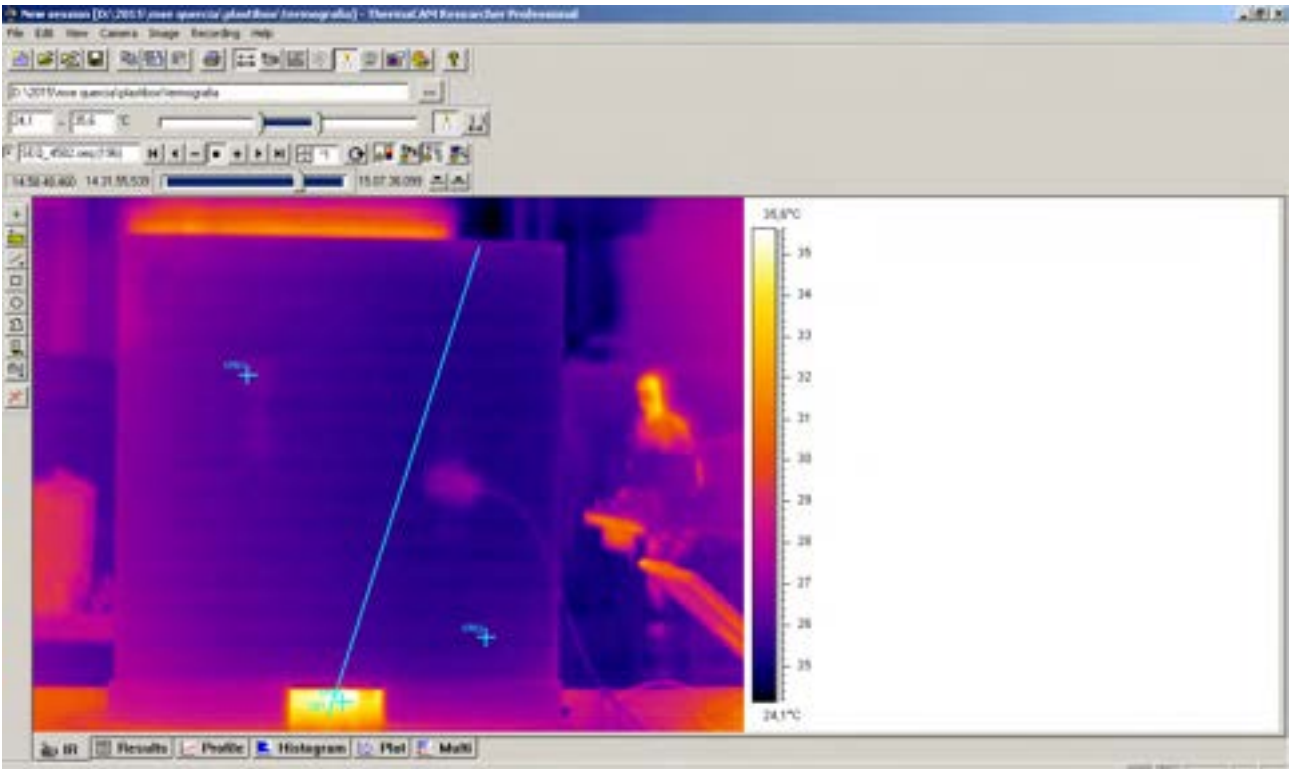


Figura 2.1.2.20: Esame Termografico del pannello C e sintesi grafica dei risultati.Pannello D



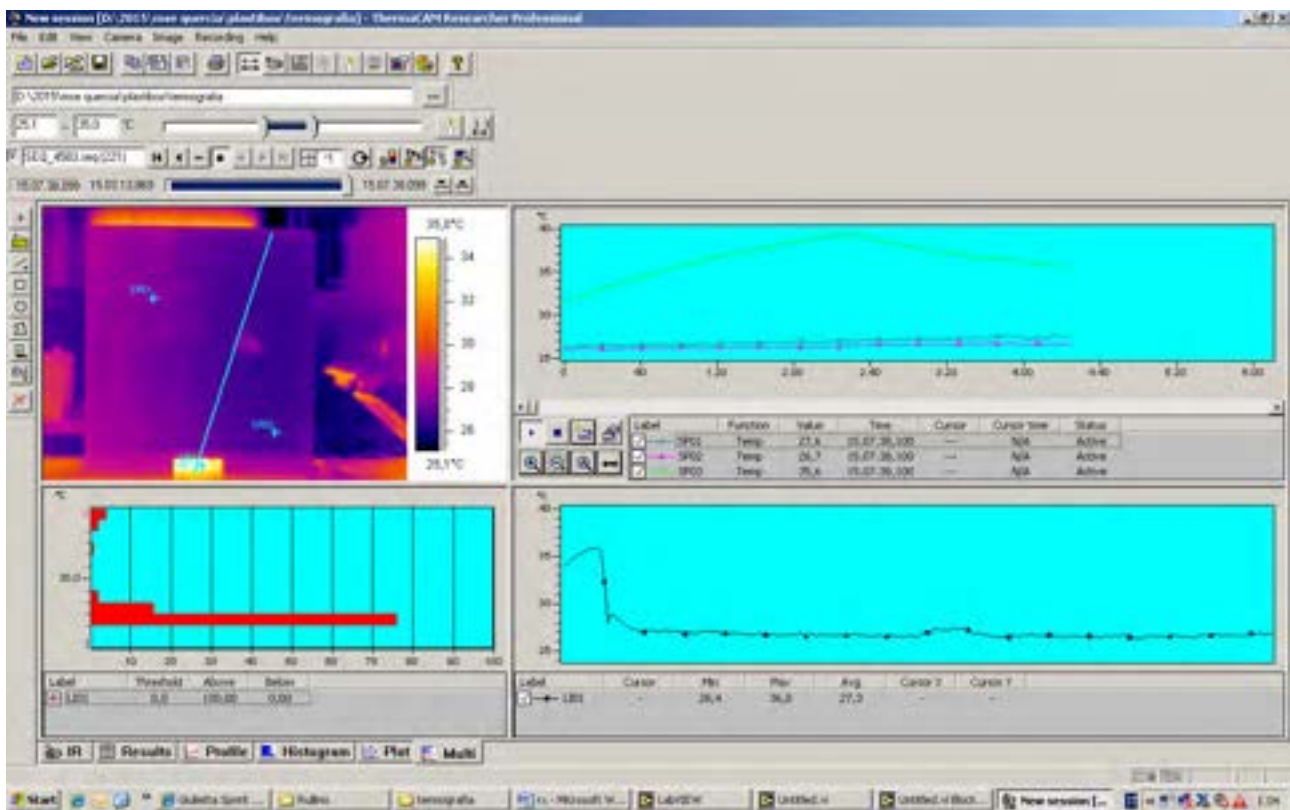


Figura 2.1.2.21: Esame Termografico del pannello D e sintesi grafica dei risultati.

Monitoraggio con Datalogger MSR451731 e MSR451732: Il monitoraggio, tramite datalogger, delle temperature e altre variabili microclimatiche è stato effettuato per tutta la durata delle prove termografiche sui 4 pannelli. I datalogger sono stati di volta in volta applicati ai pannelli e sottoposti al test termografico senza interrompere la misura.



La curva intorno ai 40° è divisa in 4 intervalli uno per ogni pannello, ogni intervallo è caratterizzato da:

- tratto in salita rappresenta l'accensione della lampada ed il riscaldamento della parete,
- massimo relativo per spegnimento della lampada
- tratto in discesa il raffreddamento della parete

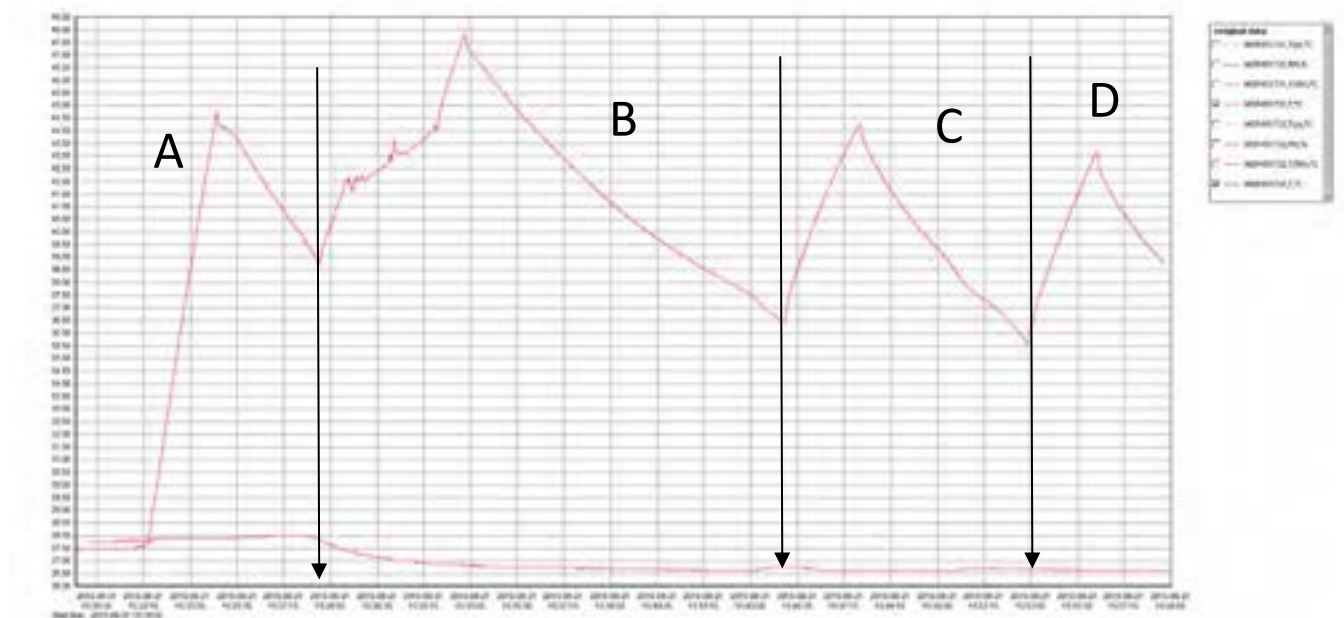


Figura 2.1.2.22: Monitoraggio della temperatura dei 4 prototipi di pannello in successione (A, B, C, D). I due DataLogger sono stati posizionati rispettivamente sul lato caldo (MSR451731) e sul lato freddo (MSR451732) di ogni pannello.

La curva in basso (26°-28°) rappresenta la parete fredda o il lato interno del pannello. E' evidente che il pannello A, tal quale, ha una temperatura maggiore dei restanti pannelli.

Conclusioni: Le prove non distruttive utilizzate hanno contribuito a evidenziare sia la struttura che la qualità dei pannelli.

In particolare la radiografia ha evidenziato la struttura interna del pannello nelle varie tipologie:

- A Tal quale
- B Tal Quale Rigato
- C con PCM nelle direzioni X e Y
- D con PCM nella direzione X

Il metodo può essere utilizzato in linea di produzione per verificare la struttura e i perni di fissaggio.

Gli esami ultrasonori non hanno evidenziato variazioni di velocità a dimostrare la buona qualità dei pannelli. Il metodo è utile per la verifica dell'incollaggio tra i componenti.

L'esame termografico evidenzia la differente trasmittanza dei pannelli senza e con PCM e può essere utilizzato in linea per evidenziare scollature dei pannelli.

2.2 PCM all'interno della cella frigorifero

La ricerca bibliografica sul campo della refrigerazione evidenzia come recentemente sia stato fatto molto lavoro non solo per applicare i materiali a cambiamento di fase nelle stratificazioni dei pannelli isolanti delle celle refrigerate [15-18] ma anche per realizzare scambiatori che lavorassero a supporto del gruppo refrigerante delle celle frigorifero [8-13]. In questo terzo anno di lavoro l'attività è stata focalizzata alla sperimentazione dell' utilizzo dei PCM in una cella frigorifero a supporto dell'evaporatore del gruppo refrigerante con l'obiettivo di aumentarne l'efficienza energetica e/o le prestazioni termiche.

Questa modalità di inserimento del PCM all'interno della cella frigorifero permette di utilizzare le celle esistenti. In collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche (UNIPM) è stato progettato, realizzato e verificato sperimentalmente un scambiatore modulare contenente PCM accoppiato all'aria in uscita dall'evaporatore del gruppo refrigerante. 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, acquisite da ENEA per le sperimentazioni dei precedenti PAR e tuttora presenti all'interno del laboratorio di UNIPM, è stata modificata nell'allestimento con lo scopo di alloggiare all'interno del vano refrigerato il materiale a passaggio di fase. Poiché la temperatura di fusione e solidificazione del PCM adottato deve essere compatibile con le temperature tipiche di funzionamento della cella stessa ($0^{\circ}\text{C} < T < 10^{\circ}\text{C}$), è stato scelto inizialmente il Rubitherm RT 5 HC. E' stato sviluppato un 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. E' stato quindi 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 rilevamento dati è stato composto anche da misuratori di energia elettrica per la contabilizzazione dei consumi nei vari assetti di lavoro della cella frigorifera.

Per verificare il contributo dell'applicazione del PCM è stata utilizzata una cella frigorifera, nella quale è stato installato lo scambiatore contenente PCM. La campagna sperimentale con la frutta è stata fatta caricando con lo stesso prodotto fresco (pesce) sia cella di riferimento (senza PCM) che la seconda cella con lo scambiatore contenente PCM opportunamente installato in serie all'evaporatore. Le celle sono state posizionate 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.

Le celle hanno dimensioni totali esterne: 140 cm x 140 cm x 220 cm (h), e forma e struttura sono evidenziate negli schemi seguenti (vedi Figura 2.2.1). 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/m^3). Le celle sono complete di pavimento carrabile ed è dotata di porta a tampone luce netta: 65 cm x 190 cm (lxh). Le celle sono termostate attraverso una macchina frigorifera ad espansione diretta installata a bordo delle celle. La macchina è del tipo monoblocco Temp 0/+8°C con rievaporazione dell'acqua automatica, potenza frigorifera 1140 W.

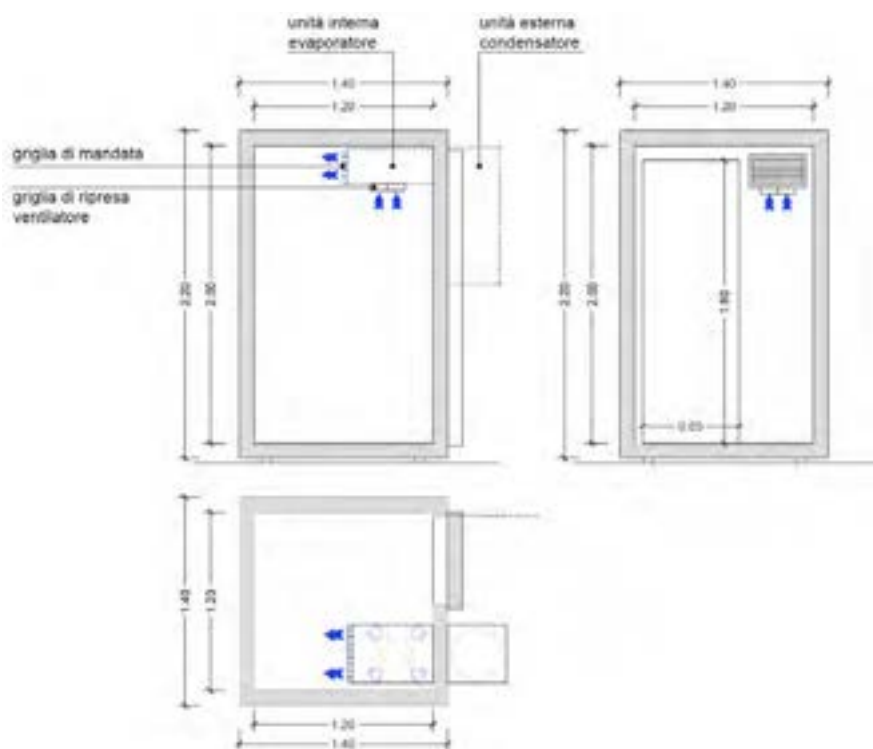


Figura 2.2.1: Pianta e sezioni della cella frigorifero di riferimento presso UNIPM.

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.

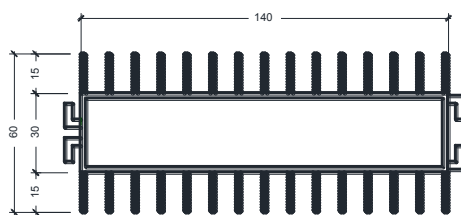


Figura 2.2.2: Sezione del profilo metallico (alluminio) con cui sono stati realizzati i contenitori.



Figura 2.2.3: Fotografia di uno dei tre moduli con i due 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.

L'aria circola attraverso il canale sia con l'utilizzo del ventilatore già presente nell'unità interna della macchina frigorifera, che con l'ausilio di ventole ausiliarie installate nella sezione di uscita per favorire lo scambio d'aria anche quando la macchina frigorifera è spenta.

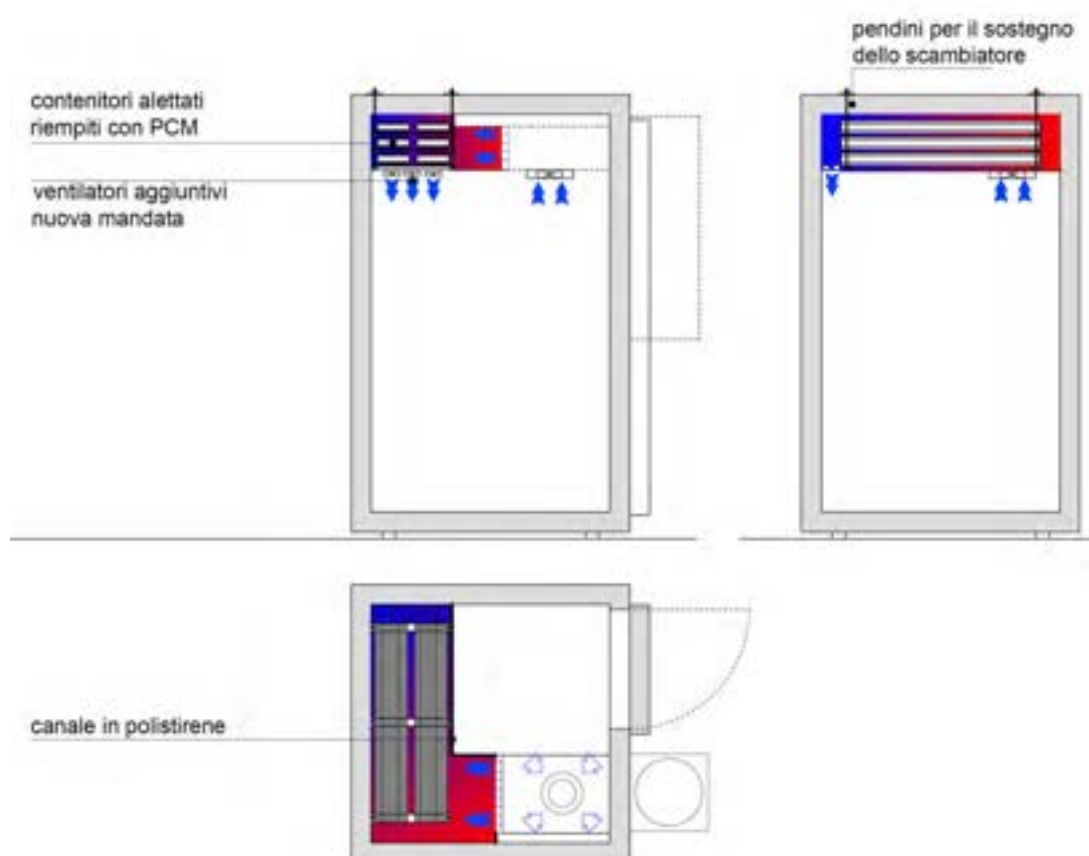


Figura 2.2.4: Pianta e sezioni della cella frigorifera presso UNIPM modificata per alloggiare lo scambiatore contenente PCM.



Figura 2.2.5: 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.

2.2.1 Caratterizzazione termica ed energetica celle frigorifero cariche

Le caratteristiche della cella frigorifero allestita nei precedenti PAR2012-2014 presso il laboratorio ENEA sono simili a quelle delle due celle gemelle presso UNIPM a parte il minore spessore dell'involucro e le diverse dimensioni che in questo caso sono state scelte per simulare in scala le condizioni interne ad un reefer. Le caratteristiche sono le seguenti:

- volume utile: 4000l ($\sim 4 \text{ m}^3$)
- dimensioni interne 200x163x123 cm (LxHxP)
- impianto frigorifero costituito da un parte esterna alla camera con un motore compressore ermetico alimentato a 220V da 0.5HP e da un'unità evaporatore all'interno in rame/alluminio con ventola di diffusione da 30cm, range di temperatura: 0/+8°C con una resa di 1150W a 32°C
- quadro comando a microprocessore con timer, termostato e termometro digitale con connessione seriale per data logger
- rievaporazione dell'acqua di sbrinamento e condensa automatica
- illuminazione interna
- pareti formate da pannelli in lamiera plastificata bianca atossica con uno spessore di 60mm con isolamento di schiuma poliuretanica iniettata con densità 38 Kg/m^3 con una trasmittanza termica $K=0.336 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ e provvista di due 2 sportelli a tampone con luce netta di 61x80h cm per l'accesso.



Figura 2.2.1.1: cella Misa laboratorio Casaccia allestita per il monitoraggio automatico dello spazio di testa dei prodotti ortofrutticoli stoccati. L'involucro ha lo spessore di 6cm, ha due porte e le dimensioni sono diverse dalle celle presso UNIPM per simulare i volumi dei reefer in scala.

Un misuratore di potenza ed energia, Efergy E2 Classic, è stato implementato sulla cella Misa) per monitorare i consumi elettrici nelle varie condizioni di funzionamento durante le campagne sperimentali sui diversi tipi di frutta (vedi Report RdS/PAR2014/036). Le celle refrigerate usate per la sperimentazione, sia in Casaccia che ad Ancona, sono dotate dello stesso gruppo refrigerante, con potenza di circa 1.14 KW, che consente di impostare la temperatura di funzionamento tra 0 e 8°C. La temperatura è regolata solo accendendo il compressore non appena la temperatura misurata nel vano interno vicino all'evaporatore supera di un valore prefissato la temperatura impostata, per poi spegnerlo al raggiungimento del valore prefissato. Le differenze tra i consumi riportati in Tabella 2.2.1.1 sono quindi sostanzialmente legate al diverso "duty cycle" del gruppo refrigerante necessario caso per caso.

Tabella 2.2.1.1: Consumo giornaliero della cella Misa con diverse temperature impostate.

Tset (°C)	Consumo medio in 24h (KWh)	Risparmio (%)
0	14,64	
3	12,48	14,7
5	8,74	30,0
8	6,24	28,6

La Tabella 2.2.1.1 sintetizza quanto osservato sull'influenza che le diverse impostazioni della temperatura sul controllore del gruppo refrigerante avevano in termini di consumo energetico della cella. Naturalmente le diverse impostazioni usate per il gruppo refrigerante della cella nel corso delle varie campagne sperimentali su diversi tipi di frutta implicavano differenze nell'evoluzione temporale dello stato di conservazione della frutta stoccata. In generale anche di 4 o 5 °C comportano notevoli differenze non solo nell'evoluzione dello spazio di testa della frutta ma anche notevoli differenze nella shelf life del prodotto conservato. Di seguito sono riassunte le condizioni sperimentali utilizzate per le varie campagne su susine, pere e fragole in cui sono state monitorate sia la cella MISA che quella Angelantoni, entrambe cariche della stessa frutta ma impostate con temperature differenti. Sono riportati poi i valori della temperatura ed umidità relativa misurati con i nostri nodi sensoriali, non calibrati a questo scopo ma per monitorare proprio l'evoluzione dello spazio di testa della frutta. I sensori di temperatura per quanto non calibrati hanno comunque mostrato che le temperature viste dalla frutta tendono a smorzare le variazioni della temperatura dell'aria nei vari punti della cella MISA, risentono invece di eventuali black-out del gruppo refrigerante ed in ogni caso delle temperature impostate per il gruppo refrigerante quando variano anche di qualche grado.

Campagna susine: La cella refrigerata MISA da 4m3 è stata divisa con un setto non ermetico per ottenere due zone termicamente ben definite, una dal lato del gruppo refrigerante impostato a 5°C caricata con le susine circa al 80% del volume disponibile, l'altra caratterizzata da una temperatura di circa 10°C in cui abbiamo posizionato barattoli dal volume di circa 3 litri contenenti susine. La cella refrigerata Angelantoni con temperatura impostata a 15°C è stata caricata di susine nello stesso rapporto volumetrico e conteneva anche un contenitore di 3 litri con le susine. Sono stati poi utilizzati 3 nodi sensoriali diversamente configurati. Il primo nodo sensoriale ha monitorato lo spazio di testa delle susine nel contenitore a 15°C funzionando durante tutta la campagna con la sola carica della batteria, inviando i dati con frequenza oraria e preriscaldando i sensori a ossidi metallici per 30 secondi. Gli altri due nodi sensoriali completi sono stati posti entrambi nel contenitore con le susine a 10°C, ma configurati diversamente, uno come il precedente, l'altro alimentato anche con cavo per mantenere i sensori sempre caldi.

