



Ricerca di Sistema elettrico

# Sviluppo di strutture multistrato contenenti materiali a cambiamento di fase (PCM) per la realizzazione di celle frigorifere per trasporto su vagoni ferroviari

Paolo Principi, Roberto Fioretti, Benedetta Copertaro



*Università Politecnica delle Marche*  
*DIISM – Dipartimento di Ingegneria*  
*Industriale e Scienze Matematiche*

SVILUPPO DI STRUTTURE MULTISTRATO CONTENENTI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM) PER LA  
REALIZZAZIONE DI CELLE FRIGORIFERE PER TRASPORTO SU VAGONI FERROVIARI

Paolo Principi, Roberto Fioretti, Benedetta Copertaro  
(Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche – Università Politecnica delle Marche)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico  
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA  
Piano Annuale di Realizzazione 2013  
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: Ilaria Bertini

*Ilaria Bertini*

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo di strutture multistrato contenenti Materiali a Cambiamento di Fase (PCM) per la realizzazione di celle frigorifere per trasporto su vagoni ferroviari".

Responsabile scientifico ENEA: Luigi Quercia

Responsabile scientifico DIISM – UNIVPM: Paolo Principi

ENEA  
Unità Tecnica Tecnologie per i Materiali  
Laboratorio Tecnologie Diagnostiche  
Il Responsabile  
Dr. Luigi Quercia

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE .....	6
2 ANALISI TEORICA.....	9
2.1 IMPOSTAZIONE ELABORAZIONI.....	10
2.2 VELOCITÀ DI TRASFERIMENTO.....	13
2.3 DATI CLIMATICI .....	14
2.4 CONDIZIONI AL CONTORNO DI TRASFERIMENTO DEL CALORE.....	16
2.5 MODELLI FUNZIONALI.....	18
2.6 TIPI DI PCM ANALIZZATI .....	19
2.7 SCELTA DEL PCM .....	20
2.8 RISULTATI .....	22
2.8.1 Confronto tra il PCM “RT35” e “RT35HC”.....	22
2.8.2 Confronto tra i modelli funzionali con PCM (senza e con intercapedine).....	25
2.8.3 Carico termico giornaliero – Confronto tra i diversi PCM.....	27
3 ANALISI TECNOLOGICA E REALIZZAZIONE DEI PROTOTIPI CON PCM .....	31
3.1 ANALISI TECNOLOGICA.....	31
3.2 REALIZZAZIONE DEL CONTENITORE DEL PCM E RIEMPIMENTO .....	34
3.3 REALIZZAZIONE DEL PANNELLO SANDWICH.....	38
4 ANALISI SPERIMENTALE .....	42
4.1 ANALISI SPERIMENTALE INDOOR .....	42
4.1.1 Camera di prova .....	42
4.1.2 Sistema di simulazione solare .....	43
4.1.3 Allestimento della camera di prova.....	45
4.1.4 Il sistema di acquisizione dei dati .....	46
4.2 ANALISI SPERIMENTALE OUTDOOR.....	50
4.2.1 Allestimento della celle frigorifera di prova .....	50
4.2.2 Sistema di monitoraggio .....	52
4.2.3 Risultati delle prove sperimentali.....	54
5 CONCLUSIONI.....	62
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	64
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	66
8 CURRICULUM SCIENTIFICO DEI COMPONENTI DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL’ATTIVITÀ.....	67
8.1 CV - PAOLO PRINCIPI .....	67
8.2 CV- ROBERTO FIORETTI .....	68
8.3 CV- BENEDETTA COPERTARO.....	68
ALLEGATO 1 .....	69
ALLEGATO 2 .....	73
ALLEGATO 3 .....	77

## Sommario

La presente relazione descrive gli sviluppi della ricerca condotta da Settembre 2013 a Settembre 2014 sull'utilizzo dei materiali in passaggio di fase (PCM) per ridurre il consumo di energia elettrica per la conservazione di merci refrigerate nel trasporto ferroviario, inserendo il suddetto materiale innovativo all'interno delle pareti che costituiscono l'involucro della cella frigorifera. Considerando il forte interesse del settore scientifico e di quello industriale per l'introduzione dei materiali in passaggio di fase nelle campo delle costruzioni edilizie, ma anche nei settori della sanità, della sicurezza ed altro, e tenendo conto della necessità di ridurre il consumo di energia nella rete elettrica nazionale, è stata promossa l'attuale attività di ricerca che ha visto compiuto il secondo anno di attività.