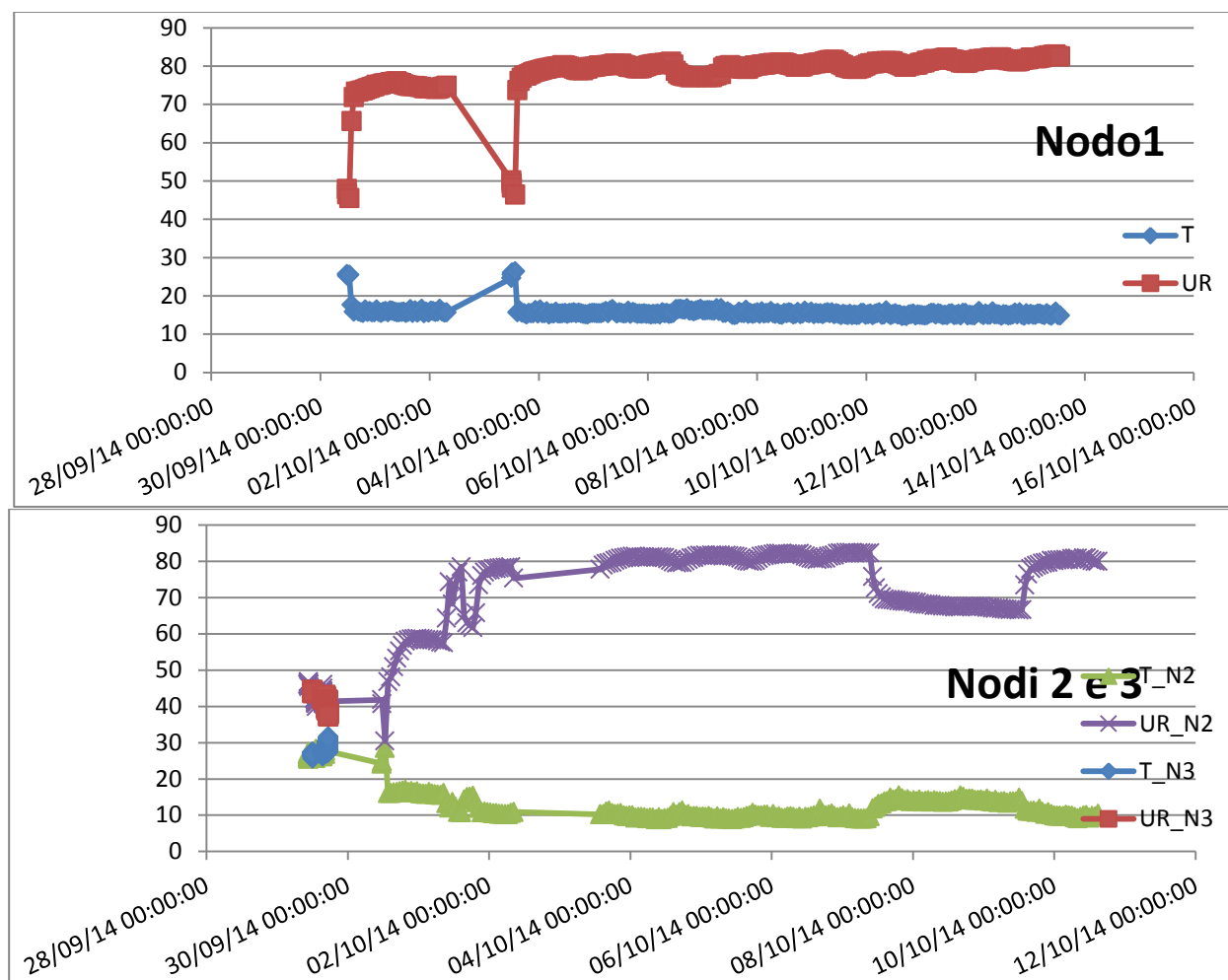


Figura 2.2.1.2: Storie termiche registrate nelle celle refrigerate Angelantoni (nodo 1) e MISA (nodi 2 e 3) dai nodi sensoriali utilizzati nella campagna sperimentale con le susine.

Campagna pere: In questa campagna sono stati eliminati i contenitori per definire lo spazio di testa lasciando quindi tutte le pere libere nelle tre zone termiche delle due celle refrigerate, mentre in laboratorio è stata utilizzata solo una leggera copertura in cellophane per “delimitare” lo spazio di testa. I nodi sensoriali, configurati come quelli ottimizzati energeticamente nella campagna precedente, sono stati 4, il primo posizionato sulle pere a 5°C, il secondo nella zona a 11°C, il terzo nella camera Angelantoni a 15°C ed infine l’ultimo posizionato sulle pere mantenute a temperatura ambiente in laboratorio.

Campagna fragole: La sperimentazione con le fragole è stata condotta tenendo conto di quanto appreso nelle campagne precedenti: le fragole sono state quindi distribuite solo nelle due camere refrigerate, Misa e Angelantoni, rispettivamente tenute alla temperatura di 5°C e 10°C; tutti i nodi sensoriali utilizzati erano configurati per il campionamento a frequenza oraria ed ottimizzando il consumo energetico; sono stati utilizzati 4 nodi sensoriali per ogni temperatura.

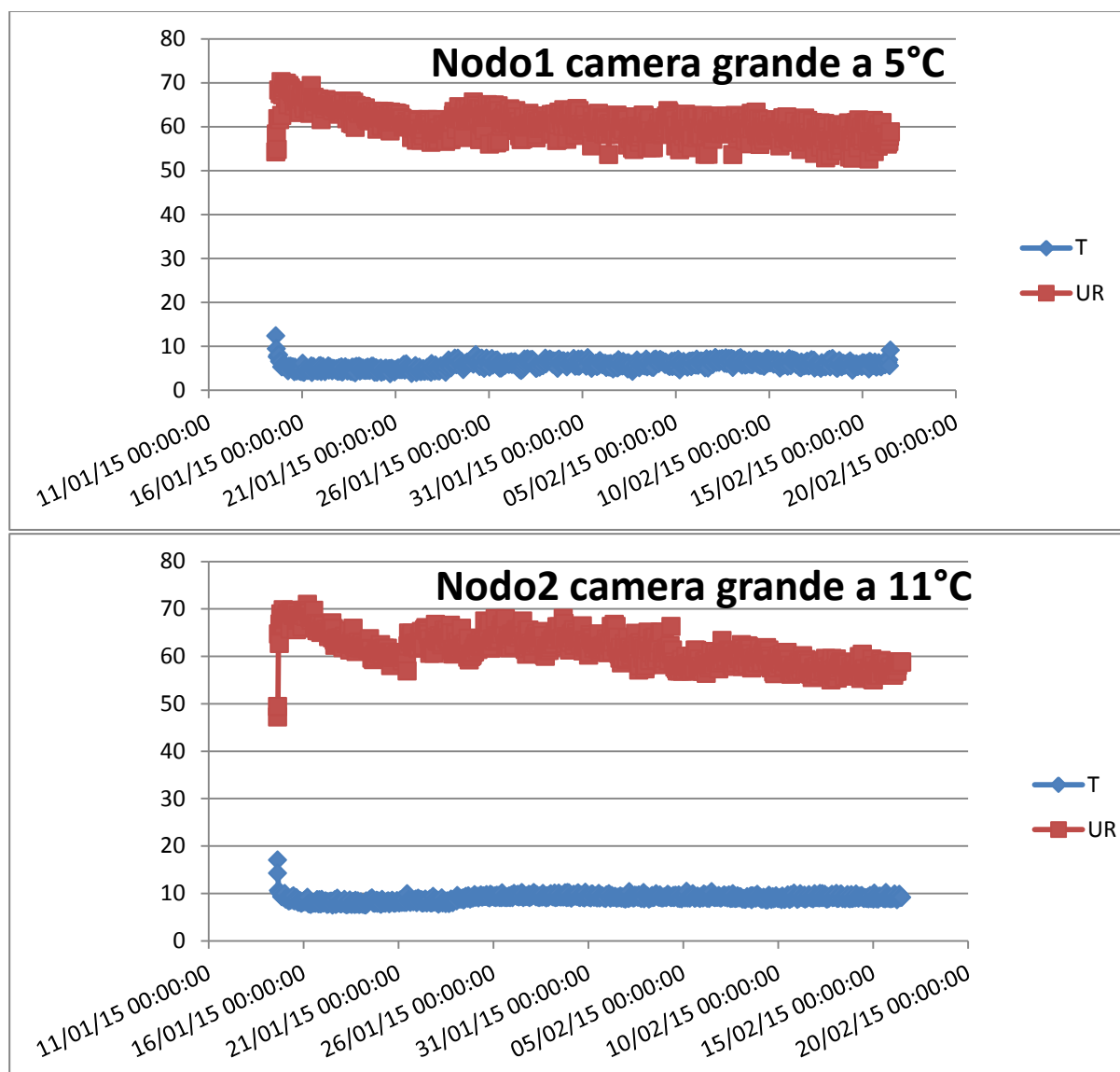


Figura 2.2.1.3: Storie termiche registrate, nella cella refrigerata MISA nella zona a diretto contatto dell'evaporatore(nodo 1) e nella zona separata dal setto (nodi 2 e 3), dai nodi sensoriali utilizzati nella campagna sperimentale con le pere.

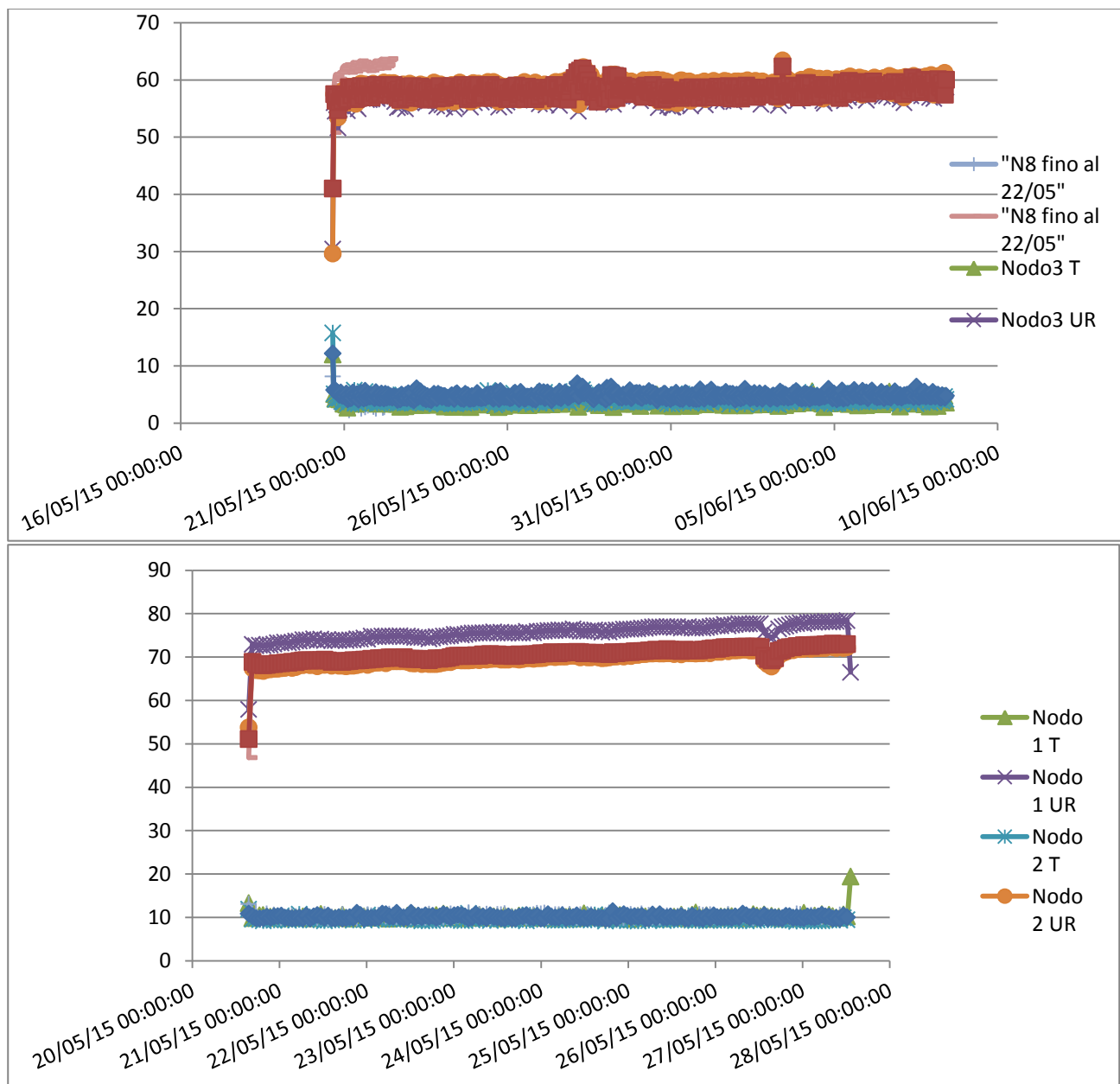


Figura 2.2.1.4: Storie termiche registrate nelle celle refrigerate Angelantoni (nodi 1 e 2) e MISA (nodi 3 e 8)dai nodi sensoriali utilizzati nella campagna sperimentale con le fragole.

2.2.2 Confronto cella con PCM e cella di riferimento nel corso di una campagna sperimentale

Per verificare le prestazioni e i benefici offerti dall'introduzione di PCM all'interno delle celle frigorifere in condizioni di carico reali è stata realizzata una campagna sperimentale caricando le due celle presso UNPM con circa 170 kg di pesche noce ciascuna. Le due celle sono uguali a parte il fatto che in una (quella a sinistra nella Figura 2.2.2.1) è stato inserito lo scambiatore contenente PCM (vedi Figure 2.2.3 e 2.2.5). E' stato possibile effettuare una campagna sperimentale, simulando anche lo stoccaggio o il trasporto di frutta come nella campagne già realizzate presso il laboratorio ENEA (vedi paragrafo 2.2.1), per confrontare direttamente le prestazioni termiche ed energetiche delle due celle. Le due celle sono state equipaggiate anche con quattro nodi sensoriali, due per parte, sviluppati per monitorare lo spazio di testa dei prodotti alimentari freschi nelle celle frigorifero. I due gruppi refrigeranti delle celle frigo possono essere controllati solo impostando la temperatura desiderata (T_{set}) nel controllore elettronico (IWC 740-750) e l'incremento accettato (ΔT_{set}) prima che si accenda il compressore. Il controllore misura la temperatura internamente alla cella nel blocco dell'evaporatore ed è questa temperatura che quindi determina accensione e i tempi di spegnimento del gruppo refrigerante e quindi i consumi energetici della cella. Il completo sistema di monitoraggio termico ed energetico delle due celle consente di confrontarne le prestazioni, mentre i nodi sensoriali consentono di impostare i controllori dei gruppi refrigeranti per ottimizzare il funzionamento dello scambiatore con PCM pur mantenendo la conservazione delle pesche simile nelle due celle.



Figura 2.2.2.1: Laboratorio UNPM con cella di riferimento e cella dotata di PCM durante la campagna sperimentale con pesche noce.

Per l'acquisizione, la conversione e la memorizzazione delle grandezze sono stati utilizzati degli acquisitori DATATAKER DT 500 (vedi Figura 2.2.2.4). 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. 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 2.2.2.2).



Figura 2.2.2.2: 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 (vedi Figura 2.2.2.3):

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



Figura 2.2.2.3: Misuratori di potenza ed energia elettrica: (a) Efergy E2 Classic, (b) Christ Elektronik CAC 140.



Figura 2.2.2.4: Sistema di monitoraggio termico ed energetico delle due celle presso UNIPM

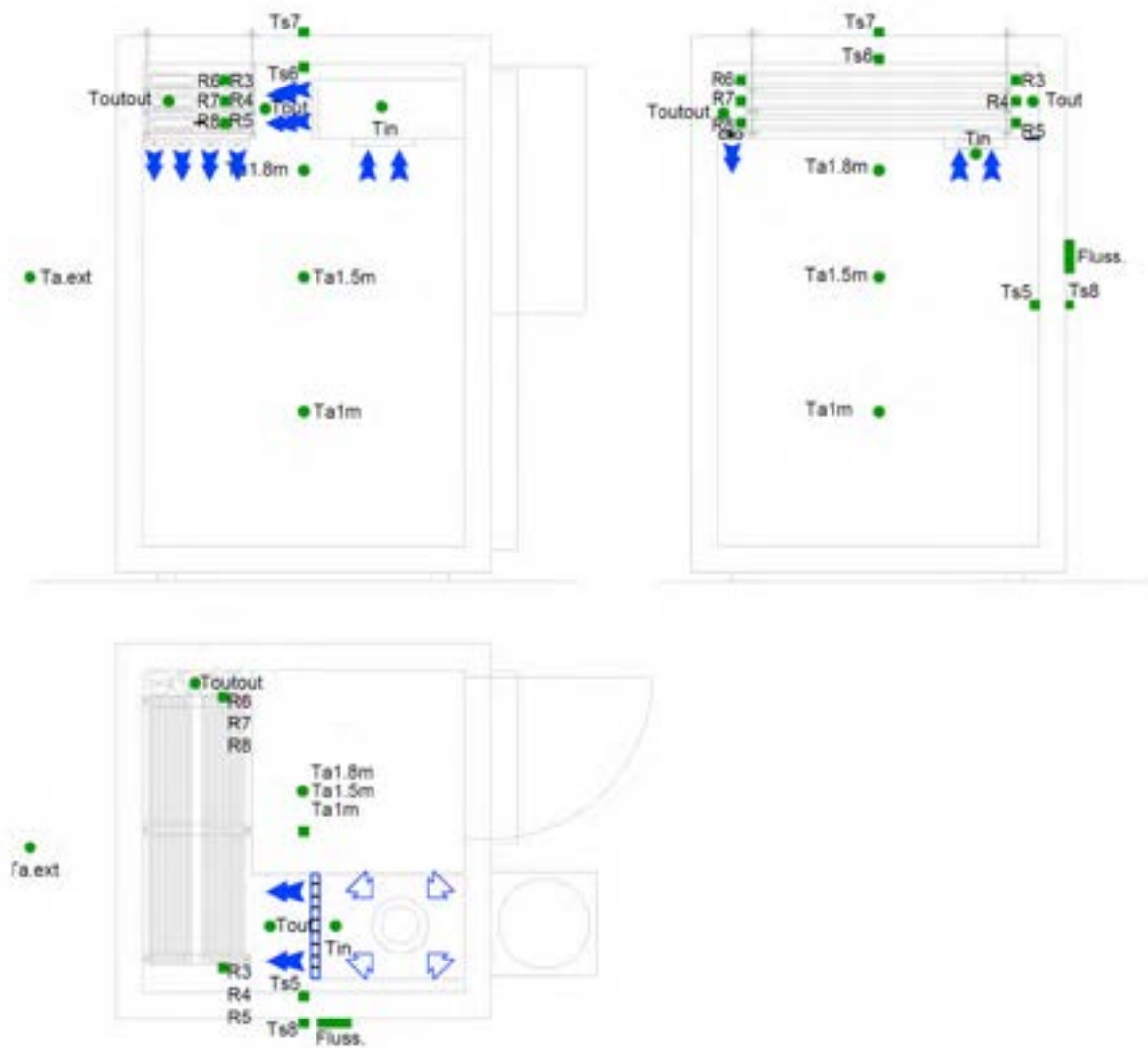


Figura 2.2.2.5: Posizionamento dei sensori di temperatura nelle due celle presso UNIPM

Per la taratura delle termoresistenze Pt100 è stato utilizzato il FLUKE CALIBRATION 7102 Micro-Bath. Il processo di taratura prevede vari passi: 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 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. Durante la campagna sperimentale con le pesche sono state utilizzate solo alcune termoresistenze e nessuno dei misuratori di flusso. Le

termoresistenze di maggiore interesse sono quelle usate per misurare la temperatura dell'aria a tre diverse altezze (nei grafici seguenti viene riportata solo la media delle temperature misurate a tre diverse altezze dal pavimento: 1m, 1.5m, 1.8m) e quelle (R3, R4, R5) posizionate sullo scambiatore di calore con il PCM proprio di fronte all'evaporatore. Sono state aggiunte poi due termoresistenze, una per ogni cella, per confrontare la temperatura vista dalle pesche. Le due termoresistenze sono state immerse in due contenitori pieni d'acqua posti nelle due celle in sostituzione di un paio di pesche, di cui simulavano anche il volume. E' stata quindi monitorata la temperatura dell'acqua per evitare problemi di inaffidabilità nella misura diretta della temperatura delle pesche.

Tabella 2.2.2.1: Legenda 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

Nel corso di queste due settimane di sperimentazione si sono cercate le condizioni di funzionamento per le due celle frigorifero che da un lato mantenessero paragonabili i prodotti tempo-temperatura, dall'altro consentissero di valutare le prestazioni energetiche complessive e termiche, nei vari punti di interesse delle celle frigorifero, al variare delle temperature impostate rispettivamente sui due controllori dei gruppi refrigeranti. I risultati sono stati estremamente interessanti, infatti i due carichi di frutta non hanno mostrato alcuna apprezzabile differenza sia alla fine della campagna che durante. Il 31 agosto 70 cassette di pesche noce (vedi Figura 2.2.2.6), per un totale di circa 340 kg, sono state caricate nella cella di riferimento impostando la temperatura del gruppo refrigerante a 5°C per mantenere il carico nelle stesse condizioni di

partenza intanto che veniva allestita la cella gemella con lo scambiatore contenente PCM. La temperatura di arrivo delle pesche era di circa 13°C. In una delle due celle (a sinistra nella Figura 2.2.1) è stato montato lo scambiatore con il PCM completo di carter in polistirene e ventole ausiliarie per forzare il flusso d'aria raffreddata dall'evaporatore a scambiare calore con i moduli contenenti PCM. Le ventole venivano tenute sempre in funzione, ma il consumo di energia elettrica era di circa 60W.



Figura 2.2.2.6: Pesche noce utilizzate per la campagna sperimentale presso UNIPM.

A questo punto il carico di pesche è stato equamente distribuito nelle due celle completandone l'allestimento con il sistema di monitoraggio termico ed energetico descritto precedentemente. Sono stati anche inseriti due nodi sensoriali per cella per monitorare lo spazio di testa dei due carichi di pesca e valutarne l'evoluzione nel tempo. Questo era un aspetto critico della campagna che aveva l'obiettivo di determinare le condizioni di funzionamento delle due celle che mantenendo l'evoluzione dello stato di conservazione dei due carichi di pesche equivalente potesse evidenziare gli effetti dello scambiatore con il PCM nelle performance energetiche e qualitative delle celle.



Figura 2.2.2.7: Pesche noce distribuite nelle due celle (con PCM a sinistra, cella di riferimento al centro), nella seconda fila di cassette dall'alto sono state sostituite alcune pesche con due nodi sensoriali per cella (vedi Figura a destra) ed un contenitore con una termoresistenza immersa nell'acqua per monitorare la temperatura delle pesche.

Una prima analisi dei risultati ottenuti nelle prove (vedi RdS/2014/0039) già effettuate da UNIPM e delle campagne sperimentali fatte presso ENEA (vedi paragrafo 2.2.1) ha suggerito inizialmente di impostare la temperatura della cella di riferimento a 3°C ($T_{set}=3^{\circ}\text{C}$) e quella della cella con PCM a 5°C ($T_{set}=5^{\circ}\text{C}$).

Le prove sperimentali già effettuate presso UNIPM riguardanti l'integrazione del PCM all'interno della cella frigorifera per verificarne l'effetto sul comportamento termodinamico della stessa prevedevano 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.

Le prove sui consumi energetici effettuate presso ENEA (vedi paragrafo precedente) nelle varie campagne sperimentali suggerivano la possibilità di ottenere una significativa diminuzione dei consumi energetici della cella aumentando anche solo di un paio di gradi la temperatura impostata. La stabilizzazione della temperatura all'interno della cella con lo scambiatore avrebbe potuto mantenere la frutta in condizioni simili pur impostando la temperatura del gruppo refrigerante un paio di gradi più alta. Come si può chiaramente notare dalla Figura 2.2.2.8 la temperatura media dell'aria nella cella di riferimento oscilla intorno ad un valor medio di 2°C quando $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ mentre nella cella con lo scambiatore la temperatura media dell'aria oscilla proprio intorno alla temperatura impostata $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$, le oscillazioni sono più ampie (circa 1°C invece di 0.5°C) ma con frequenza decisamente minore (circa un terzo in questo caso). La Figura 2.2.2.10 mostra che la temperatura delle pesche in queste condizioni è troppo diversa nelle due celle (meno di 2°C nella cella di riferimento e 4.5°C con piccole oscillazioni nella cella con lo scambiatore).

In queste condizioni le pesche avrebbero una storia termica troppo diversa con effetti negativi sulla rispettiva shelf life, per cui dopo qualche ora, raggiunte le condizioni stazionarie, vengono invertite le temperature impostate sui gruppi refrigeranti. Va notato comunque che la presenza dello scambiatore comporta comunque alcuni vantaggi dal punto di vista del prodotto refrigerato, la temperatura delle pesche è infatti sempre molto più vicina a quella impostata per il gruppo refrigerante, inoltre le temperature dell'aria a diversa altezza nella cella variano di meno di quanto non avvenga per la cella di riferimento.

La Figura 2.2.2.8 mostra il confronto nella temperatura media dell'aria tra le due celle nel corso di circa 24h in cui sono state invertite le impostazioni di temperatura dei due gruppi refrigeranti. Nella fase di transizione dovuta al cambio di impostazione delle temperature dei gruppi refrigeranti si notano sulla temperatura dell'aria anche le aperture delle porte effettuate per operazioni di servizio. Una volta raggiunto il nuovo stato stazionario (vedi Figura 2.2.2.9) viene confermato il raggiungimento per la temperatura media dell'aria nella cella col PCM di un valore molto vicino a quello impostato ($2.8\pm 0.7^{\circ}\text{C}$) mentre la cella di riferimento si porta ad un valore sempre più basso ($4\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) con oscillazioni di minore ampiezza ma frequenza quasi doppia. E' interessante notare come la temperatura delle pesche in condizioni stazionarie (vedi Figura 2.2.2.11) tende a 3.8°C nella cella di riferimento e 2.4°C in quella col PCM, ma nonostante questo il consumo elettrico della cella col PCM è ancora leggermente superiore a quello della cella di riferimento (vedi Figura 2.2.2.15) proprio per la maggior frequenza dei cicli di accensione del gruppo refrigerante.

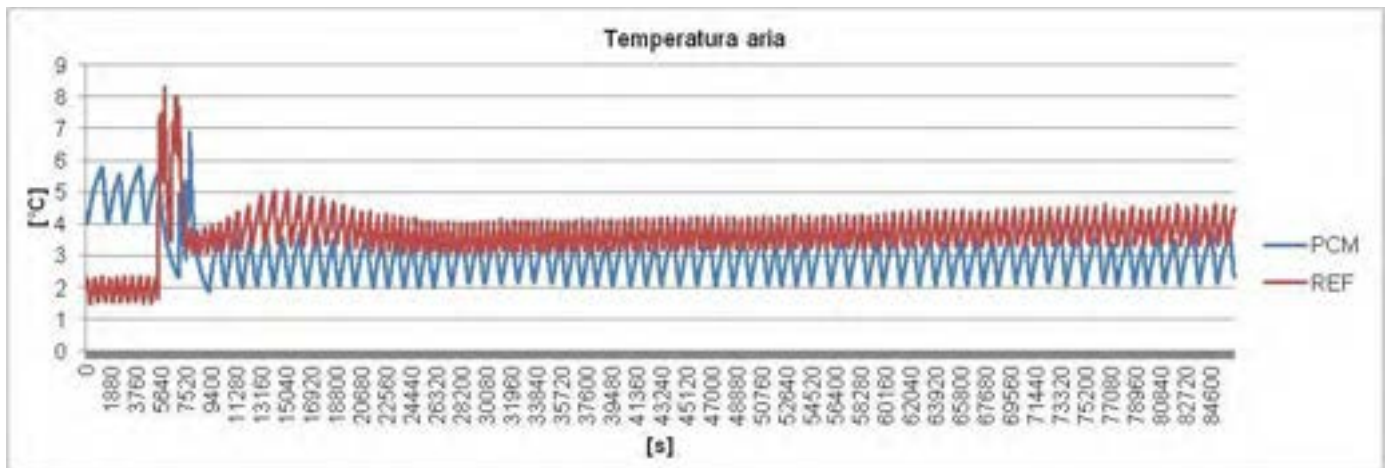


Figura 2.2.2.8: Confronto temperature media (vedi paragrafo 2.2) dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) inizialmente impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) inizialmente impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$.

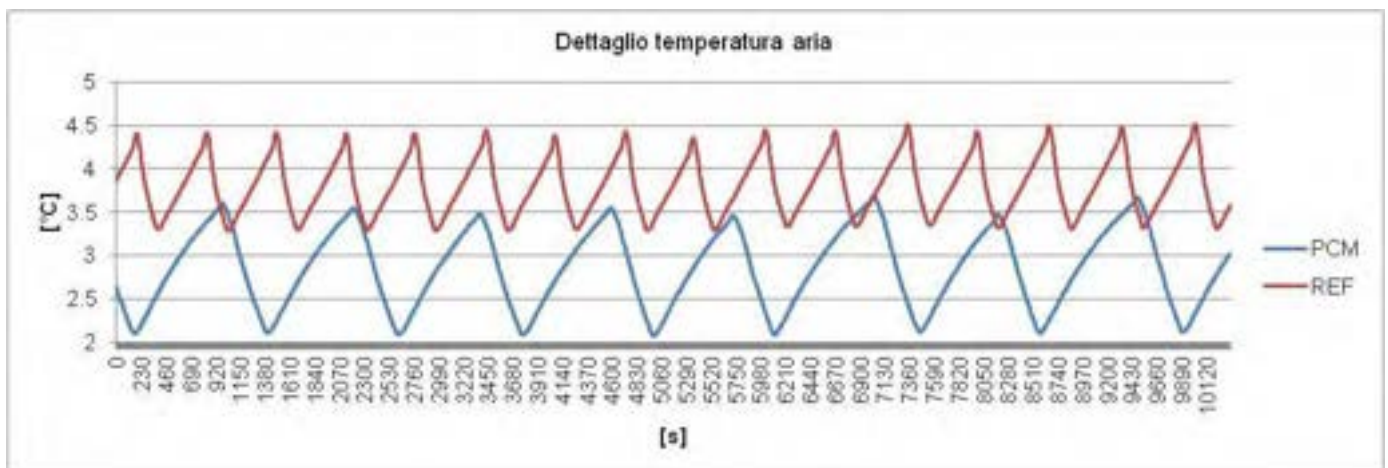


Figura 2.2.2.9: Confronto temperature media (vedi paragrafo 2.2) dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ oscilla intorno ai 4°C . La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ oscilla intorno a 2.8°C .

Le Figure 2.2.2.12 e 2.2.2.13 che mostrano le temperature medie della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore sono indice del fatto che, con queste impostazioni delle temperature del gruppo refrigerante, il PCM dello scambiatore non lavora in modo ottimale. Queste temperature infatti oscillano intorno a 3°C con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ e addirittura a 1°C con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$. Tenuto conto che il PCM utilizzato nello scambiatore è il RubiTherm RT35HC che ha una distribuzione della frazione che si fonde molto piccata intorno ai 6°C mentre la frazione che si solidifica è piccata intorno ai 5°C .

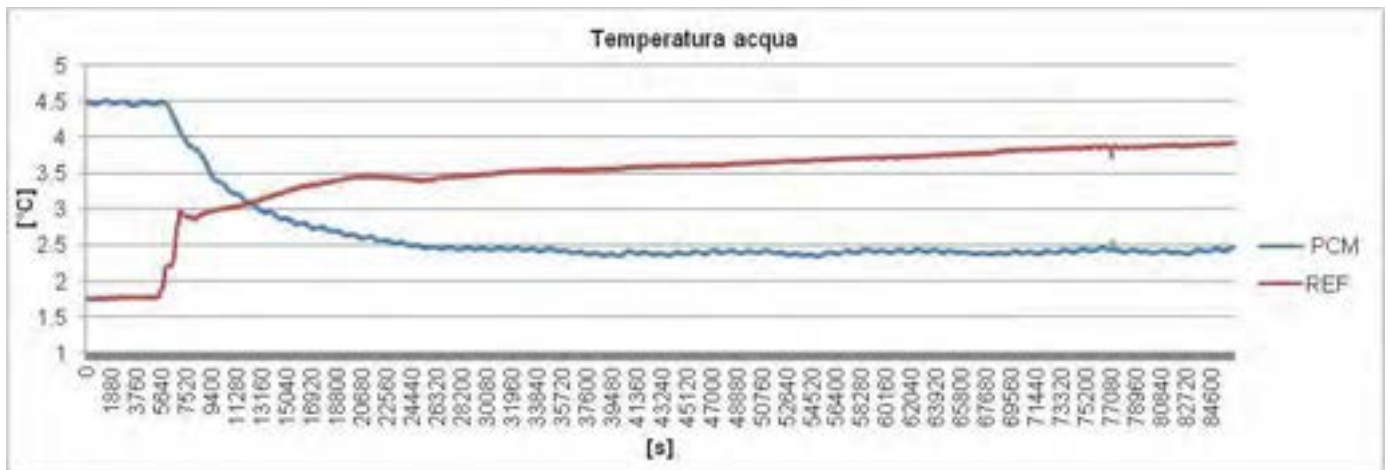


Figura 2.2.2.10: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) inizialmente impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) inizialmente impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$.

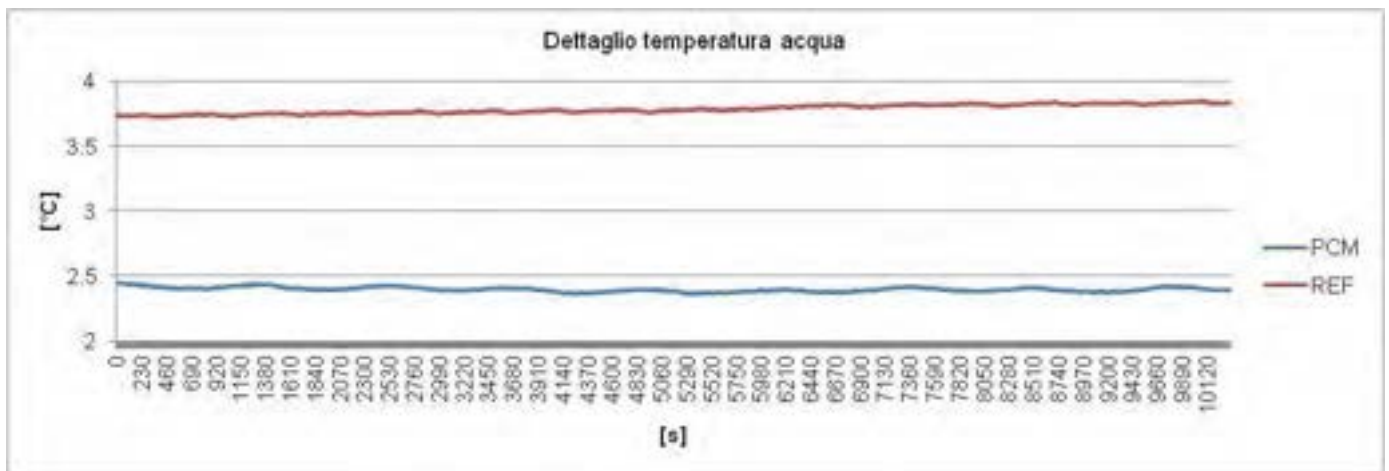


Figura 2.2.2.11: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ tende verso 3.8°C . La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ verso 2.4°C .

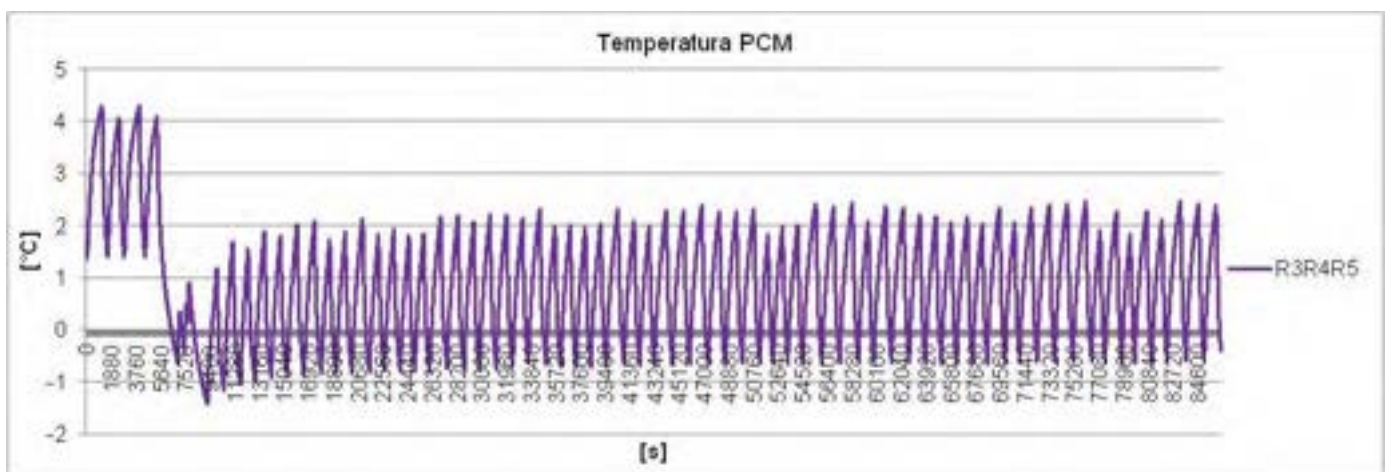


Figura 2.2.2.12: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) inizialmente impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$.

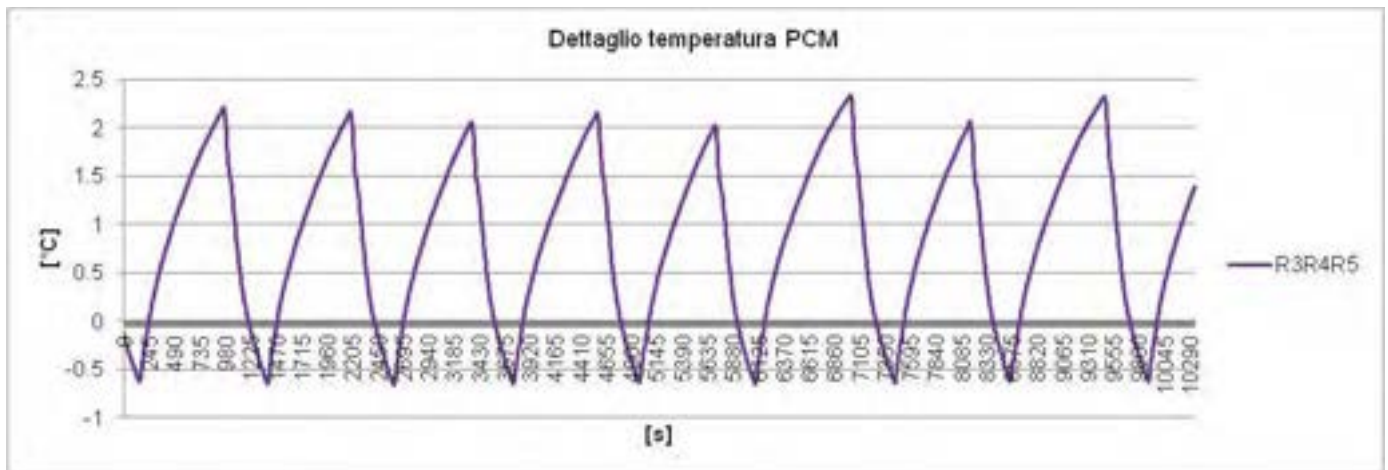


Figura 2.2.2.13: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ non consente il cambiamento di fase del PCM, il RubiTherm RT5HC si fonde prevalentemente a 5-6°C.

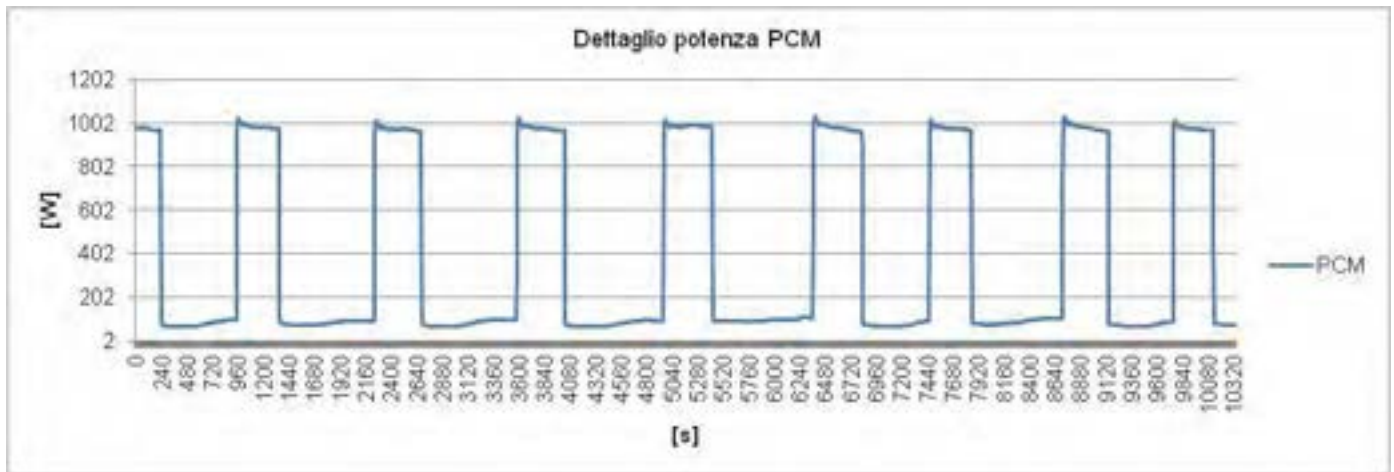


Figura 2.2.2.14: Potenza elettrica (vedi paragrafo 2.2) utilizzata dalla cella con la scambiatore PCM. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$, pur non consentendo il cambiamento di fase del PCM, riduce notevolmente i tempi di accensione del gruppo refrigerante.

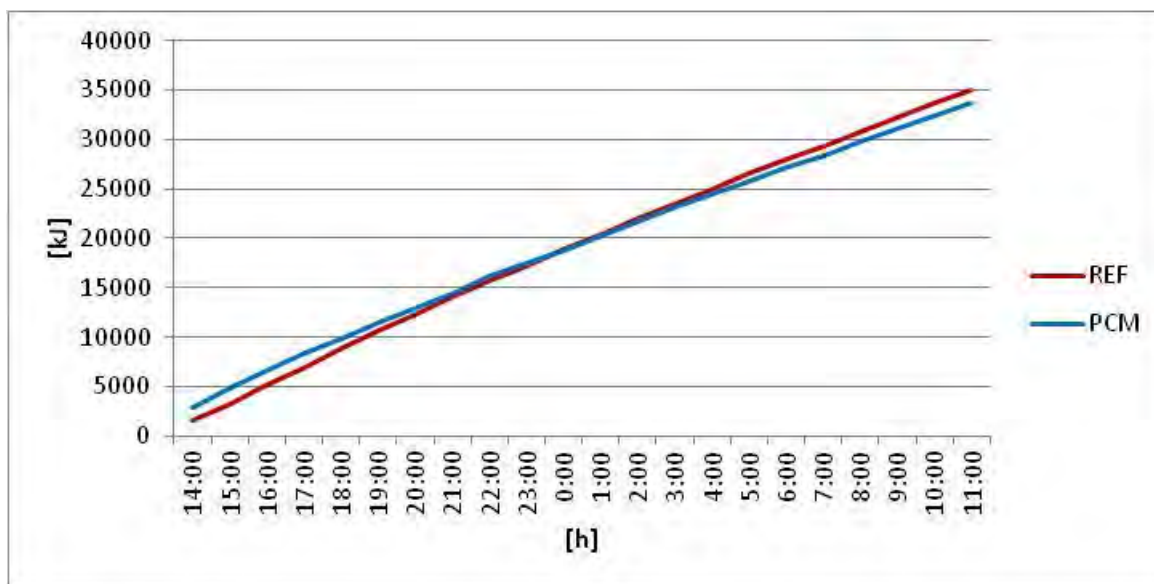


Figura 2.2.2.15: Confronto consumi elettrici delle due celle(vedi paragrafo 2.2). La cella di riferimento (REF) inizialmente impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) inizialmente impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$.

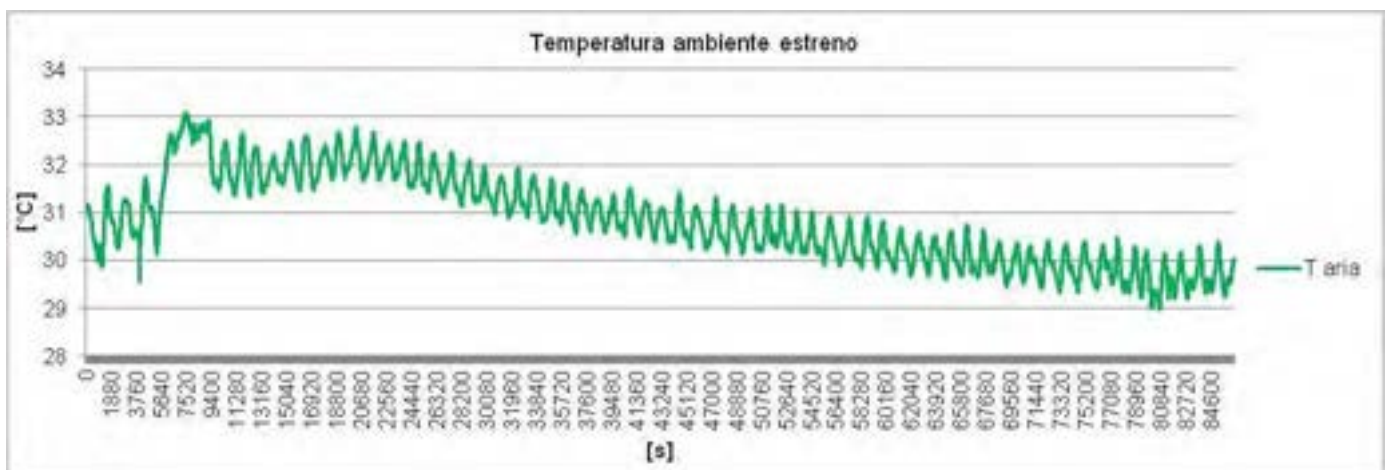


Figura 2.2.2.16: Temperatura del laboratorio presso UNIPM in cui si trovano le due celle (vedi Figura 2.2.1) riportata per completare l'informazione sui consumi energetici. L'intervallo temporale è lo stesso in cui la cella di riferimento (REF) inizialmente impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$, mentre la cella con lo scambiatore (PCM) inizialmente impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$.

A questo punto sono state impostate entrambe le celle alla stessa temperatura, $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$, per far lavorare correttamente il PCM. Come si può notare dalla Figura 2.2.2.17 il gruppo refrigerante della cella col PCM ha avuto una risalita così lenta della temperatura che non si è acceso per circa sei ore. L'apertura delle porte che è stata effettuata per le due celle dovendo verificare il funzionamento dei nodi sensoriali, ha confermato quanto emerso dalle prove preliminari effettuate da UNIPM che confermavano l'efficacia dello scambiatore per quanto riguarda le prove di black-out ma ne ridimensionavano l'efficacia sulle simulazioni di apertura delle porte. In effetti i picchi nella temperatura dell'aria nelle due celle sono simili ma portando a 7°C T_{set} per entrambe le celle ottimizza il funzionamento dello scambiatore, con i 17kg di RubiTherm RT35HC che hanno verosimilmente il tempo per effettuare significativamente il cambiamento di fase.

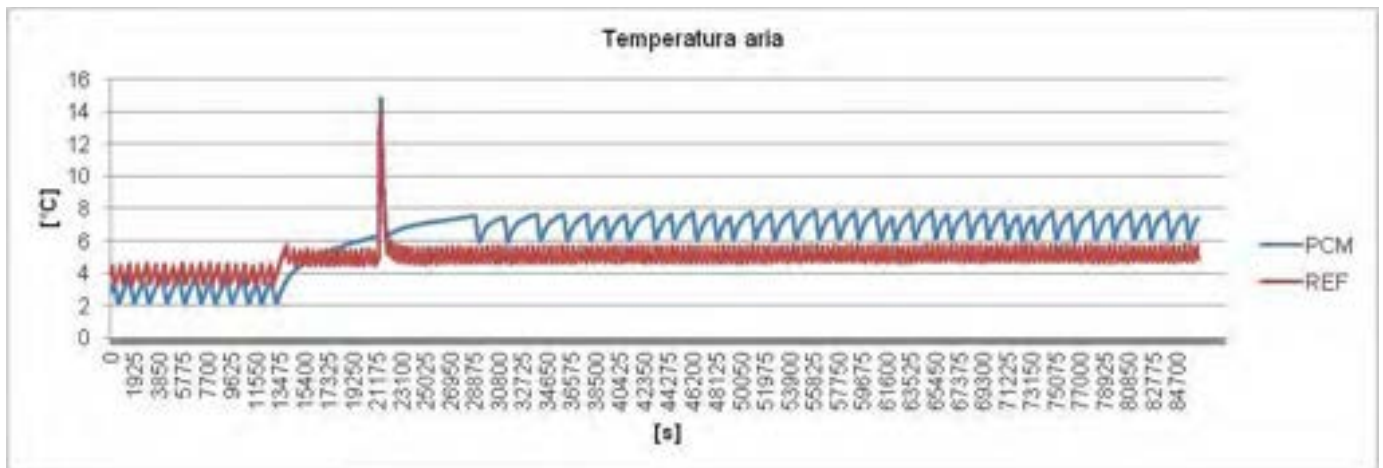


Figura 2.2.2.17: Confronto temperature media (vedi paragrafo 2.2) dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) inizialmente impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) inizialmente impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$.

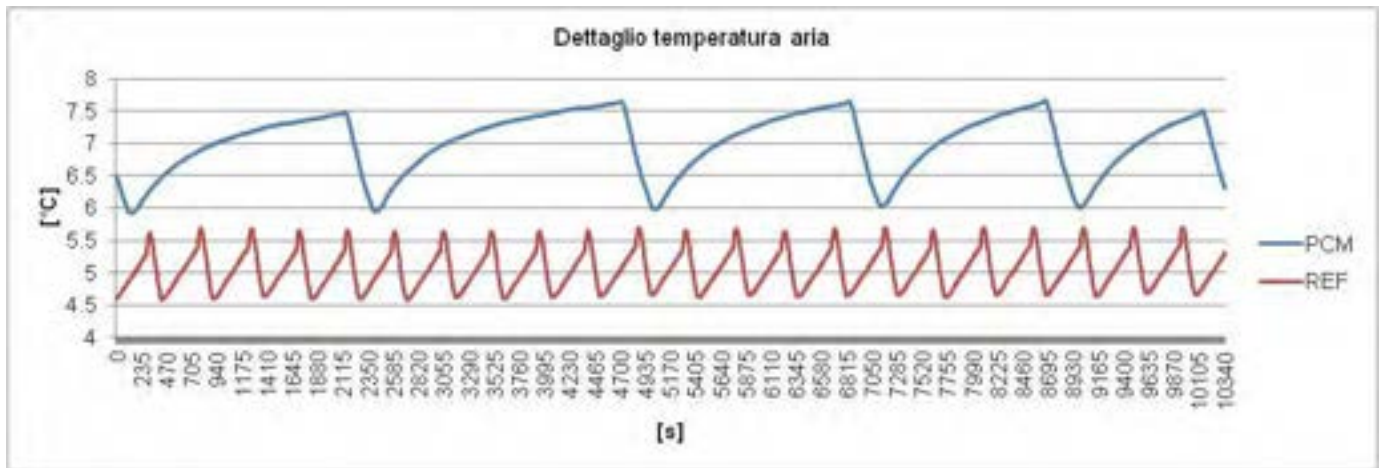


Figura 2.2.2.18: Confronto temperature media (vedi paragrafo 2.2) dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$ oscilla intorno ai 5°C . La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$ oscilla intorno a 6.8°C .

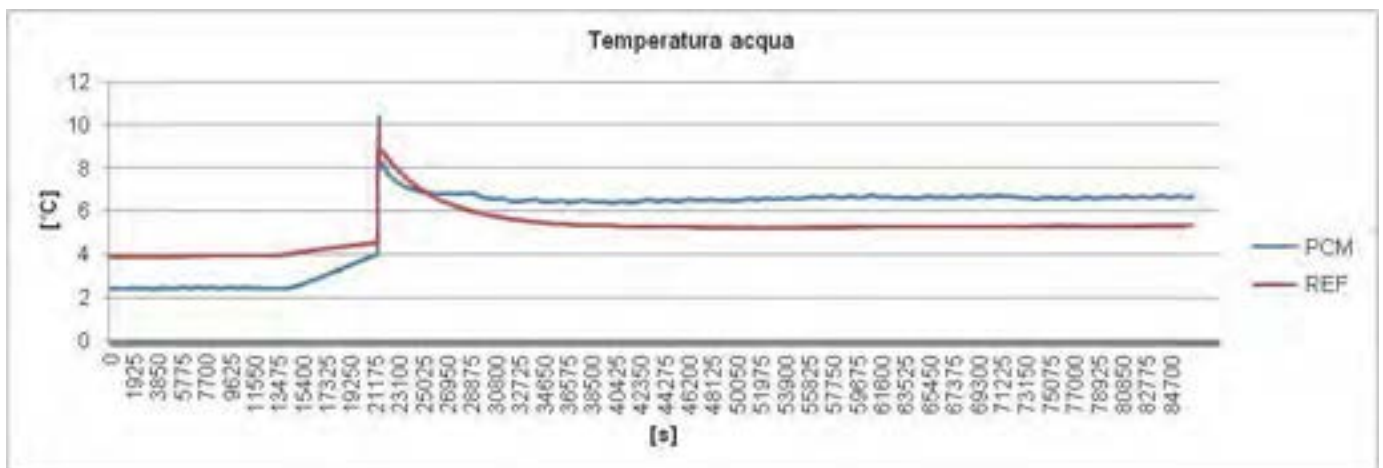


Figura 2.2.2.19: Confronto temperatura acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) inizialmente impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) inizialmente impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$.

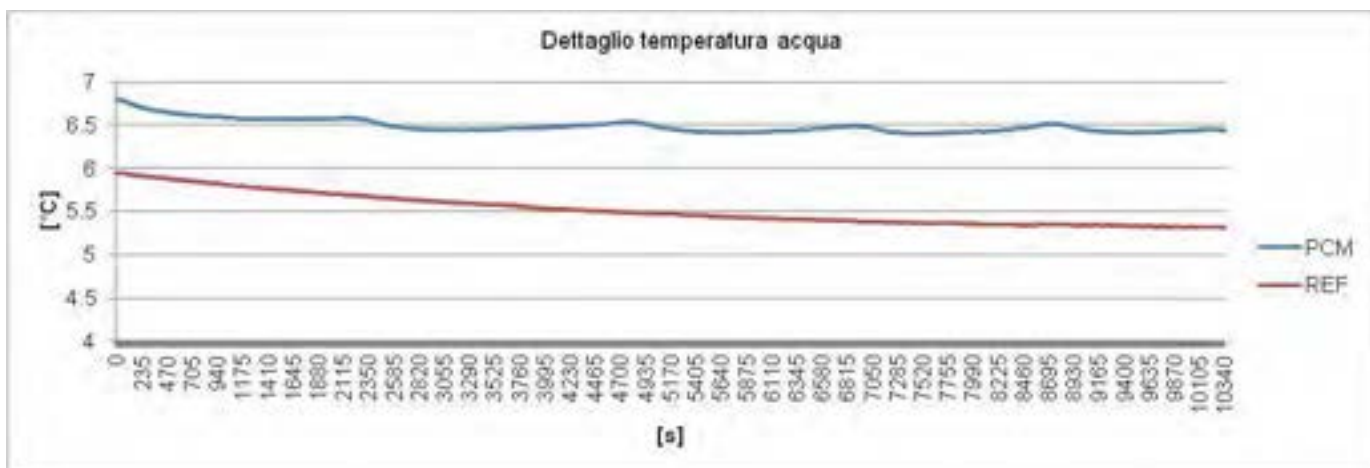


Figura 2.2.2.20: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$ tende verso 5.4°C . La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$ tende verso 6.4°C con lievissime oscillazioni molto lente.