I lavori oggetto della relazione sono consistiti in una prima analisi teorica, attivata sui risultati raggiunti nel primo di attività, e da una successiva importante attività sperimentale che ha permesso la validazione dei risultati teorici e la valutazione in campo di pannelli innovativi che potranno essere utilizzati nella realizzazione di container refrigerati.

Più in dettaglio per la fase teorica è stata ampliata ed aggiornata la ricerca bibliografica sul campo della refrigerazione e dagli studi è emerso come recentemente siano stati effettuati sia tentativi di applicazione dei PCM agli scambiatori delle macchine frigorifere delle celle, per aumentarne l'efficienza energetica, sia di inserimento degli stessi nelle stratificazioni degli involucri delle celle per il trasporto su gomma.

Ma il più importante aspetto che ha caratterizzato la fase teorica, rispetto a quanto effettuato nel primo anno, è stata l'estensione dell'analisi di comportamento energetico dei modelli funzionali di pannelli ad una più vasta gamma di PCM tra i quali è stato introdotto un materiale "evoluto", caratterizzato da un elevato calore latente di fusione in un più ristretto campo di temperatura di passaggio di fase. Dai risultati dell'investigazione ha preso avvio il calcolo delle prestazioni energetiche dell'intero sistema refrigerato. Sono stati scelti due modelli funzionali di pannelli di chiusura della cella: il primo che prevede lo strato di schiuma poliuretanicata attaccato direttamente a quello di PCM, pacchetto questo compreso tra due sottili lamiere di acciaio esterne, il secondo, identico al primo, ma con una intercapedine ventilata inserita tra PCM e isolante termico. La presenza nell'analisi del secondo modello di stratificazione ha avuto lo scopo verificare l'entità del possibile incremento teorico della capacità scarico del calore latente del PCM, sia in fase di stazionamento che di viaggio del convoglio ferroviario in particolari condizioni climatiche esterne. Tale esercizio è stato effettuato con la consapevolezza delle notevoli difficoltà di introduzione sulla parte esterne dell'ipotetico container refrigerato di un intercapedine d'ari considerando le caratteristiche costruttive inserite nelle norme tecniche internazionali (ISO) che regolano le dimensioni esterne ed interne del manufatto, ma anche la resistenza alle sollecitazioni meccaniche derivante da urti durante la movimentazione o il trasporto su mezzi di trasporto di terra, mare e cielo. Pertanto sono state eseguite analisi numeriche agli elementi finiti sia sui due modelli di stratificazione che su quello di una di cella container standard. Il software utilizzato è stato il ComSol Multiphysics®, interfacciato con il Heat Transfer Module, specialistico per lo studio di fenomeni di trasferimento del calore. Le elaborazioni numeriche sono state effettuate sotto particolari condizioni al contorno riguardanti i parametri ambientali delle fasce climatiche caratterizzanti l'Italia (Nord, Centro e Sud), la velocità di trasporto delle celle frigorifere (convoglio fermo e viaggiante a 60 km/h), variando i PCM scelti tra paraffine e sali idrati.

A seguito dei risultati dell'analisi teorica è stato scelto il modello funzionale definitivo e su questo sono state eseguite la progettazione e la costruzione prima di prototipi di packaging del PCM poi del pannello di tamponamento della cella. I prototipi realizzati sono stati utilizzati per la implementazione di una cella frigorifera innovativa che sperimentalmente è stata messa a confronto con una cella tradizionale di identiche dimensioni e potenza frigorifera. Le pratiche sperimentali hanno ovviamente richiesto la progettazione e realizzazione di un completo sistema di monitoraggio che ha permesso l'acquisizione e la registrazione dei dati di comportamento energetico delle celle. In definitiva sia il pannello prototipo che la cella frigorifera sono stati testati sia in laboratorio indoor che in quello outdoor. In quest'ultimo, l'uso di una camera climatica e di un simulatore solare, ha permesso la produzione di indagini parametriche di temperatura e flusso solare per verificare il peso degli stessi sul comportamento energetico del pannello. La

sperimentazione nel Laboratorio all'aperto di Energetica Ambientale, ha invece permesso il confronto di comportamento della cella implementata con PCM con quello di una identica cella base, sotto reali condizioni climatiche. In conclusione sono è stata effettuato il confronto tra i dati emersi dalle elaborazioni numeriche e dalle pratiche sperimentali confermando una buona convergenza di risultati.

## 1 Introduzione

Il lavoro svolto nel secondo anno di attività si inquadra nel contratto per l'innovazione tecnologica nell'ambito del trasporto refrigerato su vagoni ferroviari attraverso l'uso di Materiali a Cambiamento di Fase (PCM) destinati a perseguire il risparmio energetico attraverso la riduzione del consumo di energia elettrica.

La ricerca propone l'applicazione dei materiali a cambiamento di fase sulle superfici esterne delle celle frigorifere con l'intento di ridurre i carichi termici entranti nella cella refrigerata derivanti dall'assorbimento della radiazione solare e dalla differenza di temperatura tra l'aria esterna del periodo estivo e quella interna alla cella. Poiché il mantenimento delle condizioni di temperatura ottimale all'interno della cella frigorifera è dovuto al funzionamento di una macchina frigorifera elettrica a compressione funzionante secondo il ciclo inverso di Carnot, è evidente che l'aumento dei carichi termici entranti nel vano refrigerato fa aumentare il periodo di funzionamento della macchina frigo, fa aumentare la potenza impegnata di compressione e quindi produce l'aumento del consumo di energia elettrica. La presenza del materiale in passaggio di fase ha inoltre lo scopo di garantire un più lungo periodo di mantenimento delle caratteristiche fisiche dei materiali refrigerati, contenuti all'interno della cella, anche in fase di black-out elettrico in quanto l'inerzia termica introdotta nell'involucro della cella dal PCM, diminuendo i carichi entranti, determina il mantenimento della temperatura ottimale interna per un periodo la cui lunghezza è legata al tipo di Materiale in passaggio di fase utilizzato, al suo spessore, alla composizione della stratificazione del pannello di tamponamento e infine alle caratteristiche di velocità di avanzamento della cella ed ambientali del luogo di stazionamento o passaggio.

La ricerca che dovrebbe avere un'articolazione triennale, è giunta al termine del secondo anno di un programma generale che prevedeva un primo anno di valutazioni preliminari, un secondo anno di ingegnerizzazione del sistema e un possibile terzo anno per la sperimentazione, attraverso monitoraggio, su veicolo viaggiante in condizioni reali, previa realizzazione di container refrigerato da azienda specializzata del settore.

Con maggiore dettaglio, il primo anno di ricerca ha visto realizzare una serie di simulazioni numeriche su modelli semplificati di pannello, eseguite con un software di calcolo che utilizza gli elementi finiti, sviluppate variando le condizioni climatiche, l'esposizione, il tipo di materiale a cambiamento di fase, e lo spessore di tale materiale. Dai dati ottenuti è possibile estrapolare informazioni utili al dimensionamento dello strato di materiale a passaggio di fase e valutare il beneficio in termini energetici dell'applicazione.

L'ultima fase ha riguardato una prima sperimentazione dell'applicazione di PCM su celle frigorifere sottoposte a condizioni climatiche reali esterne. In tale sperimentazione, condotta durante il periodo estivo, sono stati monitorati due moduli della stessa tipologia, differenziati dalla presenza o meno dello strato di PCM in copertura. Per tale analisi sperimentale, un sistema di packaging costituito da elementi modulari in alluminio è stato realizzato. Alla fine del lavoro è stato effettuato un confronto tra i dati ottenuti dall'analisi numerica con i dati sperimentali.

Alla luce di quanto emerso dai lavori del primo anno, nel secondo anno, oggetto della presente relazione, si è proceduto alla progettazione termica e tecnologica dei pannelli contenenti il materiale in passaggio di fase e al successivo utilizzo dei prototipi prodotti nelle sperimentazioni di laboratorio indoor ed outdoor. Le prime hanno avuto lo scopo di testare singolarmente il pannello prototipo, mentre le seconde quello di confrontare le prestazioni energetiche delle celle dotate di PCM sull'intero involucro la costruzione della cella frigorifera innovativa, successivamente utilizzata per la fase sperimentale, sviluppata nel laboratorio outdoor.

Le fasi in cui si sono svolte le attività hanno avuto nel loro complesso l'obiettivo di confermare la bontà del progetto termico prima e tecnologico poi e quindi, attraverso la validazione sperimentale dei risultati teorici, giungere alla completa ingegnerizzazione dell'involucro delle celle frigorifere.