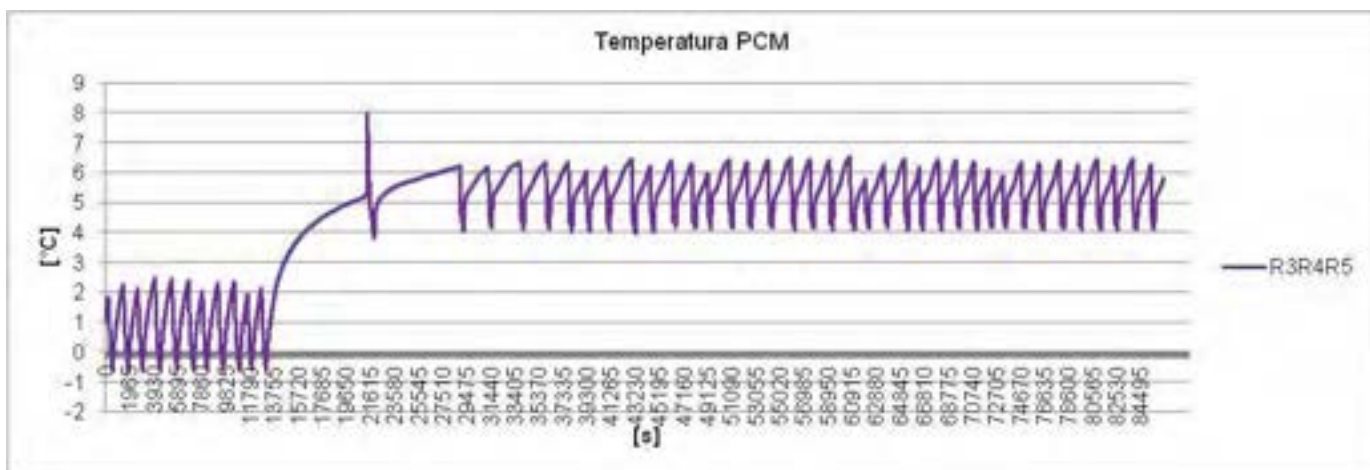


Figura 2.2.2.21: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) inizialmente impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$.

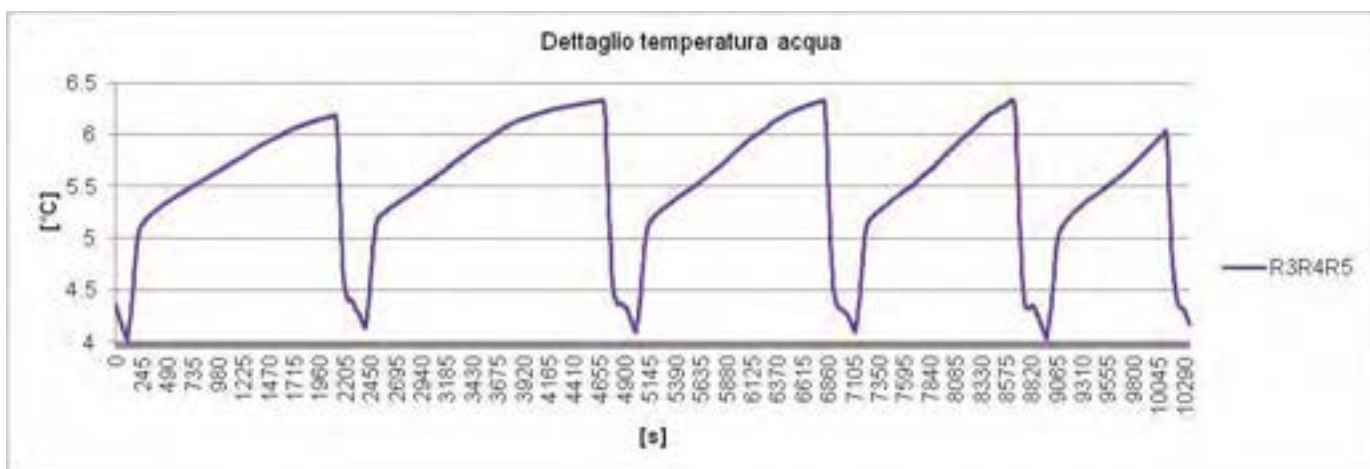


Figura 2.2.2.22: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$ mostra il cambiamento di fase del PCM anche in condizioni stazionarie, rallentando decisamente la frequenza di accensione del gruppo refrigerante.

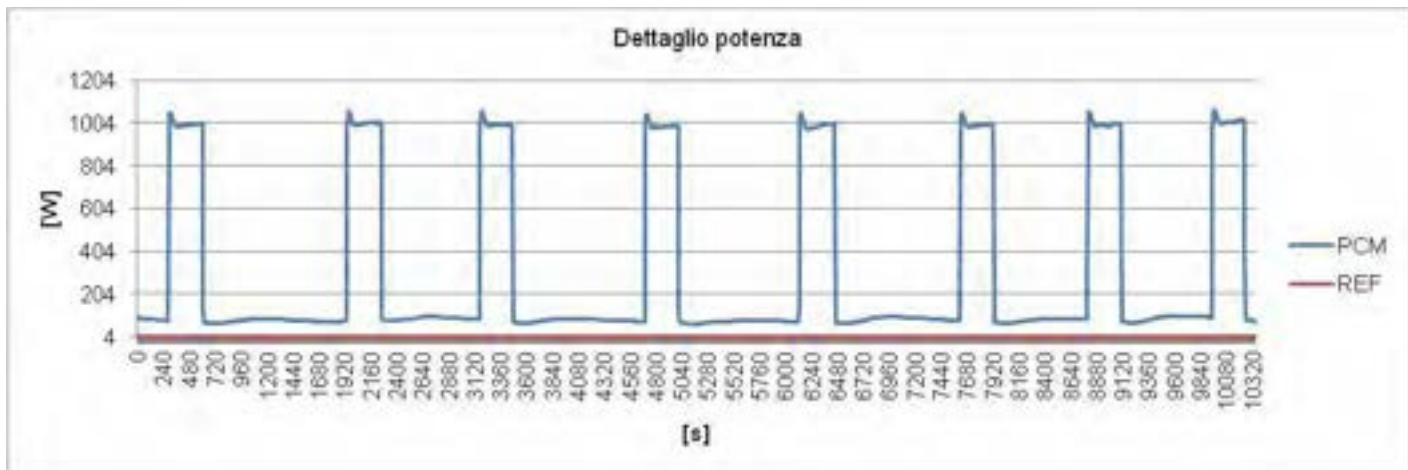


Figura 2.2.2.23: Potenza elettrica (vedi paragrafo 2.2) utilizzata dalla cella con lo scambiatore PCM. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$, consentendo il cambiamento di fase del PCM, riduce drasticamente i tempi di accensione del gruppo refrigerante.

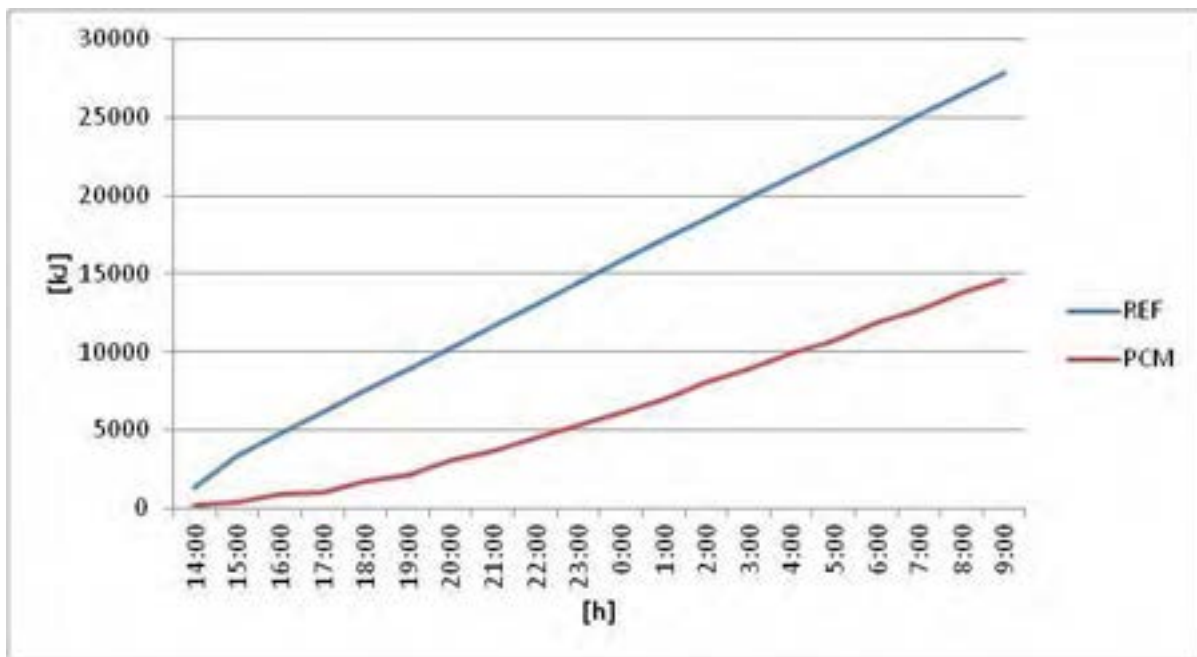


Figura 2.2.2.24: Confronto consumi elettrici delle due celle(vedi paragrafo 2.2). La cella di riferimento (REF) inizialmente impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) inizialmente impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$.

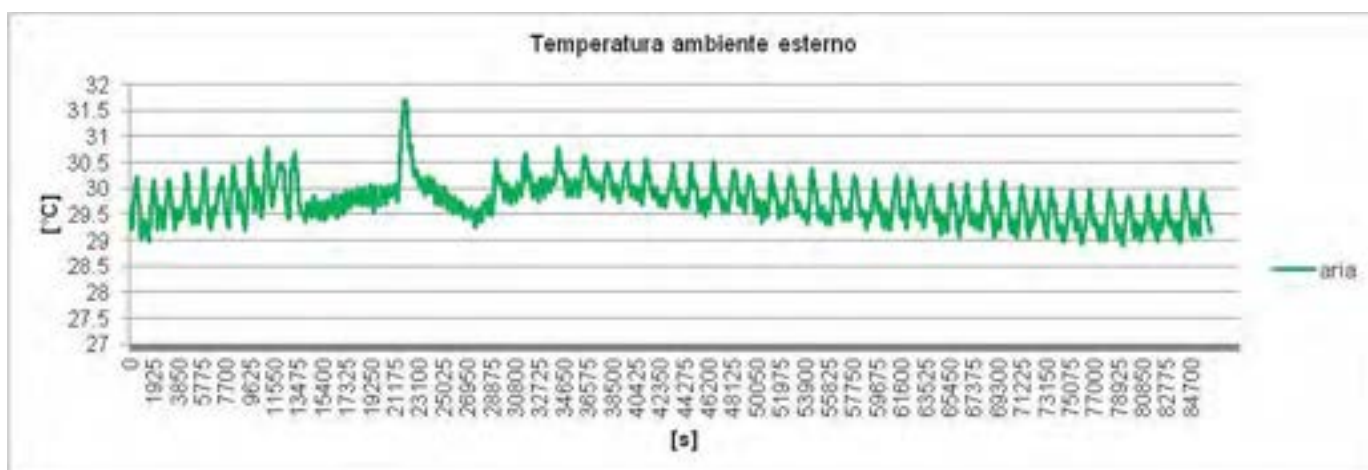


Figura 2.2.2.25: Temperatura del laboratorio presso UNIPM in cui si trovano le due celle (vedi Figura 2.2.1) riportata per completare l'informazione sui consumi energetici. L'intervallo temporale è lo stesso in cui la cella di riferimento (REF) inizialmente impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$, mentre la cella con lo scambiatore (PCM) inizialmente impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$.

I nodi sensoriali inseriti nelle due celle frigorifero hanno funzionato per quasi due giorni, poi ci sono stati problemi nella registrazione dei dati sulle schede di memoria. I dati dei due giorni disponibili confermano quanto evidenziato comunque dalle verifiche dirette alla fine della campagna e durante le aperture delle porte: le pesche nelle due celle non presentavano segni di una differente shelf life.

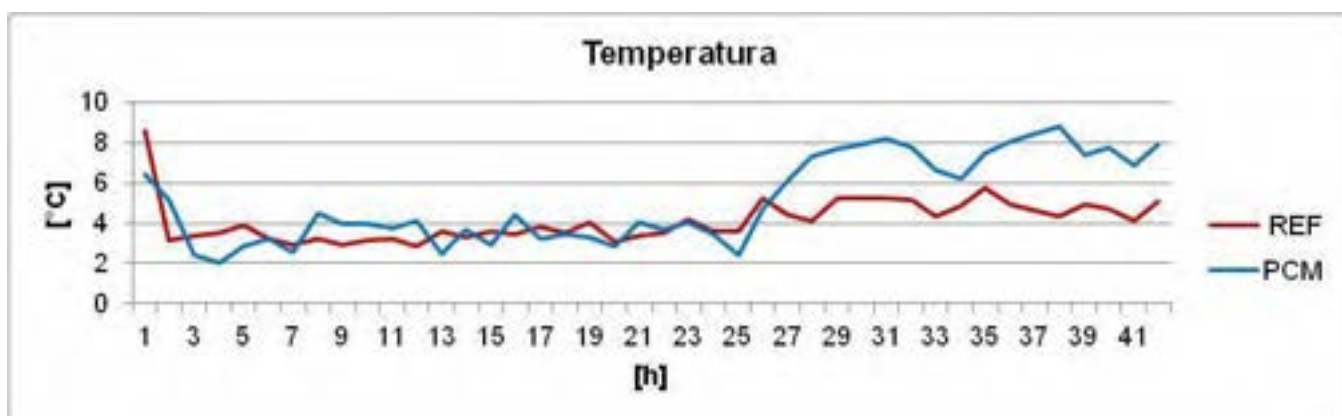


Figura 2.2.2.26: Temperature misurate dai nodi sensoriali inseriti tra le pesche nelle due celle. L'intervallo temporale è lo stesso in cui la cella di riferimento (REF) inizialmente impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$, mentre la cella con lo scambiatore (PCM) inizialmente impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$.

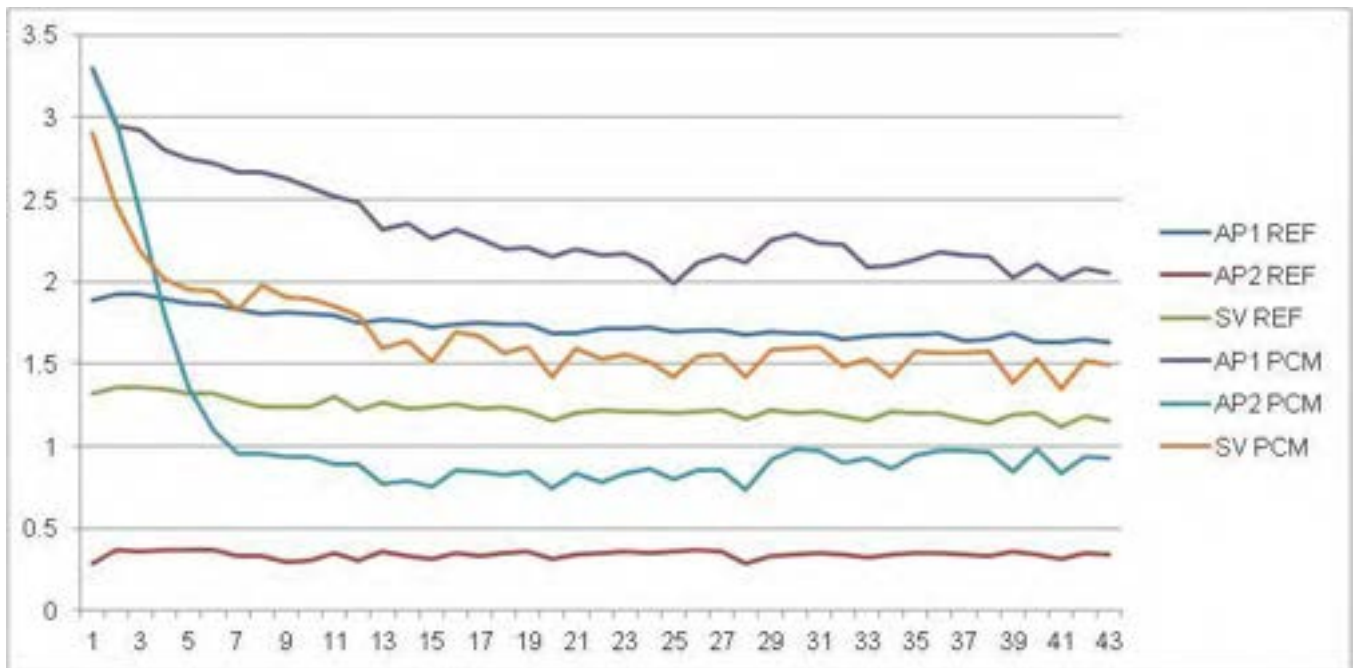


Figura 2.2.2.27: Confronto tra i nodi sensoriali inseriti nelle due celle. L'intervallo temporale è lo stesso in cui la cella di riferimento (REF) inizialmente impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$, mentre la cella con lo scambiatore (PCM) inizialmente impostata con $T_{set}=3^{\circ}\text{C}$ è stata portata a $T_{set}=7^{\circ}\text{C}$.

Le temperature delle due celle sono state impostate per 24h rispettivamente per la cella di riferimento a 9°C e per quella con il PCM a 8°C . L'obiettivo era cercare le impostazioni che consentissero di ottenere la temperatura della pesche più simile possibile nelle due celle.

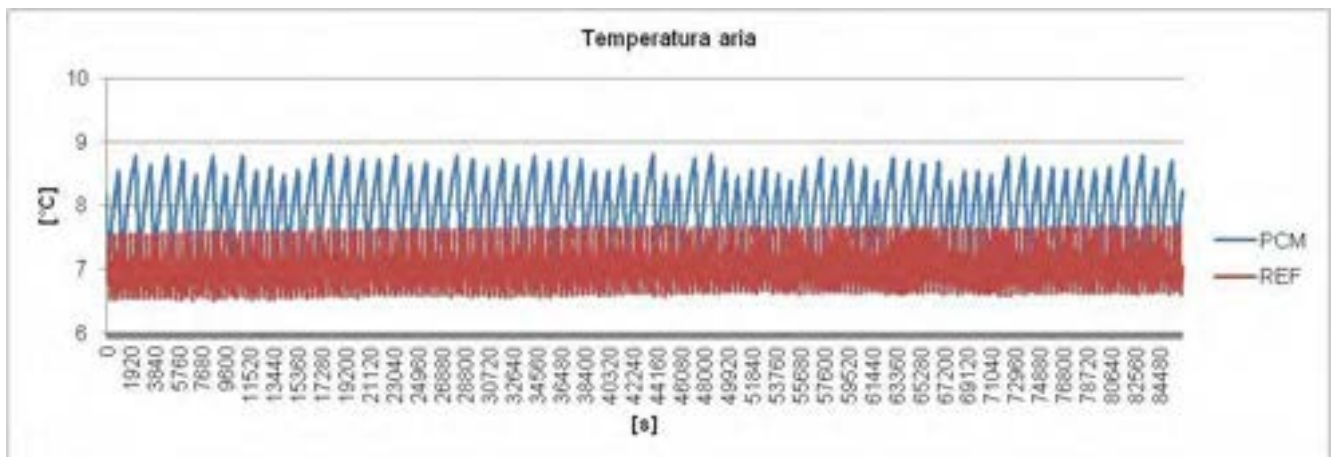


Figura 2.2.2.28: Confronto temperature media (vedi paragrafo 2.2) dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata con $T_{set}=9^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$.

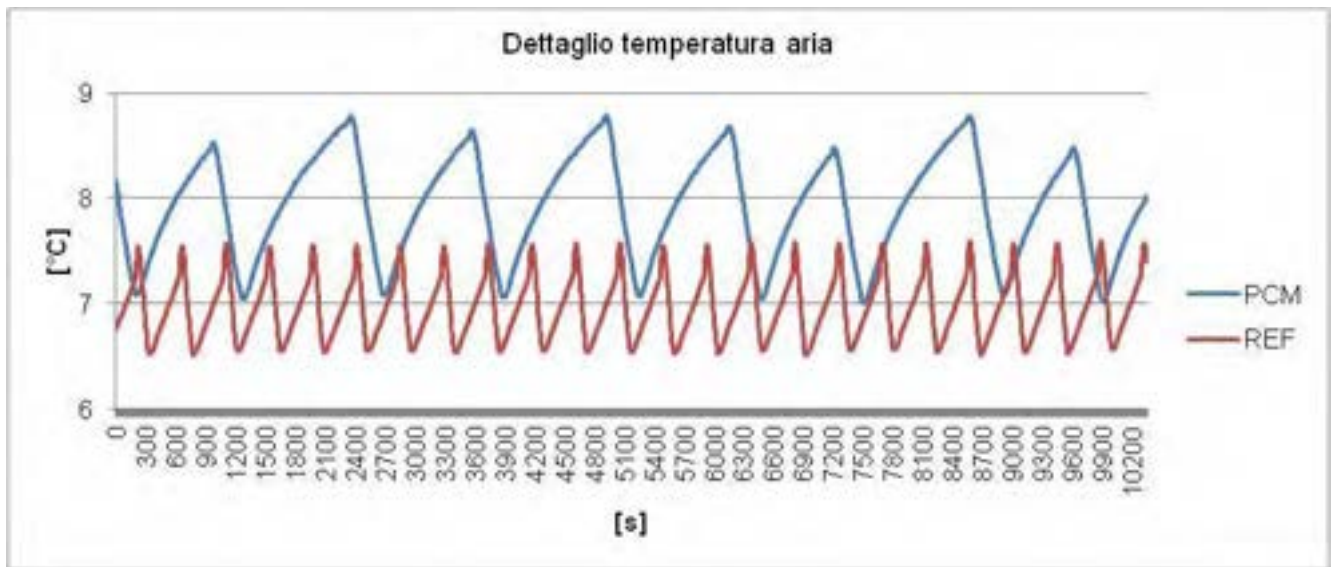


Figura 2.2.2.29: Confronto temperature media (vedi paragrafo 2.2) dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{set}=9^{\circ}\text{C}$ oscilla intorno a $T=7^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ oscilla proprio intorno a $T=8^{\circ}\text{C}$.

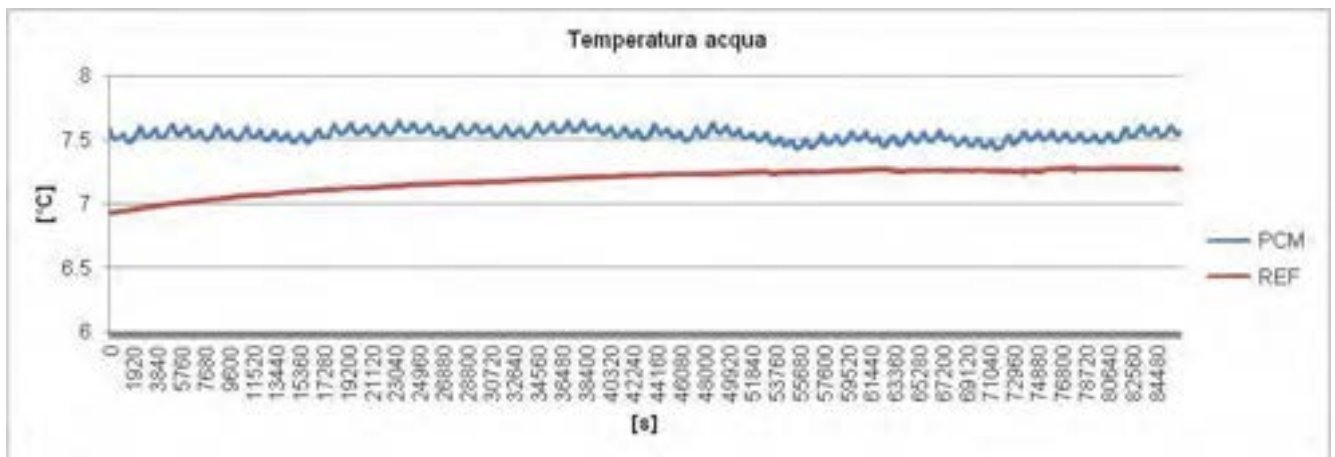


Figura 2.2.2.30: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata con $T_{set}=9^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$.

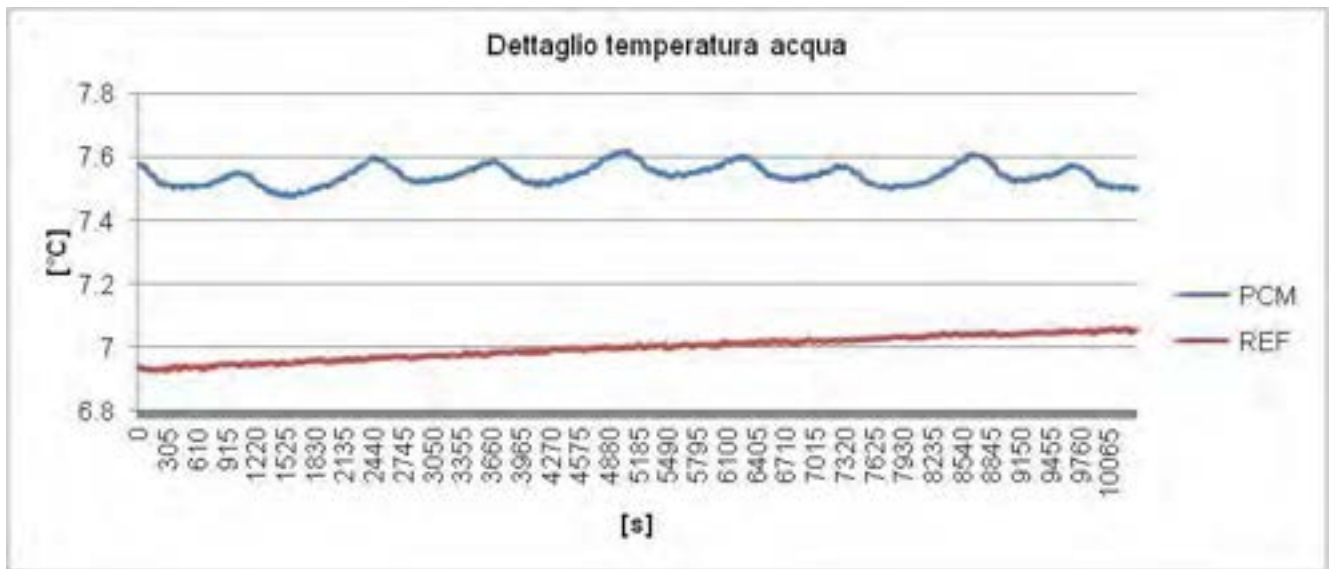


Figura 2.2.2.31: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{set}=9^{\circ}\text{C}$ tende verso 7.2°C . La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ tende verso 7.5°C con lievissime oscillazioni molto lente.