Più in dettaglio i lavori del secondo anno di attività hanno avuto la seguente articolazione:

1. Approfondita ricerca bibliografica destinata ad evidenziare le principali tecnologie applicate agli scomparti refrigerati installati su mezzi di trasporto ferroviario. Sono stati individuate ed esaminate, le norme tecniche nazionali ed internazionali che regolano le modalità costruttive di container refrigerati, si è fatto un maggiore approfondimento sulle tecniche di costruzione degli scomparti e sulla classificazione dei materiali utilizzati, soprattutto in relazione alle loro caratteristiche termo igrometriche, dimensionali e prestazionali. Si sono analizzati i livelli di temperatura utilizzati all'interno degli scomparti refrigerati in funzione dei materiali contenuti al loro interno ed i livelli di ventilazione richiesti per l'omogeneizzazione delle temperature all'interno dello scomparto.
2. Analisi della gamma di sostanze PCM presenti sul mercato internazionale per la individuazione dei materiali più appropriati per agire ai vari livelli di temperatura di funzionamento dello scomparto refrigerato e per le varie condizioni ambientali esterne nelle quali il mezzo di trasporto si troverà ad operare, sia in movimento che in fase di sosta.
3. Analisi numerica del comportamento energetico del pacchetto di involucro ottimale sul quale è stato applicato il PCM scelto attraverso l'analisi precedente. Le analisi sono state articolate secondo diverse velocità di avanzamento del mezzo refrigerato, le diverse latitudini alle quali il mezzo potrebbe viaggiare. Analisi numerica, sotto le stesse condizioni, di cella analoga alla precedente, ma priva del PCM. Confronto tra i dati di flusso termico e temperature emerse dalle diverse elaborazioni per la stima del risparmio energetico.
4. progettazione del sistema contenimento dei PCM per l'inserimento all'interno della stratificazione. Il risultato ottenuto deriva dalla sintesi della scelta dei materiali da costruzione, delle geometrie di contenimento più appropriate per resistere alle sollecitazioni termiche e meccaniche ed infine della tecnica di riempimento e sigillatura del sistema di packaging. Il risultato finale è stato raggiunto dopo la sperimentazione di alcuni differenti prototipi.
5. Alla luce dei risultati raggiunti dalle fasi precedenti si è progettato il prototipo di pannello che, sulla base delle analisi teoriche sui vari modelli funzionali, prevede la posizione del pannello di packaging contenente il materiale in passaggio di fase all'interno della parete tradizionale all'interfaccia tra il lamierino di protezione esterna e lo strato di schiuma poliuretanic. Attaccando il foglio di sigillatura del contenitore del PCM alla superficie interna del lamierino di protezione esterna del pannello, si otterrà una continuità per il flusso termico conduttivo proveniente dalla superficie esterna del foglio metallico assicurando così la funzione di scudo termico da parte del materiale che fonde. Su questa base sono stati realizzati pannelli prototipi sia del pannello innovativo che di quello tradizionale da sotto porre ai test sperimentali necessari a validare i risultati teorici ottenuti attraverso le simulazioni numeriche.
6. Analisi sperimentale indoor. Il pannello innovativo è stato analizzato nel suo comportamento termico in camera climatica nella quale sono state riprodotte alcune delle principali condizioni ambientali esterne più significative al fine della caratterizzazione energetica. In particolare sono stati instaurati valori delle temperature dell'aria interna ed esterna vicini ai valori massimi di regime di funzionamento, ma soprattutto la superficie esterna è stata irraggiata con flussi radianti aventi spettro elettromagnetico simile a quello della massima radiazione solare. Per il confronto nel comportamento energetico con il pannello tradizionale, attualmente usato nella costruzione delle celle frigorifere, analoghi test sono stati condotti su questo ultimo modello funzionale.
7. Analisi sperimentale outdoor. La sperimentazione all'aperto è stata effettuata attraverso l'uso di due celle frigorifere di identica costruzione presenti dal primo anno di ricerca sull'area esterna del Laboratorio di Energetica Ambientale del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche della UPM (Figura 1).



**Figura 1. Le celle frigorifere identiche installate sulla superficie all'aperto del Laboratorio di Energetica Ambientale**

Ricordando che il modello KLC di cella frigorifera negativa della ditta MISA ha dimensioni esterne di: 143 cm x 143 x 223 cm di altezza e spessore del pannello di 10cm e che l' impianto frigorifero monoblocco mod. FB3G su di essa installato ha una resa di 1150 W (980 frig/h), alla temperatura dell'aria esterna di 32°C e di 950 W (820 frig/h), alla temperatura dell'aria esterna di 43°C, si è proceduto alla implementazione di una delle due con lo strato di PCM, secondo le indicazioni ottenute dalle simulazioni numeriche.

8. Infine sono stati effettuate le analisi ed i confronti dei risultati per validare il modello definitivo e raggiungere così le conclusioni i cui contenuti sono destinati ad essere utilizzati nella formulazione del programma di un eventuale terzo anno di ricerca.

## 2 Analisi teorica

Le analisi numeriche sono state realizzate mediante il software COMSOL Multiphysics®, che interfacciato con il modulo “Heat Transfer Module”, offre un efficace strumento di simulazione per analizzare i meccanismi di scambio termico che si attuano in sistemi complessi. Esso è uno strumento di calcolo agli elementi finiti (FEM), con il quale è stato possibile analizzare il comportamento termico delle diverse opzioni stratigrafiche ipotizzate. I risultati ottenuti hanno quindi permesso di stilare una graduatoria prestazionale, in termini di riduzione dei flussi termici entranti e delle temperature superficiali riscontrabili all’interno dell’involucro. Per effettuare le simulazioni è stato utilizzato il portale Cresco Enea e le simulazioni effettuate in remoto sul Cluster di Portici con il programma FARO.

Il pannello sandwich denominato “base”, caratteristico degli attuali involucri delle celle frigorifere, è stato analizzato nel suo comportamento termico ed i risultati delle elaborazioni numeriche sono stati confrontati con quelli ottenuti su modelli funzionali aventi una stratigrafia analoga alla base, ma implementata con uno strato di PCM, per diversi tipi di PCM. Più precisamente è stato pensato un primo modello nel quale la stratigrafia prevede, partendo dall’interno: lamierino d’acciaio preverniciato, schiuma poliuretana, PCM e lamierino d’acciaio preverniciato esterno. Poi, considerando casi di situazioni climatiche particolari, per aumentare le capacità di scarico del calore latente di fusione e solidificazione del PCM è anche stata ipotizzata, analizzata e messa a confronto con le altre due, una stratigrafia concepita come quella del modello precedente, ma caratterizzata dall’inserimento di una intercapedine di aria tra lo strato di PCM e quello di schiuma poliuretana.

Questo ultimo modello ha avuto origine dai risultati delle simulazioni prodotte durante il primo anno della ricerca i quali hanno mostrato, per determinati orientamenti e località climatiche, problemi connessi con la solidificazione del PCM durante le ore notturne.

Il terzo modello funzionale è stato quindi sviluppato per verificare la possibilità di solidificazione del PCM durante le ore notturne, assicurando quindi la ciclicità di funzionamento giornaliero anche in condizioni climatiche particolari.

Poiché i convogli merci viaggiano sulla rete ferroviaria con una velocità massima di 100 km/h e tenendo conto che a maggiore velocità aumento i coefficienti di scambio termico medi convettivi valutati sulla superficie esterna della cella, per un calcolo prudenziale di fattibilità dei fenomeni di fusione, scarico e solidificazione del PCM, le elaborazioni sono state eseguite con una velocità del carro frigo di 60 km/h, ma le valutazioni sono state eseguite anche a convoglio fermo, per analizzare i comportamenti energetici dei modelli funzionali con input di radiazione solare incidente all’esterno e aria ambiente stagnante.

Poiché il convoglio viaggia sull’intero territorio nazionale, passando da fasce climatiche caratterizzate da clima mediterraneo a quelle vicine al clima continentale, le elaborazioni numeriche sono state condotte per caratteristiche climatiche di città capoluogo di regioni posizionate a latitudini del sud, centro e nord Italia.

Poiché i cinque pannelli costituenti l’involucro del container refrigerato, base a parte, sono orientati diversamente, si sono prodotte analisi dei modelli funzionali con orientamenti Nord, est, Sud Ovest ed orizzontale.

Riassumendo, le numerose elaborazioni numeriche di cui si dà di seguito descrizione e risultati, sono state eseguite secondo la complessa griglia dei parametri variabili riportati nella seguente tabella 1

modelli funzionali	parametri ambientali	velocità di trasferimento	PCM	Orientamento
base	Nord Italia (Milano)	Veicolo fermo	8 Paraffine	Est
PCM	Centro Italia (Ancona)	60 km/h	1 Sale idrato	Sud
PCM + intercapedine	Sud Italia (Palermo)			Ovest
				Nord
				Orizzontale

**Tabella 1. Griglia dei parametri fisici e ambientali.**

## 2.1 Impostazione elaborazioni

Come ricordato in precedenza, con riferimento alla Tabella 1, le simulazioni numeriche sono state articolate secondo una griglia di condizioni al contorno e cioè considerando l'ipotesi di pannelli applicati a carro ferroviario a temperatura controllata tipo "INTERFRIGO" viaggiante con due diverse velocità e sotto diverse condizioni climatiche caratteristiche delle tre ipotetiche fasce geografiche di Italia. I risultati delle simulazioni hanno previsto la valutazione delle temperature superficiali interne ed esterne dei modelli funzionali e dei flussi termici entranti nel pannello sottoposto all'incidenza del flusso solare caratteristico, per ogni fascia climatica, degli orientamenti Nord, Sud, Ovest, Est per le pareti verticali della cella e della posizione orizzontale per il pannello di copertura. La griglia di opzioni di calcolo si completa poi con l'assunzione di esaminare tre tipologie di modello funzionale: a) modello "base", attualmente usato nella costruzione delle celle frigorifere, b) modello innovativo, contenente PCM con inserita nella stratigrafia una intercapedine d'aria c) modello innovativo compatto contenente PCM.