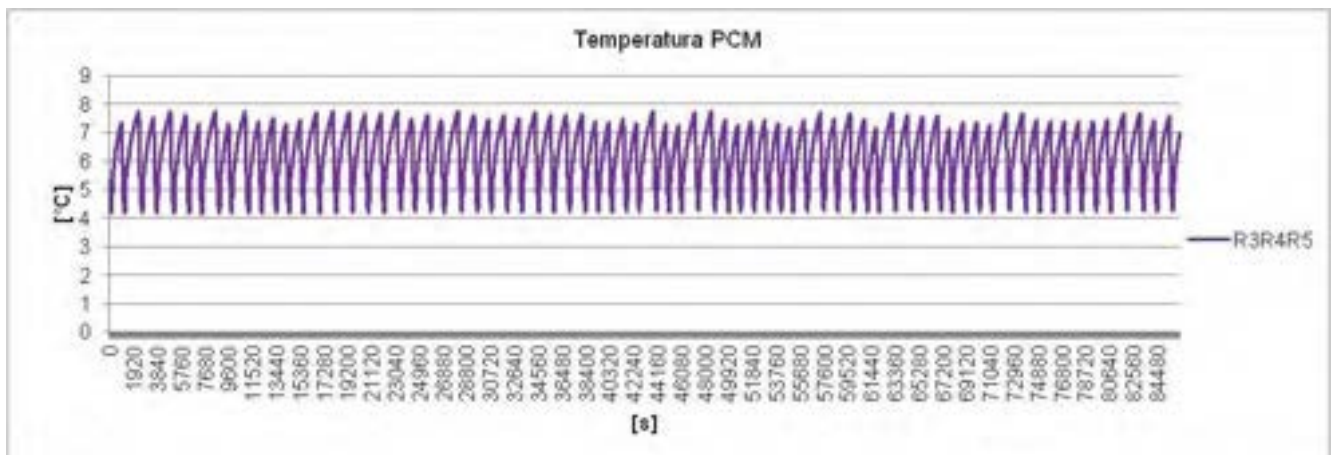


Figura 2.2.2.32: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=8^{\circ}$.

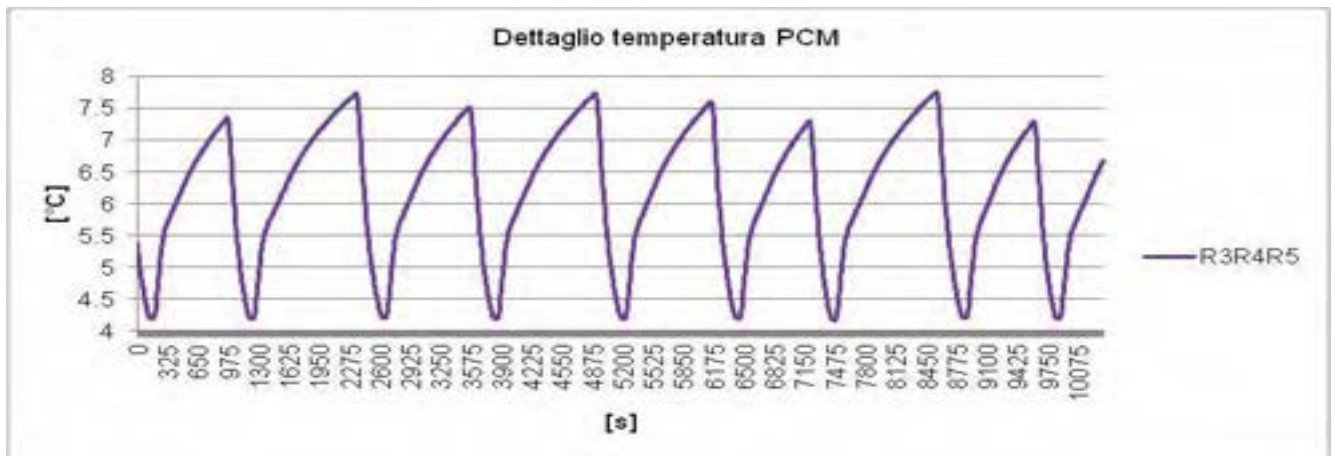


Figura 2.2.2.33: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ mostra il cambiamento di fase del PCM anche in condizioni stazionarie, rallentando la frequenza di accensione del gruppo refrigerante.

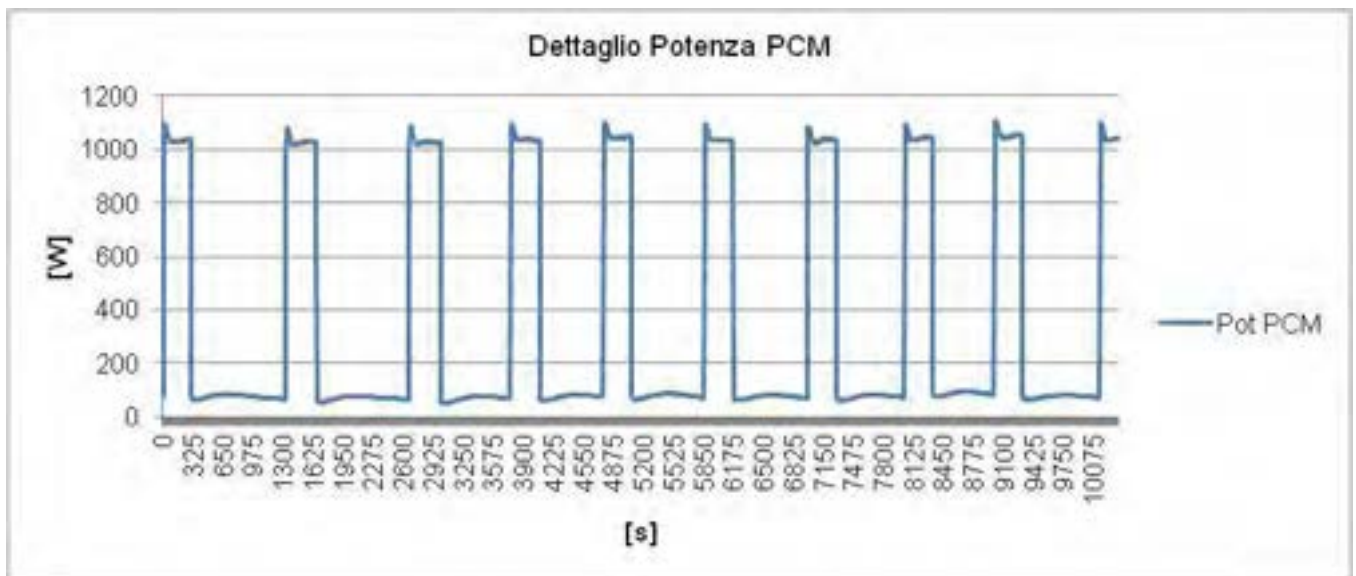


Figura 2.2.2.34: Potenza elettrica utilizzata dalla cella con la scambiatore PCM. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$, consentendo il cambiamento di fase del PCM, riduce i tempi di accensione del gruppo refrigerante.

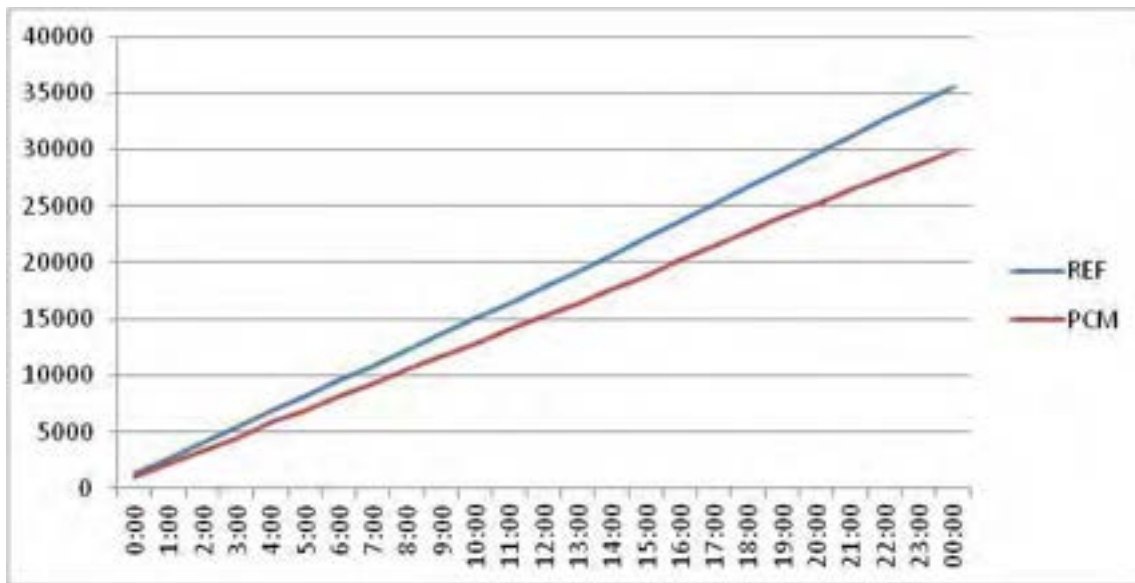


Figura 2.2.2.35: Confronto consumi elettrici delle due celle. La cella di riferimento (REF) inizialmente è stata impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=9^{\circ}\text{C}$.

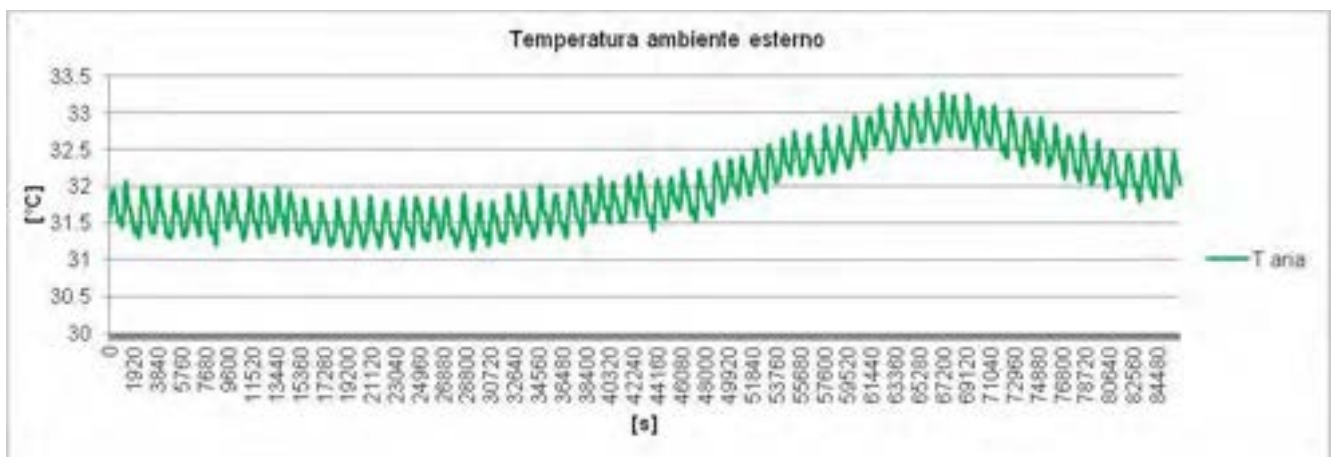


Figura 2.2.2.36: Temperatura del laboratorio presso UNIPM in cui si trovano le due celle (vedi Figura 2.2.1) riportata per completare l'informazione sui consumi energetici. L'intervallo temporale è lo stesso in cui la cella di riferimento (REF) è stata impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$, mentre la cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=9^{\circ}\text{C}$.

La prima settimana di prove ha evidenziato come impostare opportunamente i gruppi refrigeranti delle due celle per valutarne le prestazioni termiche ed i consumi energetici mantenendo praticamente invariate le condizioni di conservazione dei due carichi di frutta. E' stato quindi confermato che l'inserimento del PCM all'interno del vano refrigerato, in corrispondenza dell'evaporatore, porta effettivamente ad un aumento dell'efficienza energetica del sistema, ma soprattutto si sono ottenute interessanti indicazioni su come si possano avere benefici gestionali nella gestione dello stesso gruppo refrigerante. Infatti, esaminando gli andamenti dei vari parametri misurati, si nota come l'uso del PCM abbatta drasticamente il numero di cicli nel tempo di intervento del gruppo frigorifero per dare le stesse condizioni di temperatura all'interno del vano refrigerato. E' proprio la riduzione nel tempo di funzionamento del gruppo refrigerante che porta al minore consumo energetico in condizioni stazionarie di temperatura. 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 di diverse ore. In queste condizioni si utilizza appieno la capacità di immagazzinamento del calore da parte dello scambiatore con PCM che ha il tempo per effettuare

completamente il cambiamento di fase. In pratica si può dire che la cella funzione in caratteristiche di semi passività. La capacità del PCM di mantenere a cella spenta i valori di temperatura dell'aria interna alla cella per un tempo assai lungo ha suggerito una modalità di utilizzo delle due celle frigo durante la campagna sperimentale sulla frutta che ha consentito risparmi energetici notevoli (intorno al 50% in 24h) impostando i gruppi di refrigerazione con due diverse temperature di funzionamento, una più bassa durante la notte che consentisse di solidificare il PCM, e l'altra più alta di qualche grado durante il giorno. Il monitoraggio termico completo delle due celle e quello degli spazi di testa per valutare lo stato di conservazione della frutta suggerisce di affinare le modalità di controllo del gruppo refrigerante per ottimizzare il consumo energetico della macchina frigorifero cercando di mantenere costante il prodotto tempo temperatura visto dalle pesche nelle due celle. Impostando la temperatura delle celle 4°C più bassa durante la notte è possibile sfruttare appieno le potenzialità dello scambiatore PCM che ha il tempo necessario per effettuare una completa transizione di fase. Inoltre 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 è notato come lo scambiatore di PCM posto a valle dell'evaporatore consente una maggiore uniformità di temperature all'interno della cella frigorifero. Inoltre sia la temperatura della frutta che le temperature dell'aria alle varie altezze sono molto più vicine a quella impostata per il gruppo refrigerante.

A questo punto si è impostata sempre durante la notte (dalle ore 18 alle 10 del mattino successivo, quindi per 16 ore) la temperatura della cella con il PCM sempre a 4°C portandola a 8°C durante il giorno (per le restanti 8 ore).

E' stata impostata poi la temperatura della cella di riferimento sempre con la temperatura più bassa durante la notte (dalle ore 18 alle 10 del mattino successivo, quindi per 16 ore) e più alta durante il giorno (per le restanti 8 ore) cercando i valori da impostare sul controllore che avvicinassero il più possibile i prodotti tempo temperatura complessivi visti dai due carichi di pesche. Nei 18 giorni di durata della campagna, le pesche di entrambe le celle non hanno presentato alcuna differenza apparente nella shelf life.

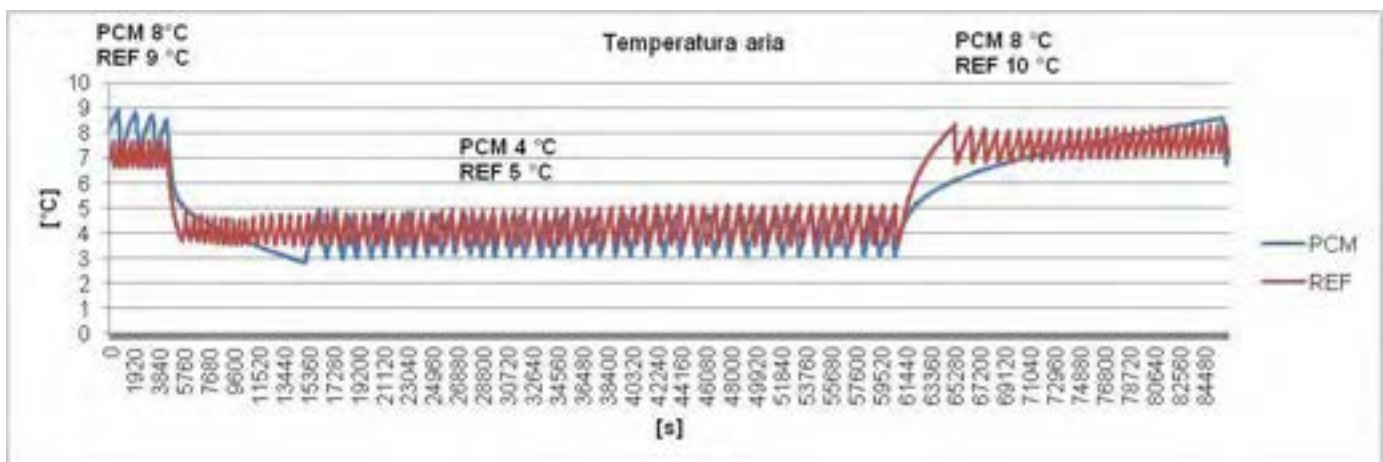


Figura 2.2.2.37: Confronto temperature media dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata con $T_{\text{set}}=5^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{\text{set}}=10^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{\text{set}}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{\text{set}}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno.

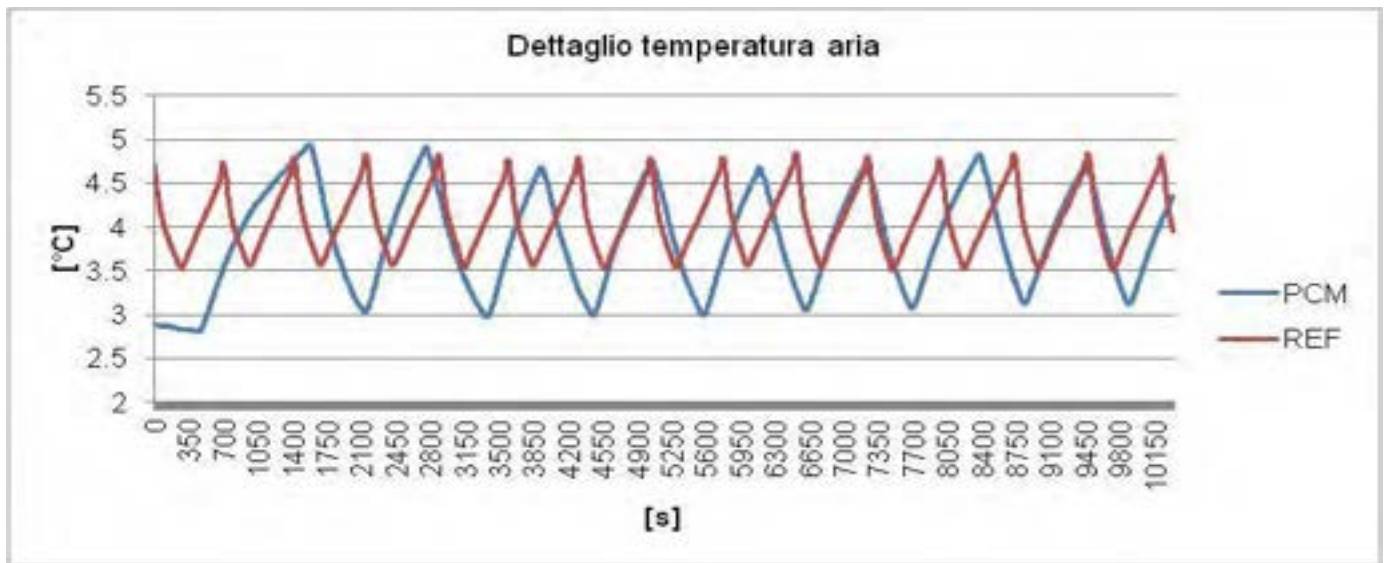


Figura 2.2.2.38: Confronto temperature media dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ oscilla intorno a $T=4.1^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ oscilla proprio intorno a $T=4^{\circ}\text{C}$.

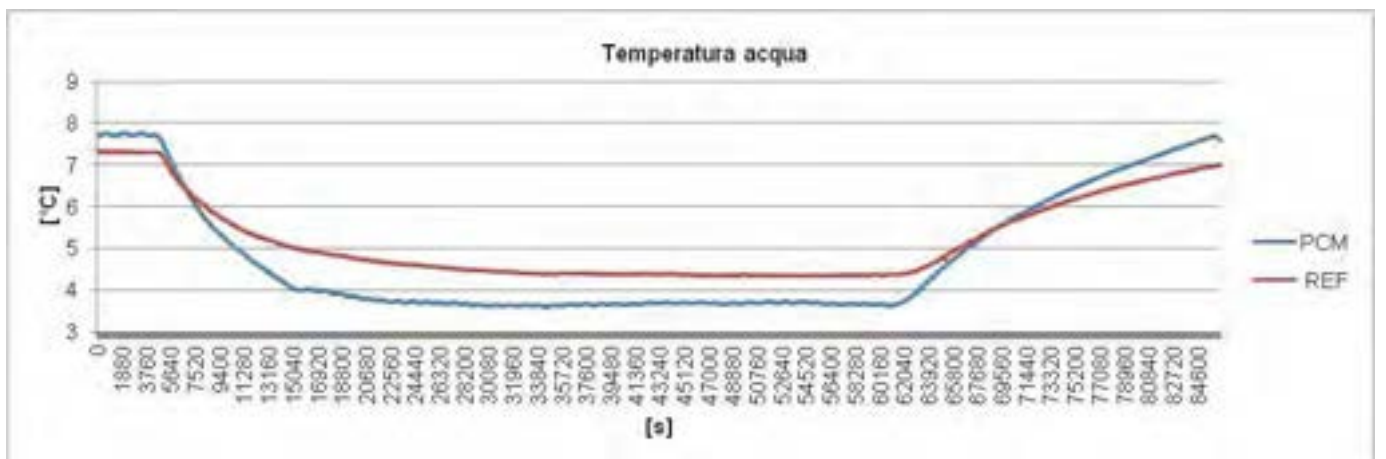


Figura 2.2.2.39: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=10^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno.

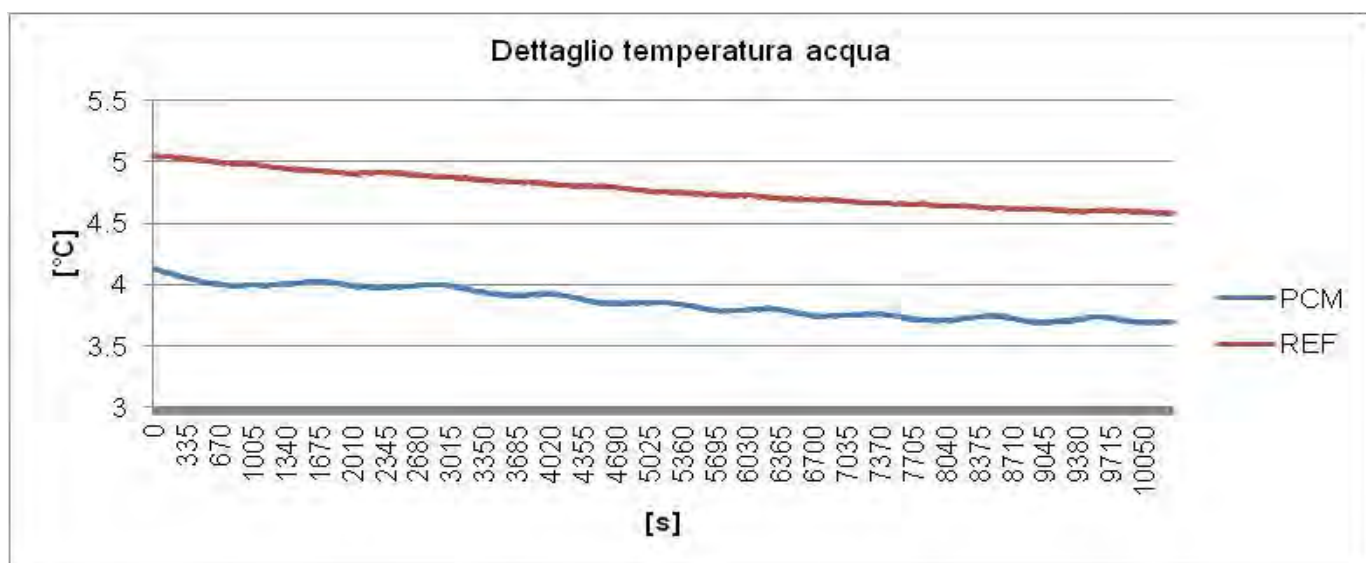


Figura 2.2.2.40: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{\text{set}}=5^{\circ}\text{C}$ tende verso 4.5°C . La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{\text{set}}=4^{\circ}\text{C}$ tende verso 3.7°C con lievissime oscillazioni molto lente.

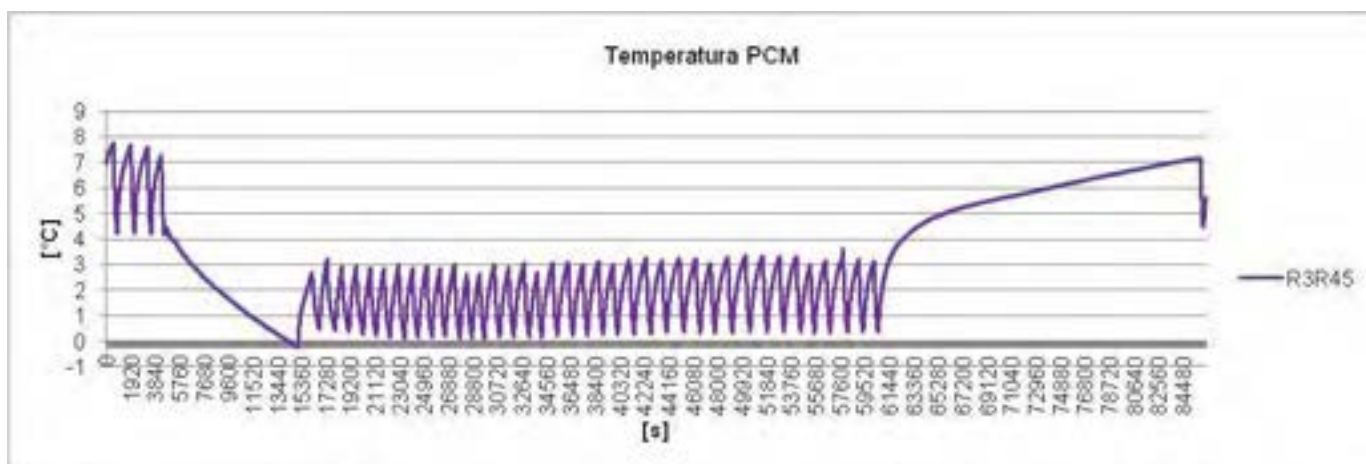


Figura 2.2.2.41: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{\text{set}}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{\text{set}}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. Si noti come dalle 10 alle 18 il gruppo refrigerante si accende una volta sola.

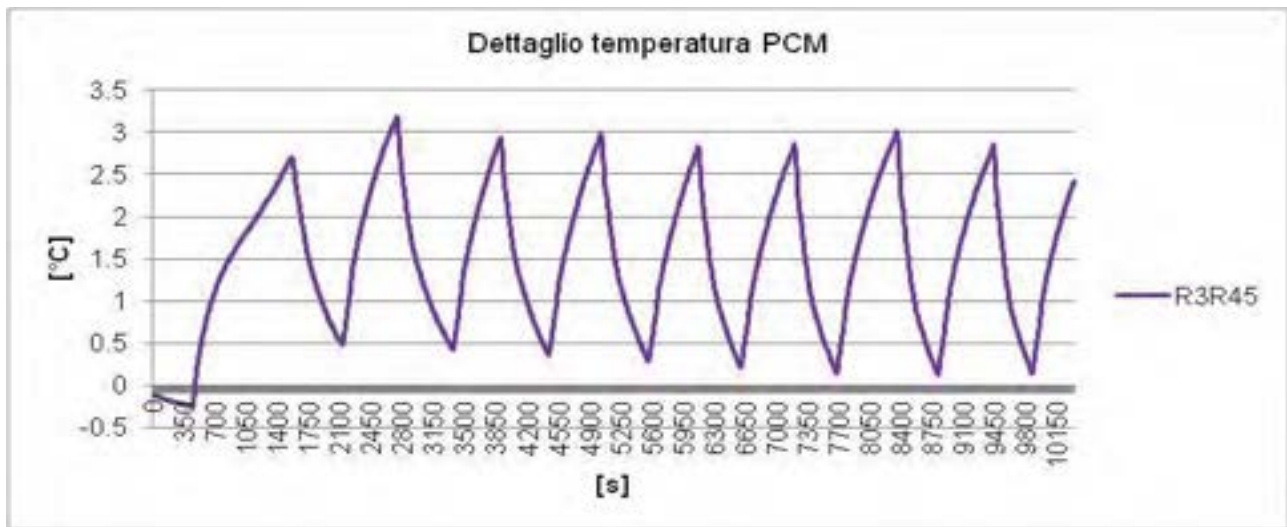


Figura 2.2.2.42: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ non mostra evidente cambiamento di fase del PCM in condizioni stazionarie, ma rallenta comunque la frequenza di accensione del gruppo refrigerante.

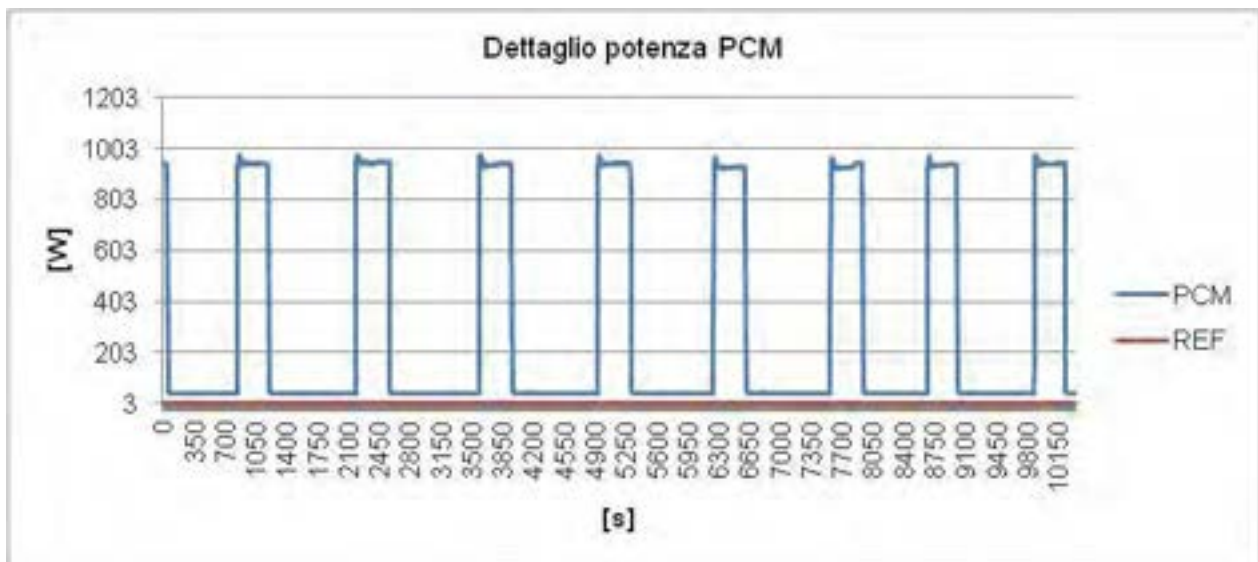


Figura 2.2.2.43: Potenza elettrica utilizzata dalla cella con lo scambiatore PCM. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$, riduce i tempi di accensione del gruppo refrigerante.

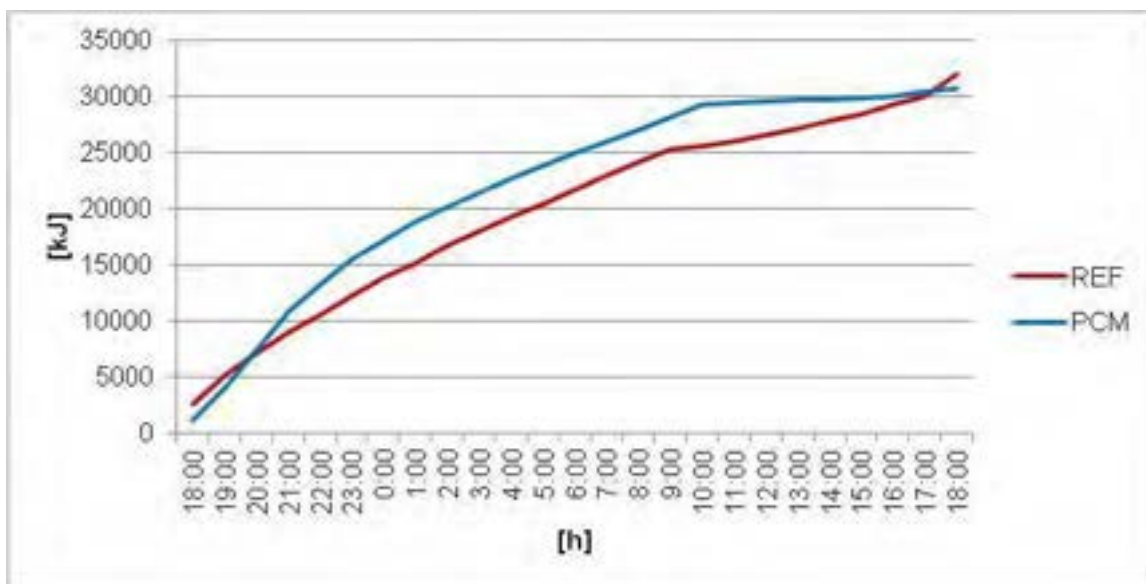


Figura 2.2.2.44: Confronto consumi elettrici delle due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=10^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. E' interessante notare come durante il giorno (8h) la cella col PCM recuperi completamente il maggior consumo della notte (16h).

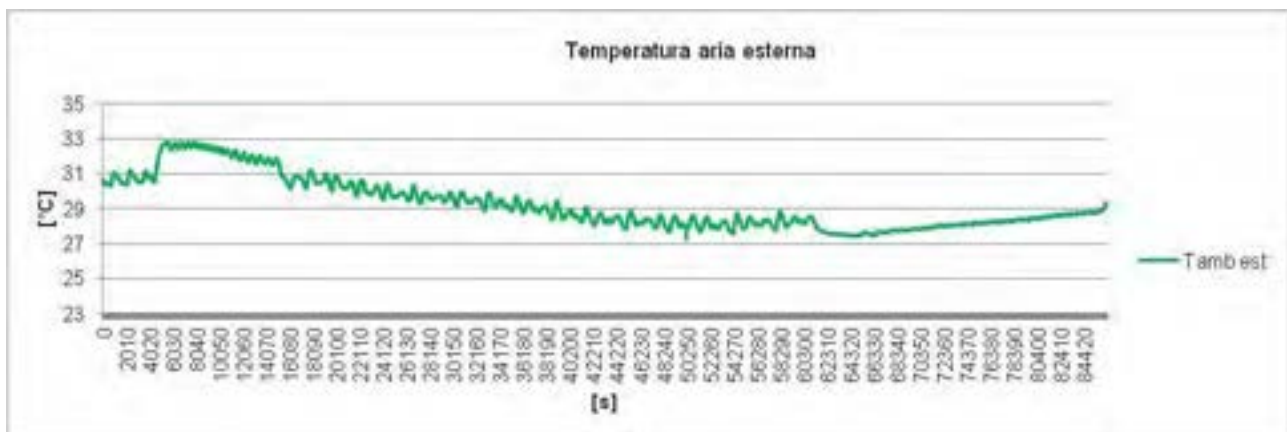


Figura 2.2.2.45: Temperatura del laboratorio presso UNIPM in cui si trovano le due celle (vedi Figura 2.2.1) riportata per completare l'informazione sui consumi energetici. L'intervallo temporale è lo stesso della figura precedente.

Alle ore 18.00 le temperature delle celle vengono abbassate (PCM 8°C , REF 10°C) di 4°C ciascuna (PCM 4°C E REF 6°C). I gruppi refrigerati lavorano indisturbati, senza aperture porte, fino alle 10 del mattino successivo. A questo punto viene impostata la temperatura di 8°C per la cella col PCM e 9°C per quella di riferimento. Questa volta nella cella con il PCM non si è mai acceso il gruppo refrigerante durante le 8h dalle 10 alle 18,

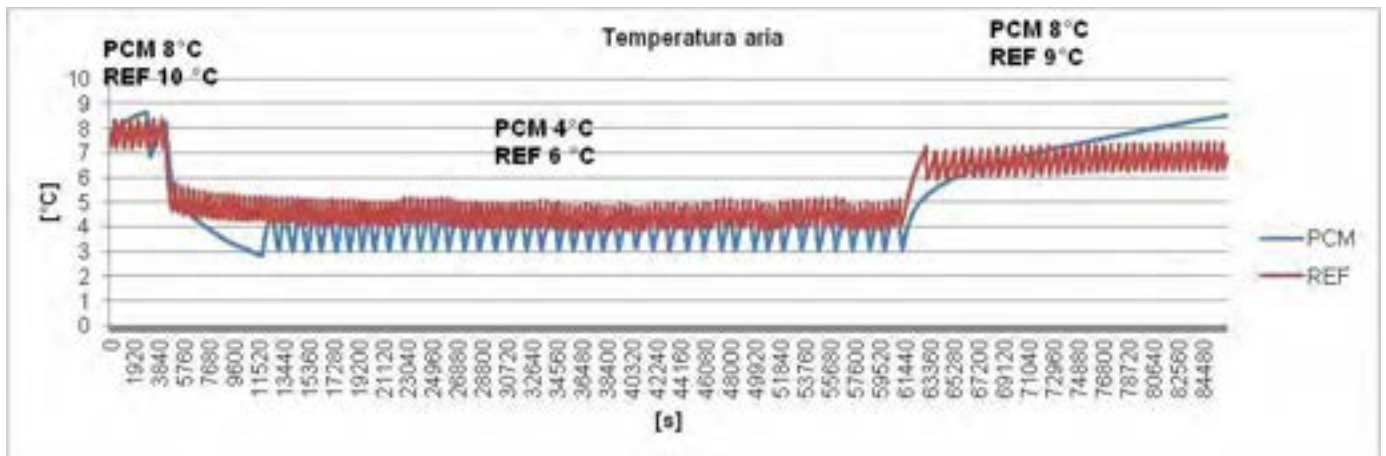


Figura 2.2.2.46: Confronto temperature media dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata con $T_{set}=6^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=9^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno.

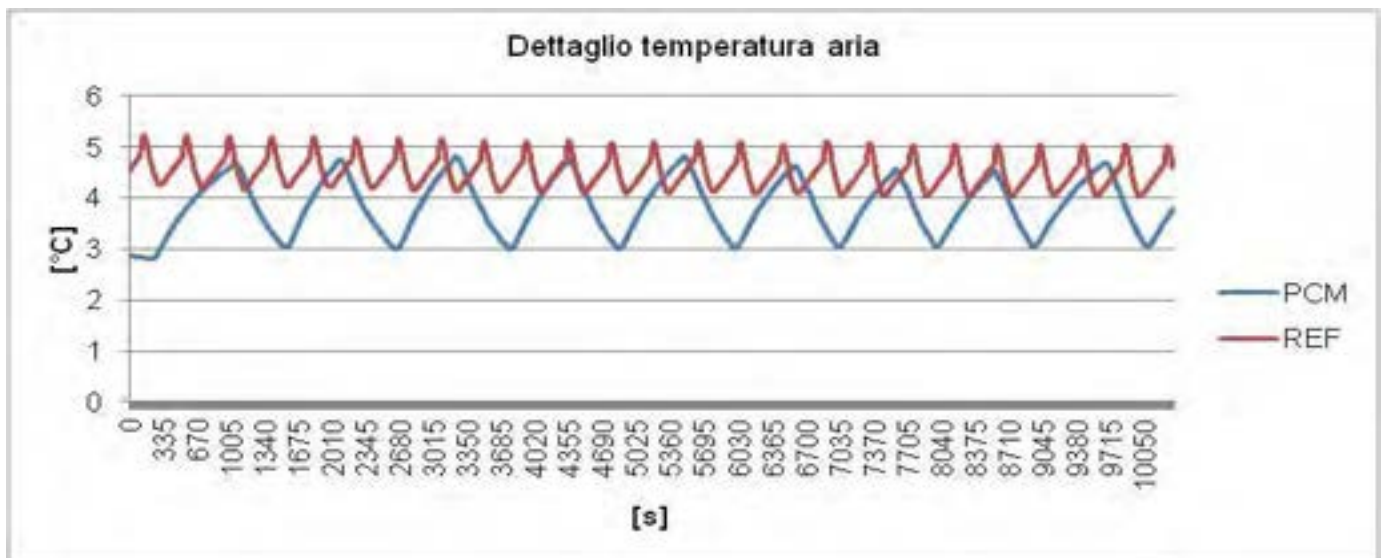


Figura 2.2.2.47: Confronto temperature media dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{set}=6^{\circ}\text{C}$ oscilla intorno a $T=4.5^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ oscilla intorno a $T=3.7^{\circ}\text{C}$.

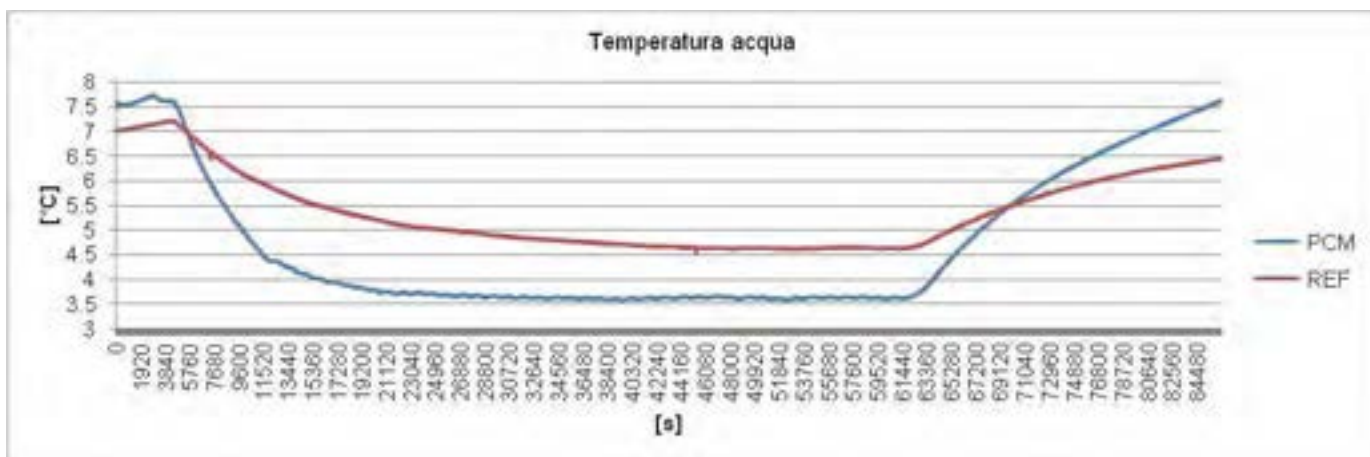


Figura 2.2.2.48: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata con $T_{\text{set}}=6^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{\text{set}}=9^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{\text{set}}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{\text{set}}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno.

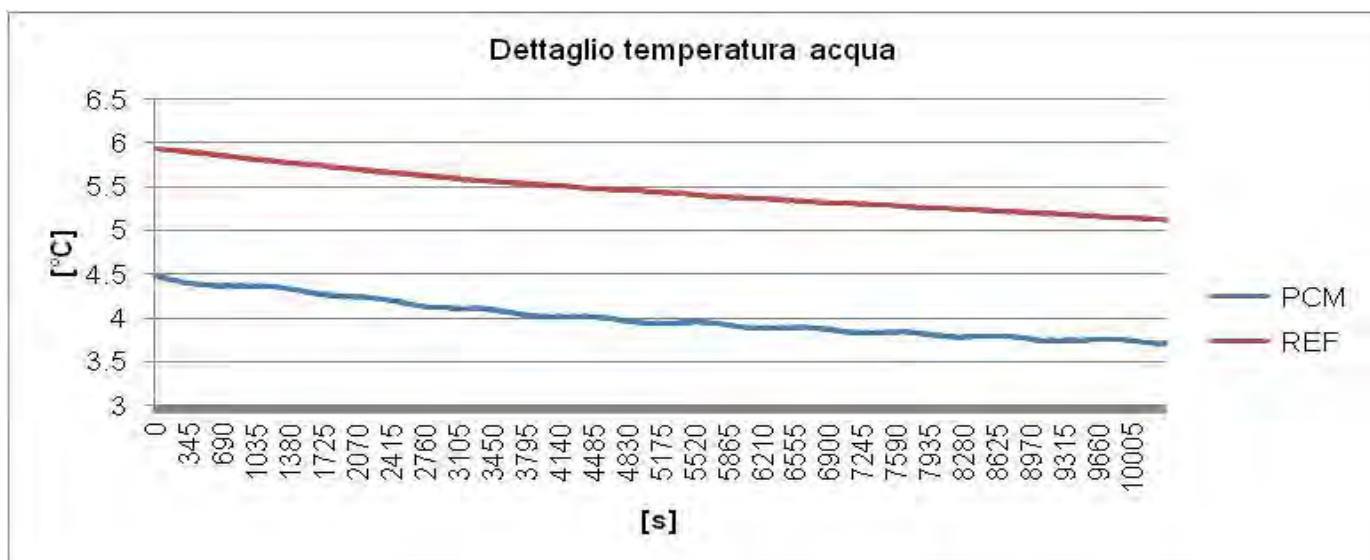


Figura 2.2.2.49: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{\text{set}}=6^{\circ}\text{C}$ tende verso 5°C . La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{\text{set}}=4^{\circ}\text{C}$ tende verso 3.7°C con lievissime oscillazioni molto lente.

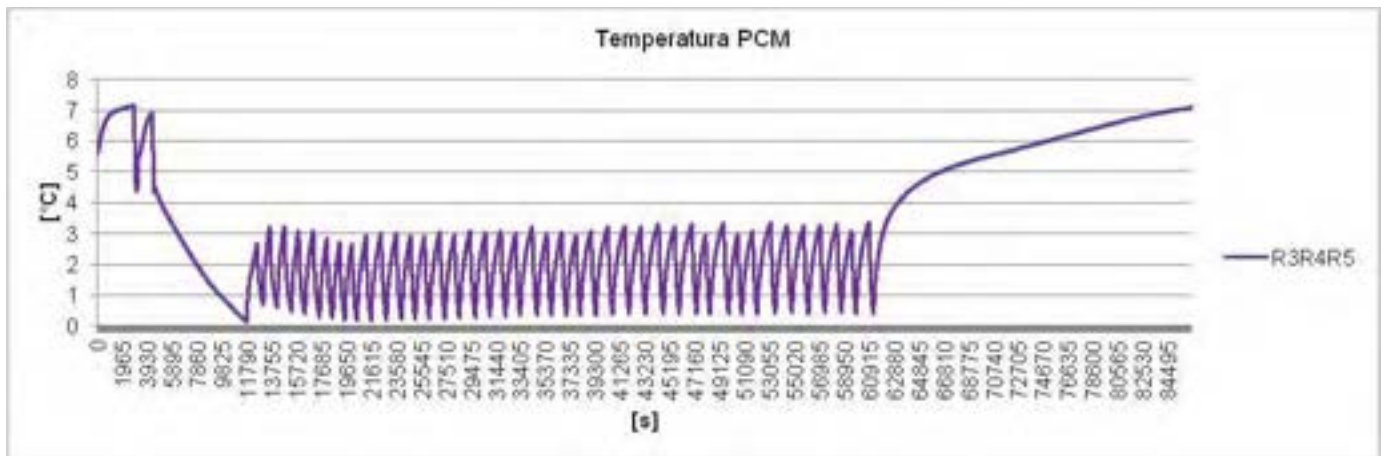


Figura 2.2.2.50: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. Si noti come dalle 10 alle 18 il gruppo refrigerante non si accenda mai.

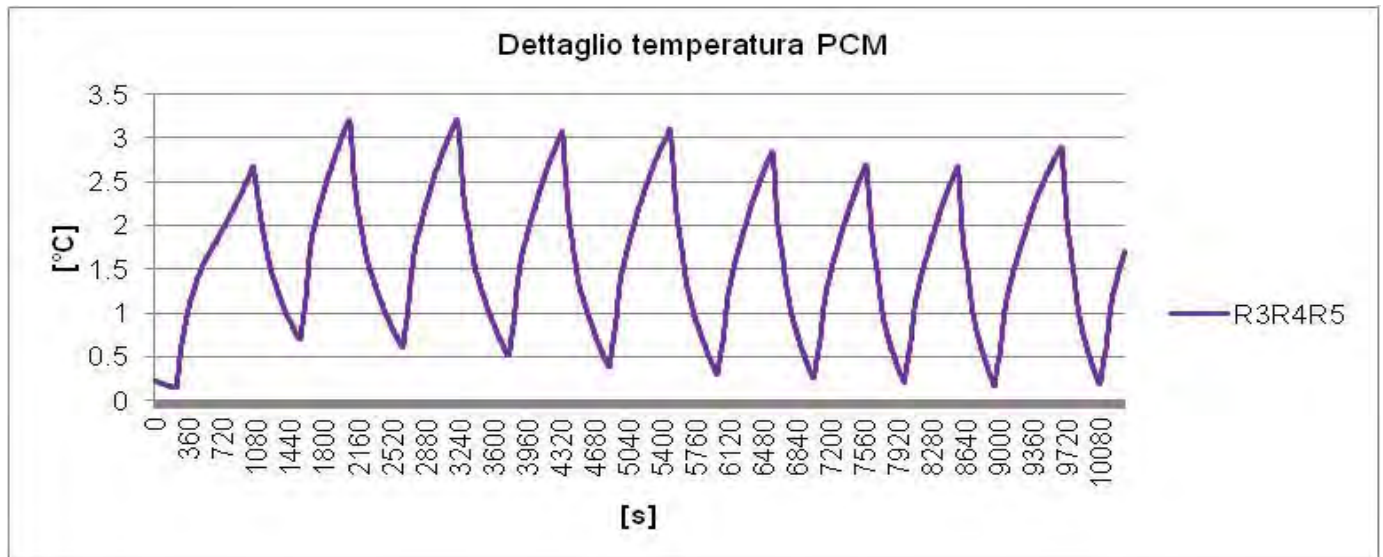


Figura 2.2.2.51: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ non mostra evidente cambiamento di fase del PCM in condizioni stazionarie, ma rallenta comunque la frequenza di accensione del gruppo refrigerante.

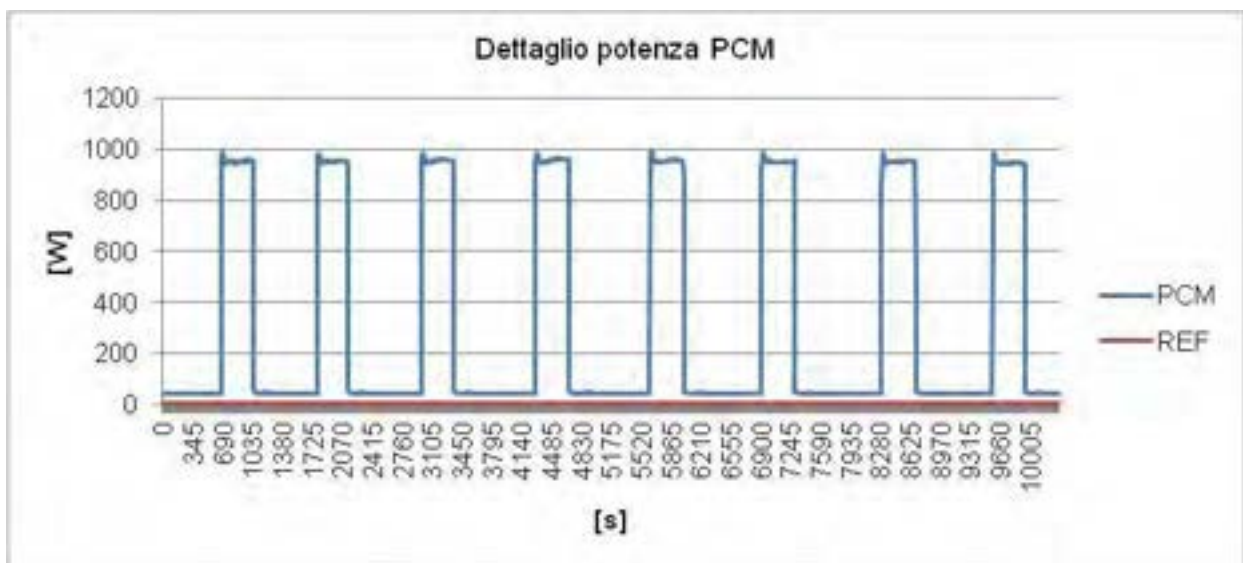


Figura 2.2.2.52: Potenza elettrica utilizzata dalla cella con lo scambiatore PCM. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$, riduce i tempi di accensione del gruppo refrigerante.