Nello schema a blocchi della figura 2 si propone l'articolazione dei flussi di calcolo con la quale è stato prodotto il processo di simulazione numerica relativa ai modelli b e c.

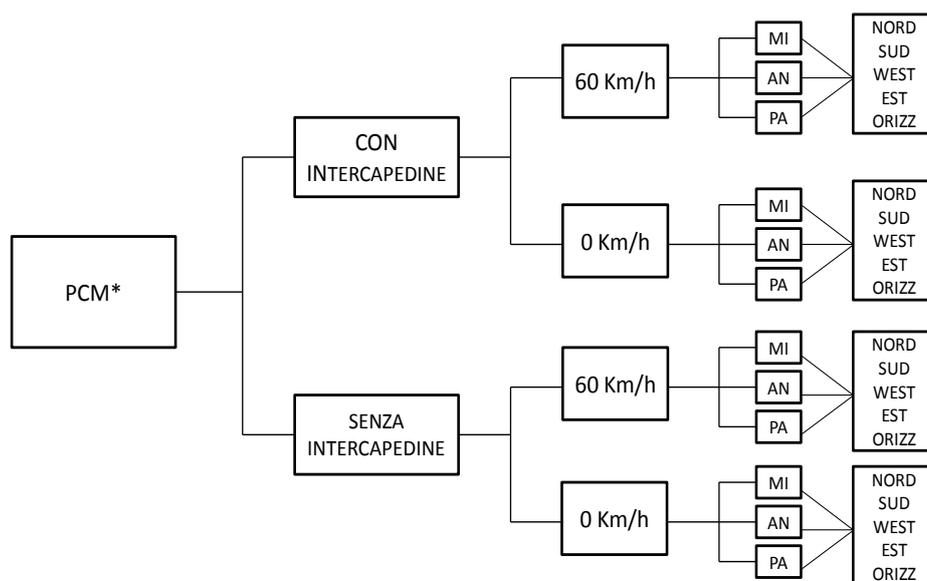
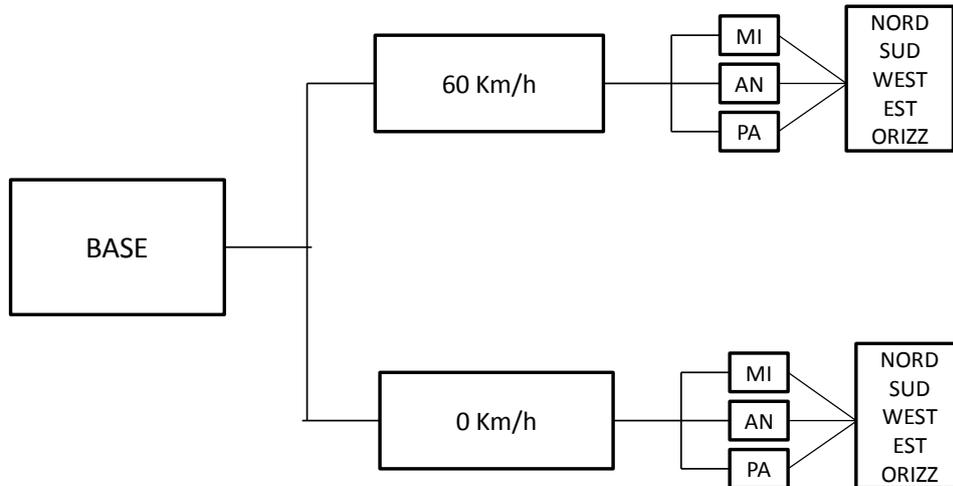


Figura 2: Schema simulazioni modelli (b) e (c) (\*PCM di diversa natura)

Nella descrizione delle fasi di ricerca che verrà presentata successivamente si mostrerà come per una completa analisi delle possibilità di scelta di materiali in passaggio di fase si sia articolato lo studio su una vasta gamma di PCM tra i quali quello usato negli studi del primo anno di ricerca denominato RT35 e quello che come si vedrà è stato il protagonista delle investigazioni del secondo anno, oggetto della relazione presente.

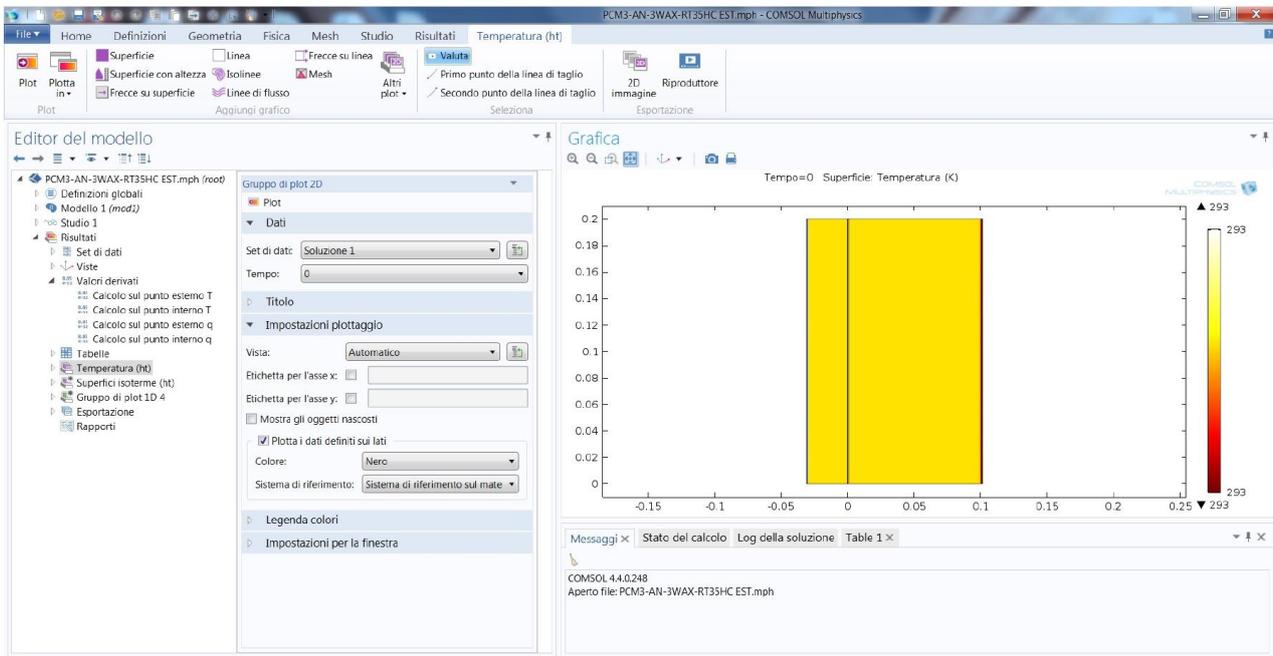
Alla luce di questi presupposti il programma di lavoro si è articolato eseguendo le elaborazioni relative al modello funzionale "pannello con intercapedine" solo per i materiali RT35 e RT35HC, mentre per il pannello "pannello senza intercapedine" le valutazioni sono state estese a tutta la gamma di PCM presenti nell'elenco riportato nella Tabella 6.

Per il modello funzionale del pannello "base", privo di PCM, le elaborazioni sono state limitate a quelle previste dallo schema a blocchi di figura3.



**Figura 3: Schema simulazioni modello (a)**

Per visualizzare sequenze delle elaborazioni numeriche effettuate con lo specifico software, di seguito si riportano esempi delle schermate di impostazione dei modelli stratigrafici. In figura 4 si propone l'immagine, ripresa dallo schermo del computer, di una fase di elaborazione numerica effettuata con lo specifico software sul modello c.



**Figura 4. Schermata riportante lo schema di modello 1 del software Comsol Multiphysics**

Analoga situazione, ma per il modello b viene proposta in figura 5. Considerando il metodo di calcolo agli elementi finiti, nelle figure 6, 7 invece viene mostrata la frammentazione del dominio di calcolo con la quale si passa dal modello continuo a quello discretizzato. Le immagini riportate permettono la visualizzazione delle mesh applicate ai due modelli funzionali bidimensionali contenenti il materiale in passaggio di fase.