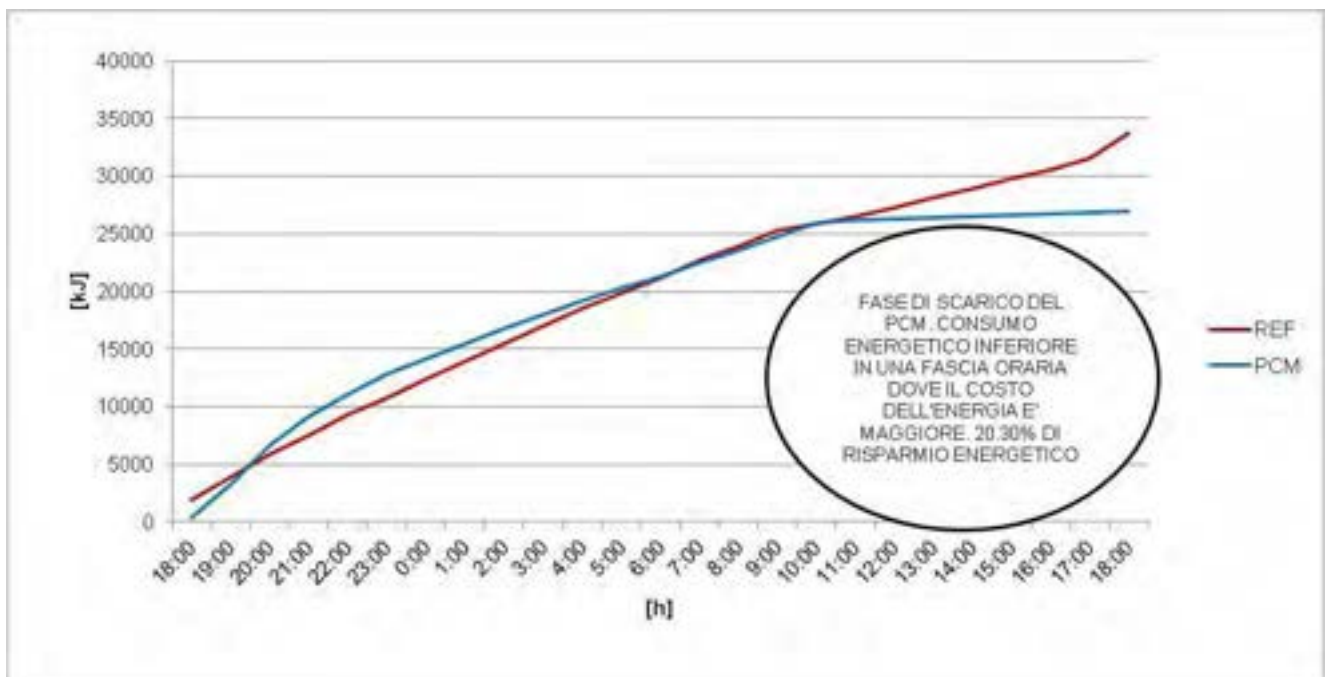


Figura 2.2.2.53: Confronto consumi elettrici delle due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata con $T_{set}=6^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=9^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. E' interessante notare come durante il giorno (8h) la cella col PCM recuperi completamente il maggior consumo della notte (16h) fino ad arrivare nelle 24h ad un risparmio intorno al 25%.

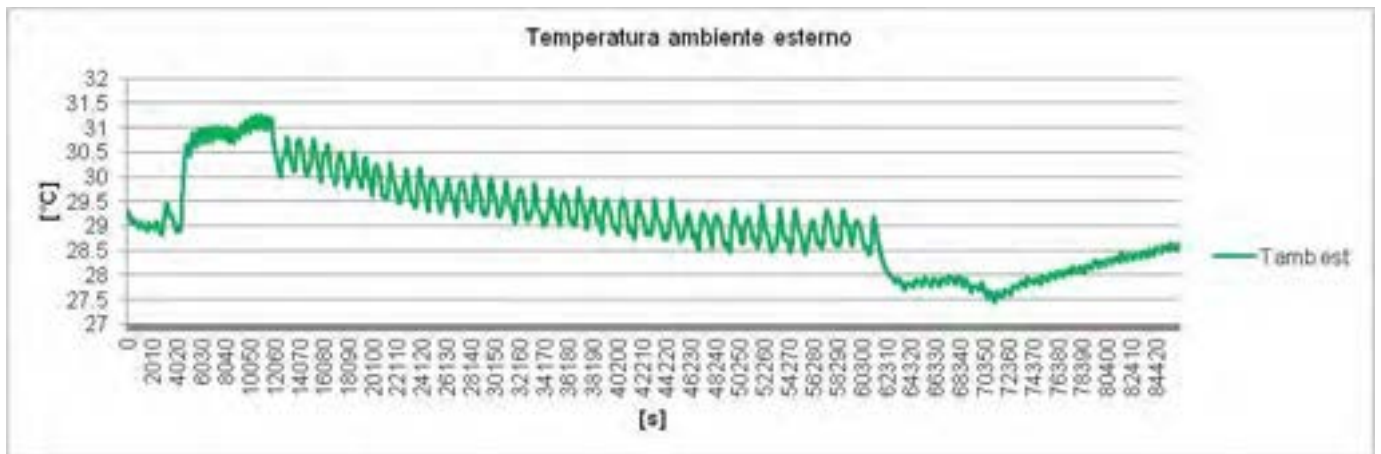


Figura 2.2.2.54: Temperatura del laboratorio presso UNIPM in cui si trovano le due celle (vedi Figura 2.2.1) riportata per completare l'informazione sui consumi energetici. L'intervallo temporale è lo stesso della figura precedente.

Nelle successive 24h la cella col PCM mantiene l'impostazione precedente mentre la cella di riferimento durante la notte (dalle ore 18 alle 10 del mattino successivo, quindi per 16 ore) è impostata con $T_{\text{set}}=5^{\circ}\text{C}$ portandola a $T_{\text{set}}=9^{\circ}\text{C}$ durante il giorno (per le restanti 8 ore).

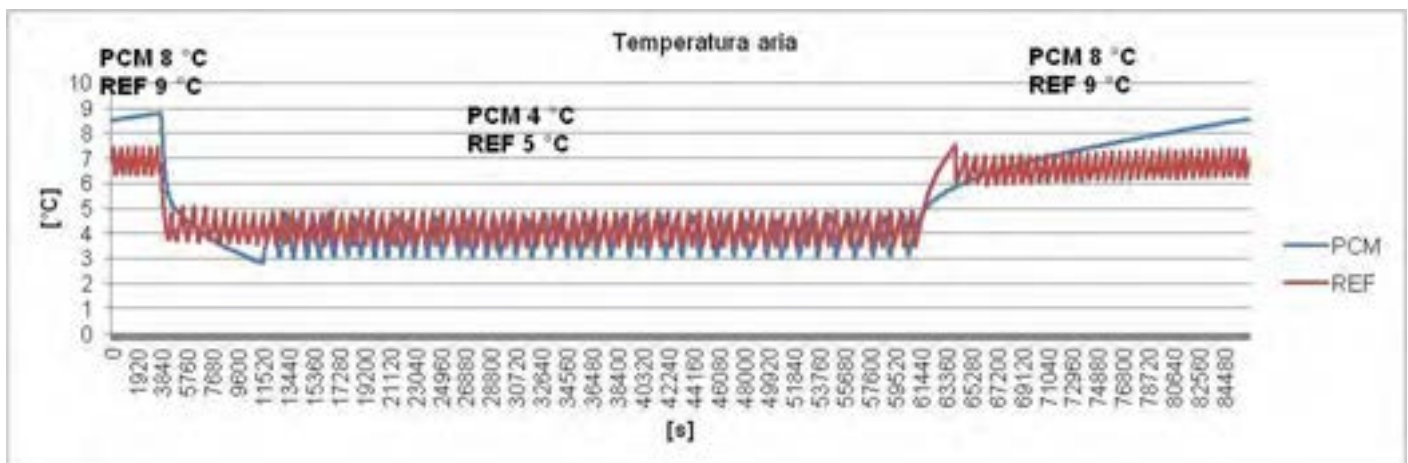


Figura 2.2.2.55: Confronto temperature media dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata con $T_{\text{set}}=5^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{\text{set}}=9^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{\text{set}}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{\text{set}}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno.

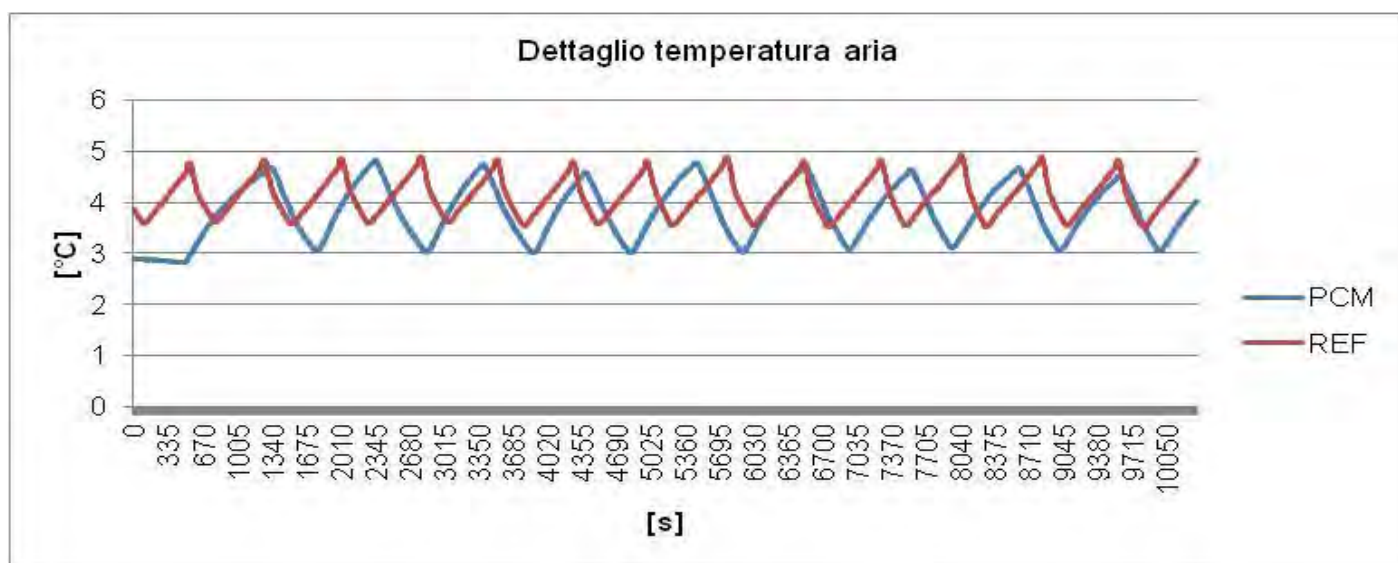


Figura 2.2.2.56: Confronto temperature media dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ oscilla intorno a $T=4.3^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ oscilla intorno a $T=3.7^{\circ}\text{C}$.

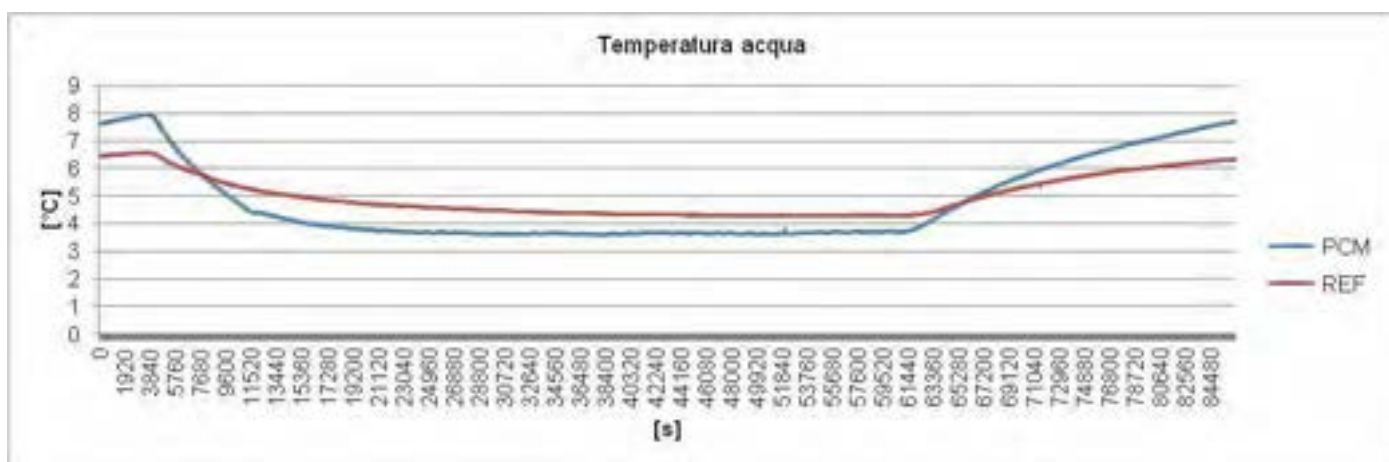


Figura 2.2.2.57: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=9^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno.

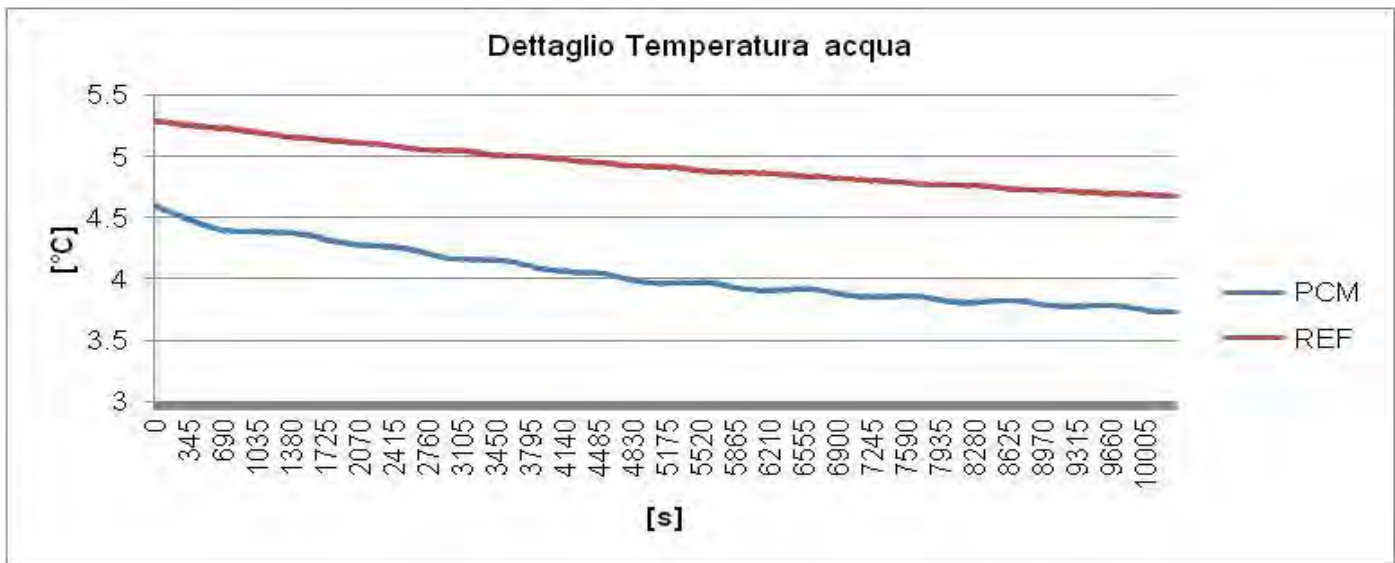


Figura 2.2.2.58: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{set}=5^{\circ}\text{C}$ tende verso 4.6°C . La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ tende verso 3.7°C con lievissime oscillazioni molto lente.

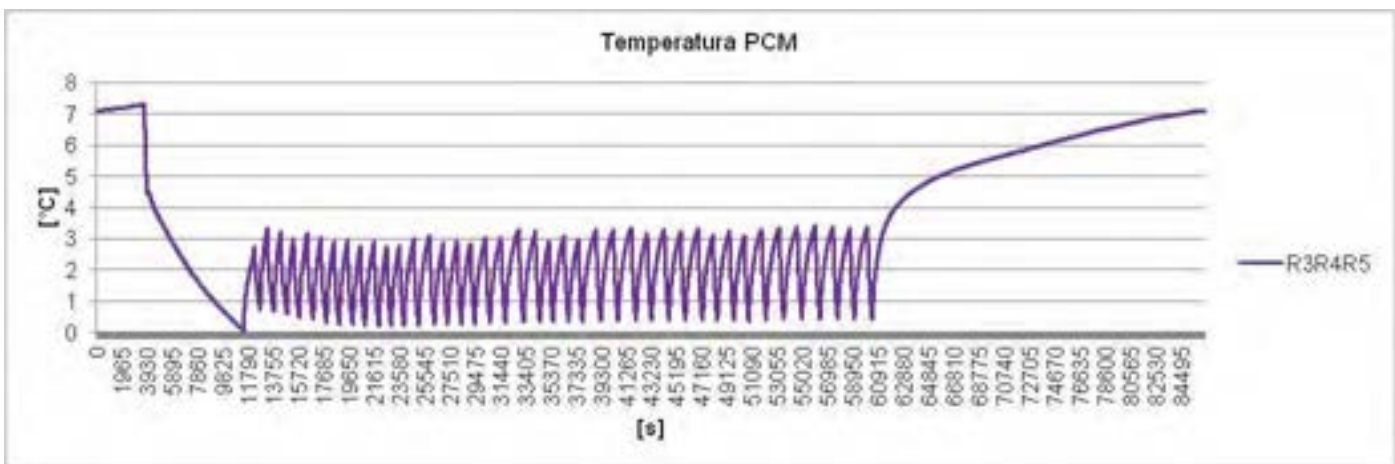


Figura 2.2.2.59: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. Si noti come dalle 10 alle 18 il gruppo refrigerante non si accenda mai.

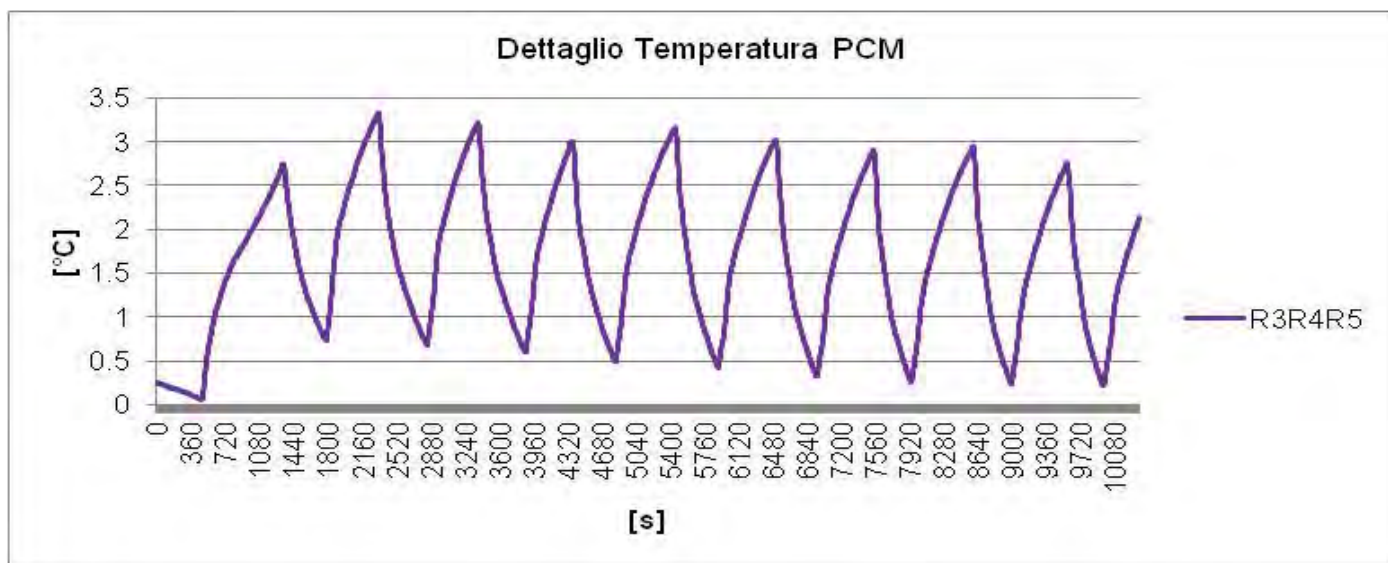


Figura 2.2.2.60: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ non mostra evidente cambiamento di fase del PCM in condizioni stazionarie, ma rallenta comunque la frequenza di accensione del gruppo refrigerante.

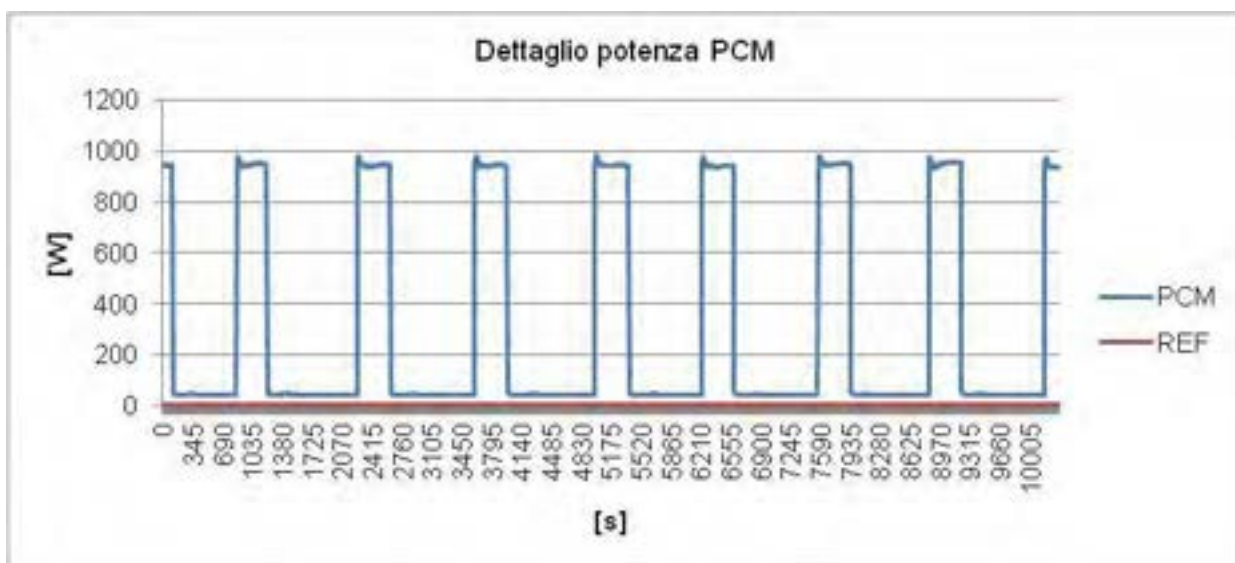


Figura 2.2.2.61: Potenza elettrica utilizzata dalla cella con la scambiatore PCM . La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$, riduce i tempi di accensione del gruppo refrigerante.

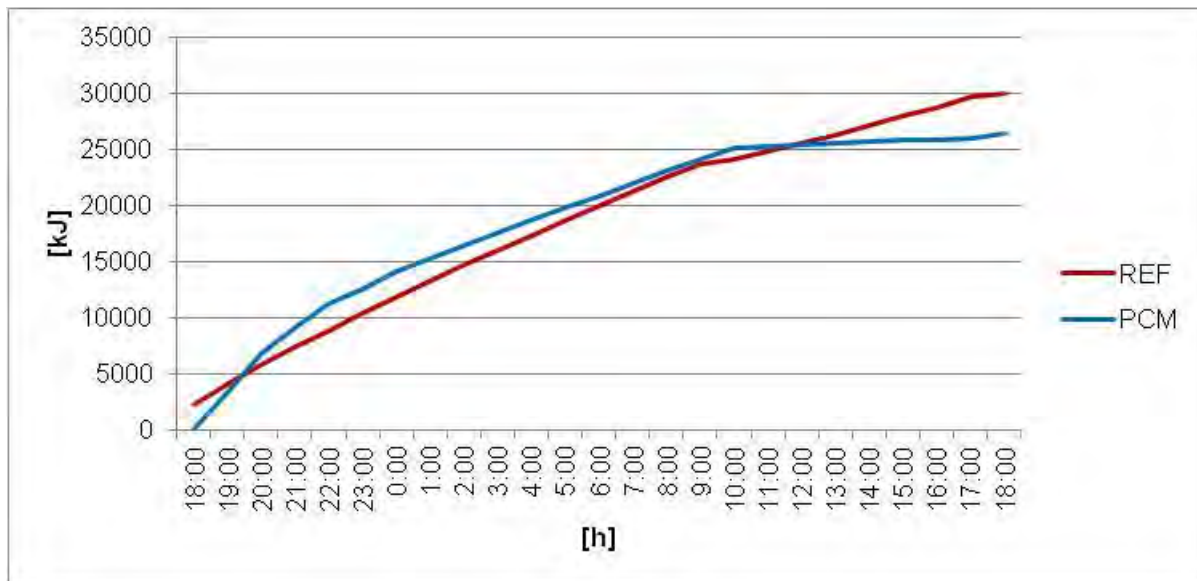


Figura 2.2.2.62: Confronto consumi elettrici delle due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata con $T_{set}=6^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=9^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. E' interessante notare come durante il giorno (8h) la cella col PCM recuperi completamente il maggior consumo della notte (16h) fino ad arrivare nelle 24h ad un risparmio intorno al 15%.

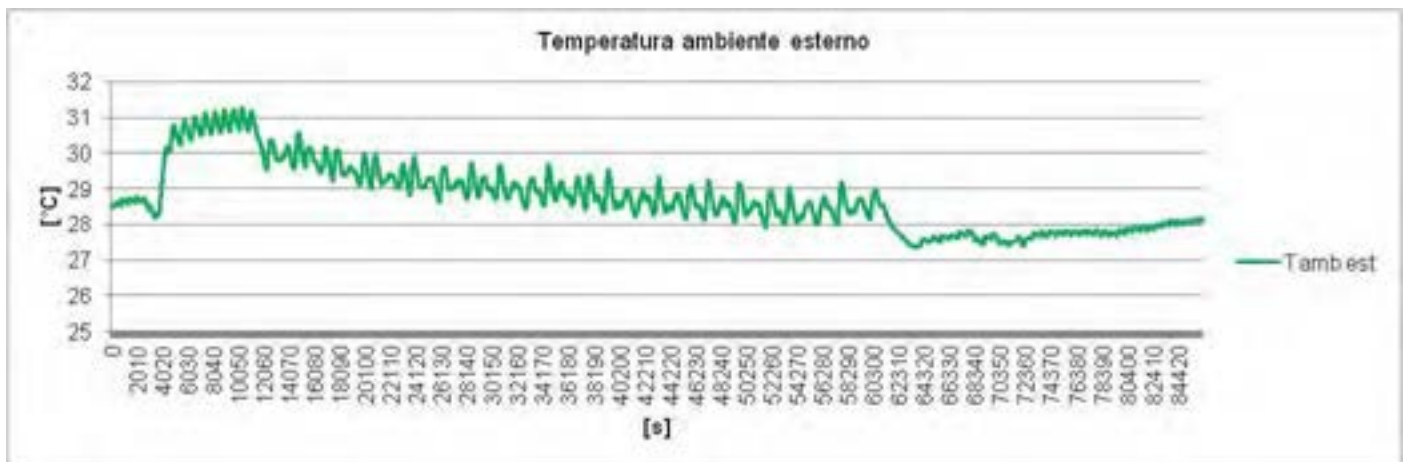


Figura 2.2.2.63: Temperatura del laboratorio presso UNIPM in cui si trovano le due celle (vedi Figura 2.2.1) riportata per completare l'informazione sui consumi energetici. L'intervallo temporale è lo stesso della figura precedente.

Durante le ultime 48h della campagna sperimentale la temperature della cella di riferimento è stata impostata come quella con lo scambiatore, quindi $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ dalle 18 alle 18 del giorno seguente, $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ dalle 18 alle 10 del mattino successivo e infine $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ dalle 10 alle 18.

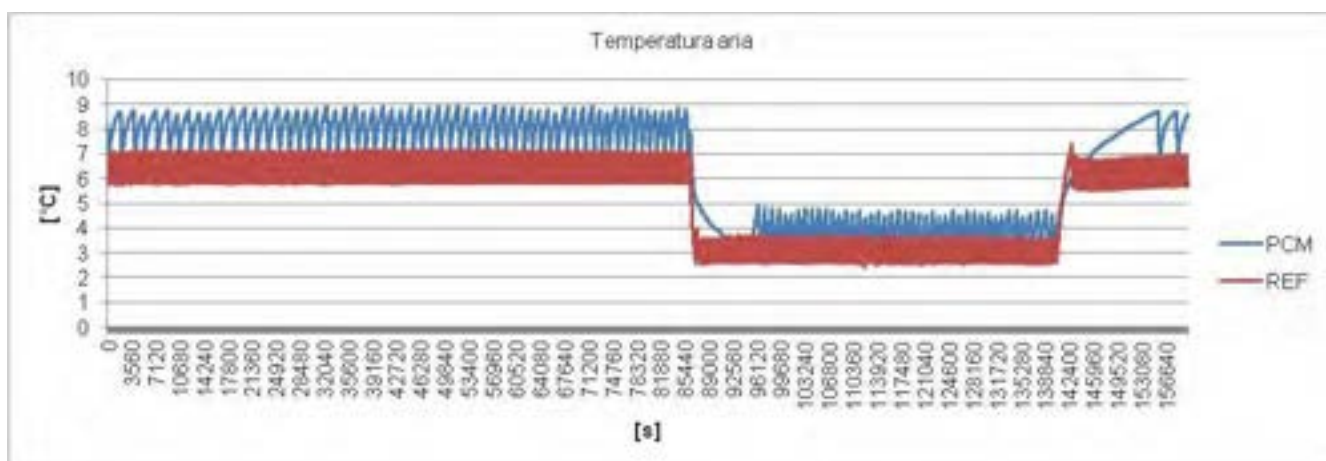


Figura 2.2.2.64: Confronto temperature media dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata come quella con il PCM, con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ durante la seconda notte e con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ il resto del tempo.

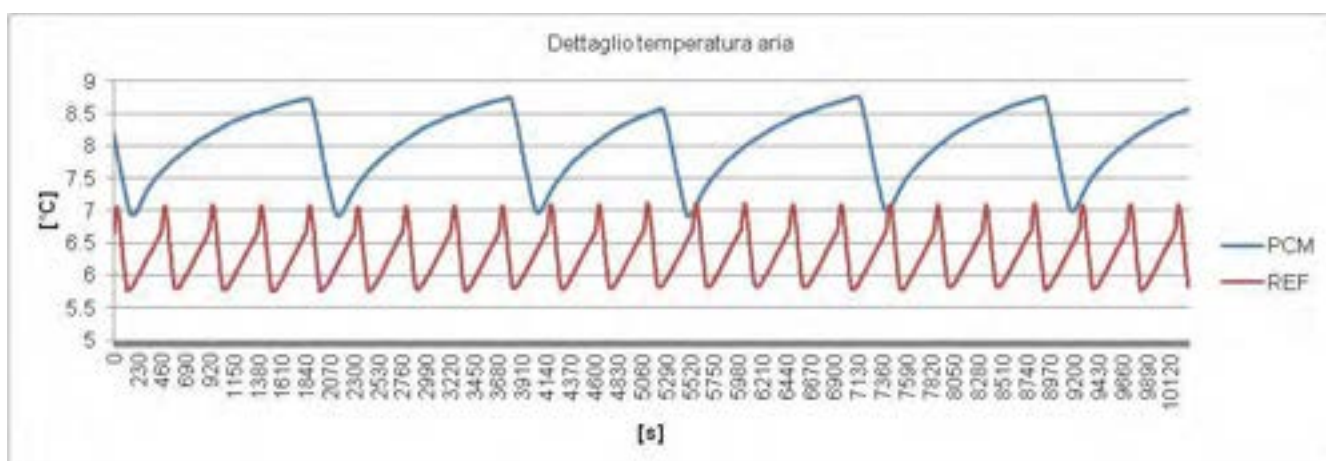


Figura 2.2.2.65: Confronto temperature media dell'aria tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ oscilla intorno a $T=6.5^{\circ}\text{C}$. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ oscilla intorno a $T=7.8^{\circ}\text{C}$ ma la frequenza delle oscillazioni è meno di $\%$.

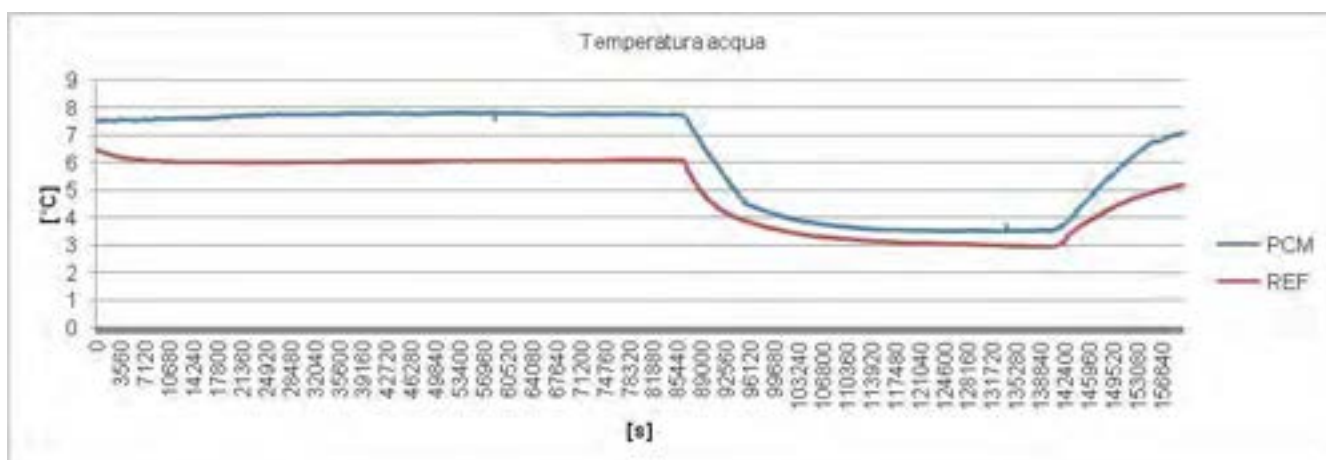


Figura 2.2.2.66: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) è stata impostata come quella con il PCM, con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ durante la seconda notte e con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ il resto del tempo.

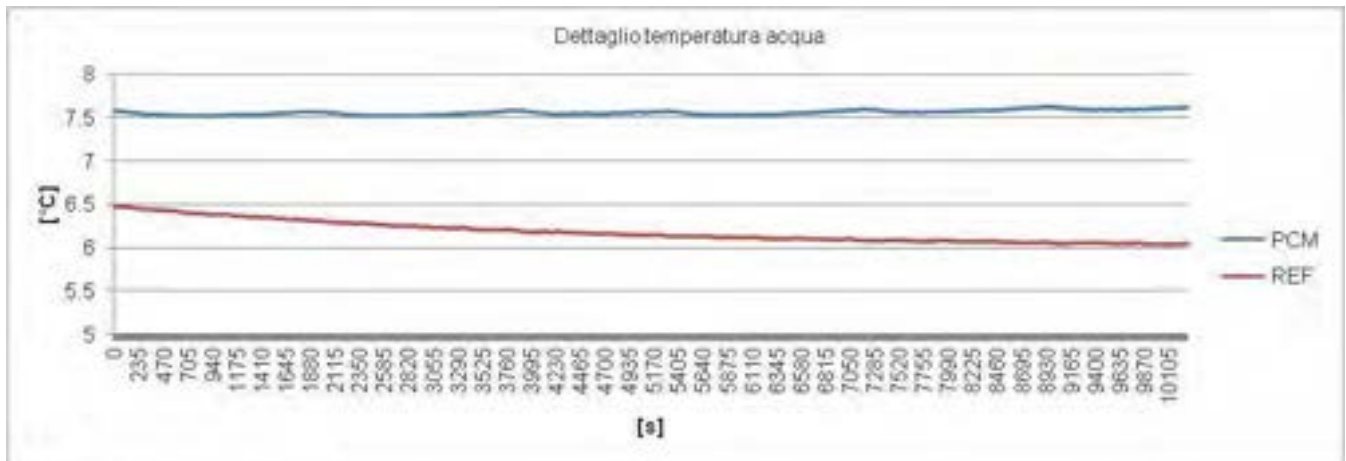


Figura 2.2.2.67: Confronto temperature acqua (indicativa di quella della frutta) tra le due celle. La cella di riferimento (REF) impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ tende verso 6°C . La cella con lo scambiatore (PCM) impostata sempre con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ tende verso 7.5°C con lievissime oscillazioni molto lente.

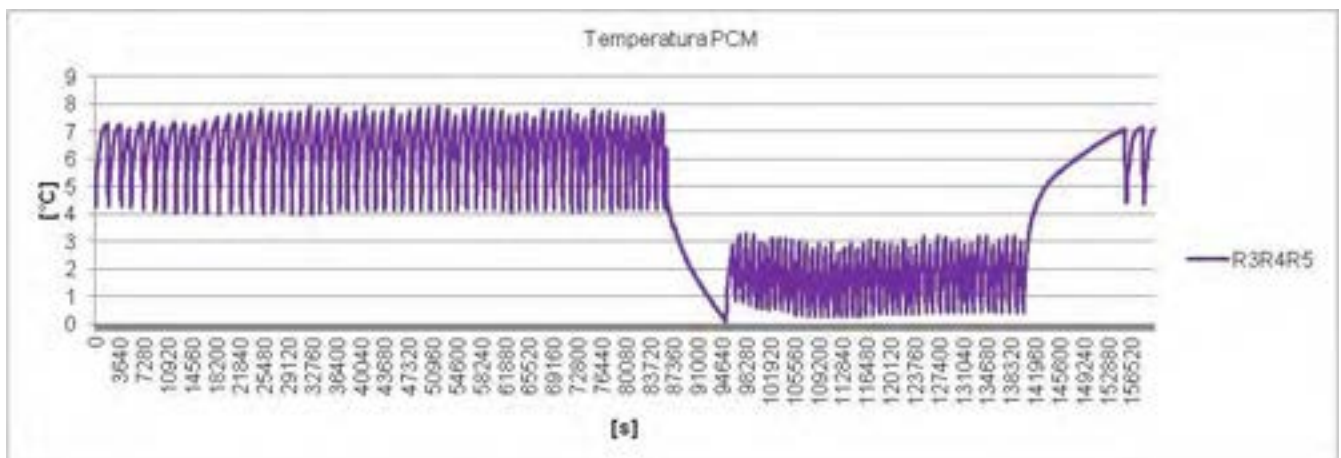


Figura 2.2.2.68: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) è stata impostata con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ durante la notte e con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ durante il giorno. Si noti come dalle 10 alle 18 il gruppo refrigerante non si accenda mai.

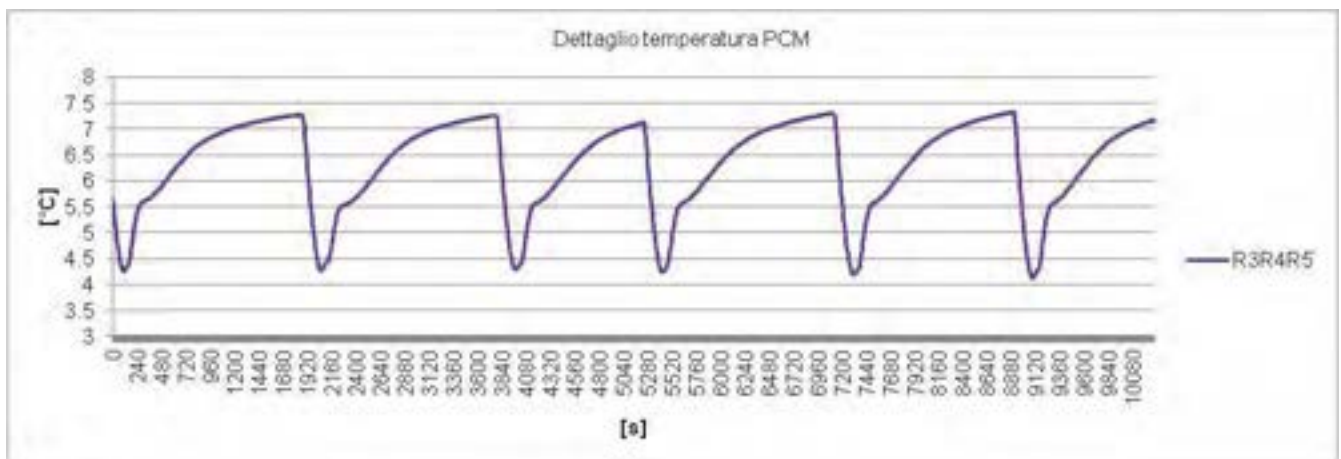


Figura 2.2.2.69: Temperature media (vedi paragrafo 2.2) della superficie dello scambiatore di fronte all'evaporatore. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ mostra un evidente cambiamento di fase del PCM anche in condizioni stazionarie, conseguentemente riduce notevolmente la frequenza di accensione del gruppo refrigerante.

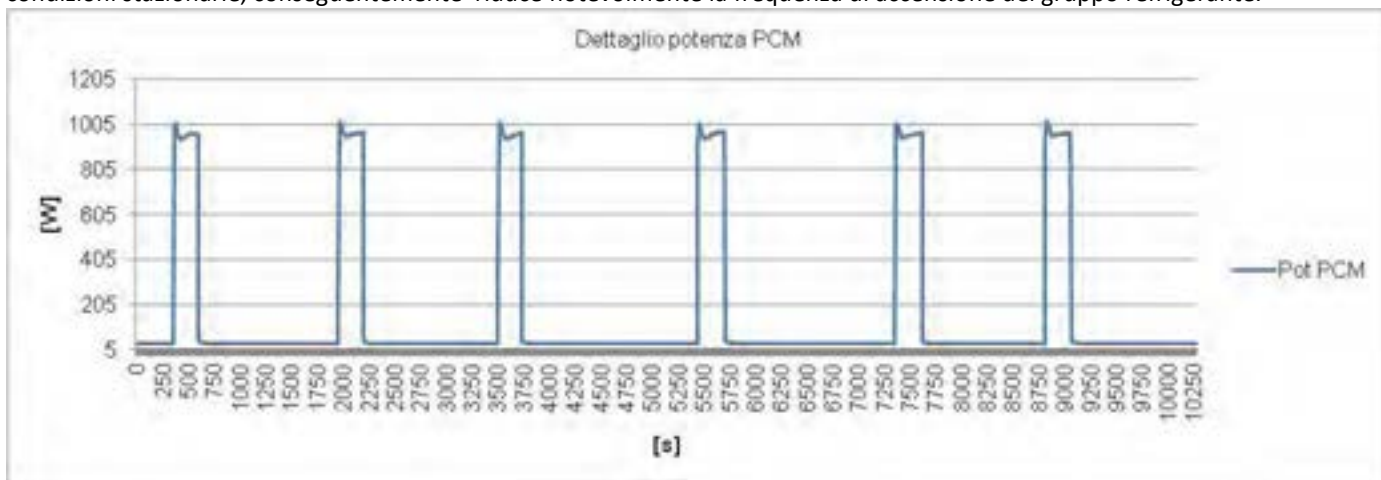


Figura 2.2.2.70: Potenza elettrica utilizzata dalla cella con lo scambiatore PCM. La cella con lo scambiatore (PCM) impostata con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$, riduce drasticamente i tempi di accensione del gruppo refrigerante.

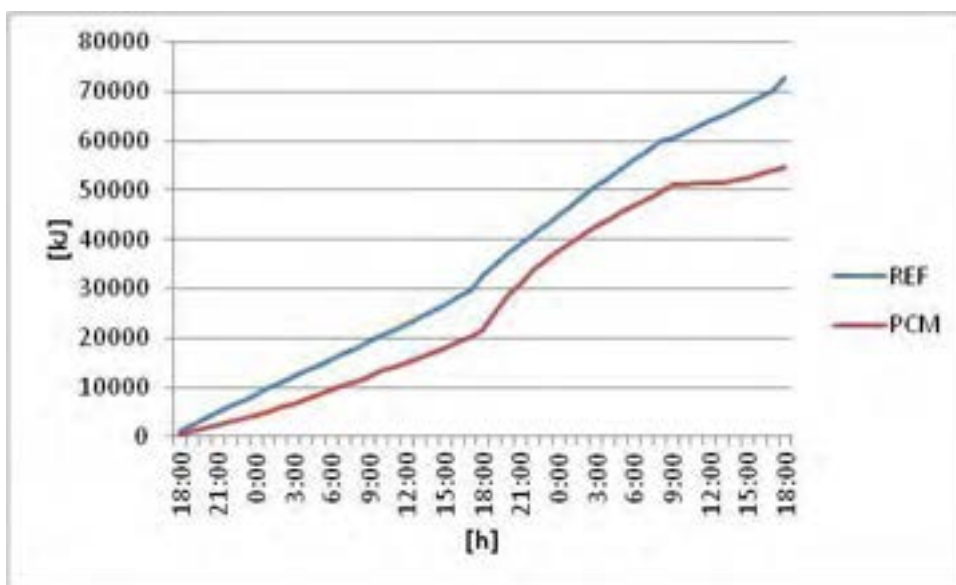


Figura 2.2.2.72: Confronto consumi elettrici delle due celle. Le due celle sono state entrambe impostate con $T_{set}=4^{\circ}\text{C}$ durante le prime 16h e con $T_{set}=8^{\circ}\text{C}$ nelle successive 8h. E' interessante notare come già durante le prime 16h si ha un risparmio del 16% che arriva in 24h ad un risparmio intorno al 26%.

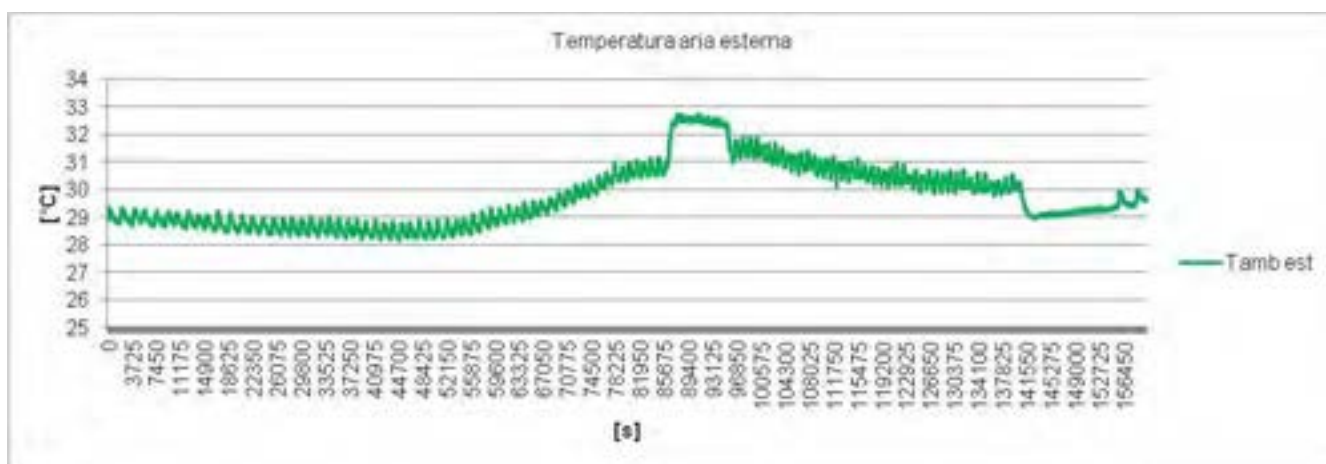


Figura 2.2.2.73: Temperatura del laboratorio presso UNIPM in cui si trovano le due celle (vedi Figura 2.2.1) riportata per completare l'informazione sui consumi energetici. L'intervallo temporale è lo stesso della Figura 2.2.2.64.

3 Conclusioni

In questi anni sono stati approfonditi i diversi utilizzi dei materiali a cambiamento di fase per l'ottimizzazione del funzionamento delle celle frigorifero utilizzate lungo tutta la catena del freddo. Il bilancio energetico di una cella frigorifera è determinato da diversi "carichi termici" legati ai componenti della cella stessa ed alle sostanze che vengono in essa introdotte:

- carico dovuto alla trasmissione di calore dall'esterno verso l'interno attraverso le pareti, il pavimento ed il soffitto, considerando sia celle che si trovano in ambienti interni che quelle poste all'esterno o in viaggio su camion, treni o navi che attraversano condizioni climatiche differenti;
- carico legato all'introduzione della merce che se in equilibrio con l'ambiente esterno ha una temperatura simile a quella dell'aria esterna;
- 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, etc.;
- carichi dovuti alla produzione di calore associata alla respirazione metabolica di frutta e verdura.

Il primo approccio è stato di implementare il materiale a cambiamento di fase direttamente nella stratificazione dei pannelli isolanti che costituiscono la cella frigorifero. Nei primi due anni si è focalizzata l'attenzione verso lo sviluppo di un pannello multistrato pensata per celle che lavorassero all'esterno e/o in viaggio. Sono stati sviluppati e caratterizzati sia meccanicamente che termicamente diversi prototipi di pannello multistrato adatti a realizzare i diversi tipi di cella frigorifero che potessero poi essere prodotti anche con metodi industriali. Diverse tipologie di pannelli isolanti utilizzati attualmente per le celle frigorifero sono state modificate per aggiungere alle funzioni isolanti del pannello stesso le caratteristiche termiche dei materiali a cambiamento di fase. Particolare cura è stata posta nel controllare la compatibilità di queste modifiche con le proprietà meccaniche dei nuovi pannelli in considerazione dei notevoli stress meccanici a cui sono poi sottoposte le celle frigo montate su camion, treni o navi. I prototipi realizzati in quest'ultimo anno, a partire da pannelli isolanti in cui lo strato isolante è una lastra rigida in polistirene, hanno mostrato la possibilità di ottenere pannelli multistrato con ottime proprietà meccaniche e termiche senza complicare il processo di costruzione con la necessità di progettare specifici contenitori per il PCM.

Nel corso di questo terzo anno abbiamo anche esplorato i benefici che l'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase può apportare al gruppo refrigerante, elemento costitutivo critico e attivo di una cella frigorifero. È stata quindi realizzata e caratterizzata una cella frigorifero opportunamente modificata nel suo assetto con l'integrazione di uno scambiatore di calore contenente PCM in corrispondenza dell'evaporatore del gruppo refrigerante. I principali benefici attesi sul comportamento termodinamico della cella frigorifera sono i seguenti:

- 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

La verifica sperimentale complessiva è stata basata sul confronto di due celle identiche di cui una implementata con un prototipo di scambiatore di calore, contenente un adeguato PCM. Le due celle sono state caricate ciascuna con circa 170 kg di frutta fresca e monitorate per oltre due settimane.

La frutta fresca (pesche noci) ha sia costituito il carico termico interno al vano refrigerato che consentito di confrontare le prestazioni delle due celle frigorifero direttamente su una situazione reale. È stato quindi possibile impostare opportunamente i gruppi refrigeranti delle due celle per valutarne le prestazioni

termiche ed i consumi energetici mantenendo praticamente invariate le condizioni di conservazione dei due carichi di frutta. E' stato quindi confermato che l'inserimento del PCM all'interno del vano refrigerato, in corrispondenza dell'evaporatore, porta effettivamente ad un aumento dell'efficienza energetica del sistema, ma soprattutto si sono ottenute interessanti indicazioni su come si possano avere benefici gestionali nella gestione dello stesso gruppo refrigerante. Infatti, esaminando gli andamenti dei vari parametri misurati, si nota come l'uso del PCM abbatta drasticamente il numero di cicli nel tempo di intervento del gruppo frigorifero per dare le stesse condizioni di temperatura all'interno del vano refrigerato. E' proprio la riduzione nel tempo di funzionamento del gruppo refrigerante che porta al minore consumo energetico in condizioni stazionarie di temperatura. La rilevante riduzione dei cicli di funzionamento indica anche una riduzione altrettanto elevata di utilizzo dei componenti elettro-meccanici del compressore 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 di alcune ore. In queste condizioni si utilizza appieno la capacità di immagazzinamento del calore da parte dello scambiatore con PCM che ha il tempo per effettuare completamente il cambiamento di fase. In pratica si può dire che la cella funziona in caratteristiche di semi passività. La capacità del PCM di mantenere a cella spenta i valori di temperatura dell'aria interna alla cella per un tempo assai lungo ha suggerito una modalità di utilizzo delle due celle frigo durante la campagna sperimentale sulla frutta che ha consentito risparmi energetici notevoli (intorno al 50% in 24h) impostando i gruppi di refrigerazione con due diverse temperature di funzionamento, una più bassa durante la notte che consentisse di solidificare il PCM, e l'altra più alta di qualche grado durante il giorno. Il monitoraggio termico completo delle due celle e quello degli spazi di testa per valutare lo stato di conservazione della frutta ha suggerito modalità di controllo del gruppo refrigerante che ottimizzano il consumo energetico della macchina frigorifero adattandola alle condizioni di conservazione del prodotto alimentare. Anche in assenza di un sistema di monitoraggio dello stato di conservazione del prodotto alimentare che possa controllare il gruppo refrigerante, si può pensare di attivare tutte le macchine frigo costituenti gli anelli attivi della catena del freddo solo durante la notte per solidificare il PCM, disinserendole dalla rete durante il giorno quando le temperature esterne sono più elevate. 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 maggiore uniformità di temperature all'interno della cella frigorifero ed un valore di temperatura visto dalla frutta molto più vicino a quello impostato per il gruppo refrigerante.

In conclusione, sono state sperimentate le diverse possibilità di utilizzo dei materiali a cambiamento di fase per il miglioramento del funzionamento delle celle frigorifero, sia esplorando soluzioni che inseriscono il materiale direttamente nel pannello isolante, sia quelle che mirano a ottimizzare il funzionamento del gruppo refrigerante. Entrambi gli approcci suggeriscono interessanti sviluppi, ma il secondo, oltre al vantaggio iniziale di poter utilizzare le celle esistenti, ha evidenziato le potenzialità di sviluppo di celle refrigerate "smart", in cui l'ottimizzazione del funzionamento è esaltata da un "intelligente" controllo del gruppo refrigerante che si adatta all'hardware del sistema complessivo.

4 Riferimenti bibliografici

1. Workshop industriale del progetto europeo FRISBEE (Food Refrigeration Innovations for Safety, consumers' Benefit, Environmental impact and Energy optimization along the cold chain in Europe Refrigeration), Roma 6 marzo 2013.
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 transportation system – a review," *Int. J. Refrig.* vol. 29, pp. 947-957, September 2006.
8. K. Azzouz, D. Leducq, D. Gobin, 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.

5 Abbreviazioni ed acronimi

PCM: Phase Change Materials, i Materiali con Cambiamento di Fase sono materiali accumulatori di calore latente, che sfruttano il fenomeno della transizione di fase per assorbire i flussi energetici entranti, immagazzinando un'elevata quantità di energia e mantenendo costante la propria temperatura. I PCM sono solidi a temperatura ambiente ma quando questa sale e supera una certa soglia, che varia a seconda del materiale, essi si liquefanno accumulando calore che viene sottratto all'ambiente. Allo stesso modo, quando la temperatura scende, il materiale si solidifica e cede calore.

COP: Coefficient Of Performance, il Coefficiente di Prestazione di una macchina frigorifera è definito come il rapporto fra il calore sottratto alla sorgente a temperatura più bassa e il lavoro speso.