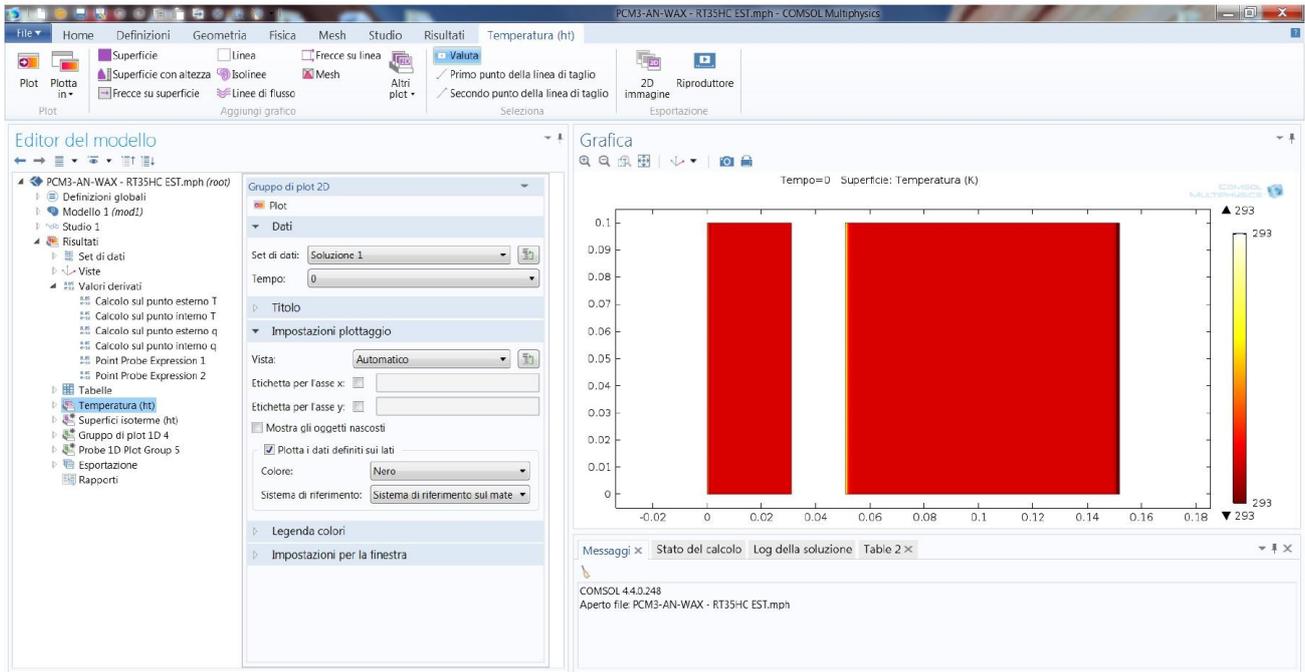


Figura 5. Schermata riportante lo schema di modello 2 del software Comsol Multiphysics

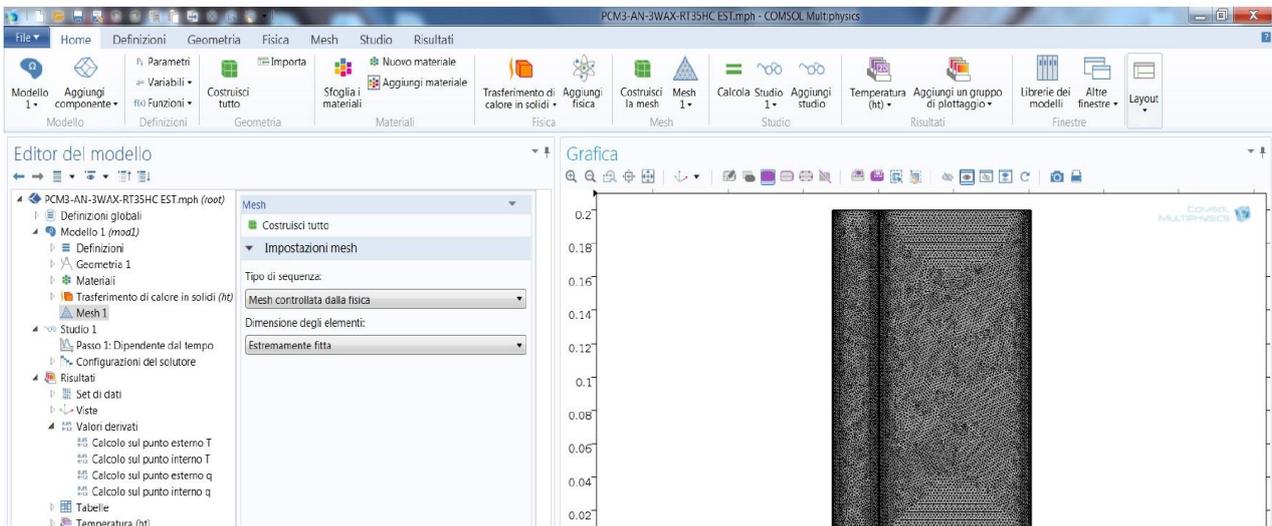
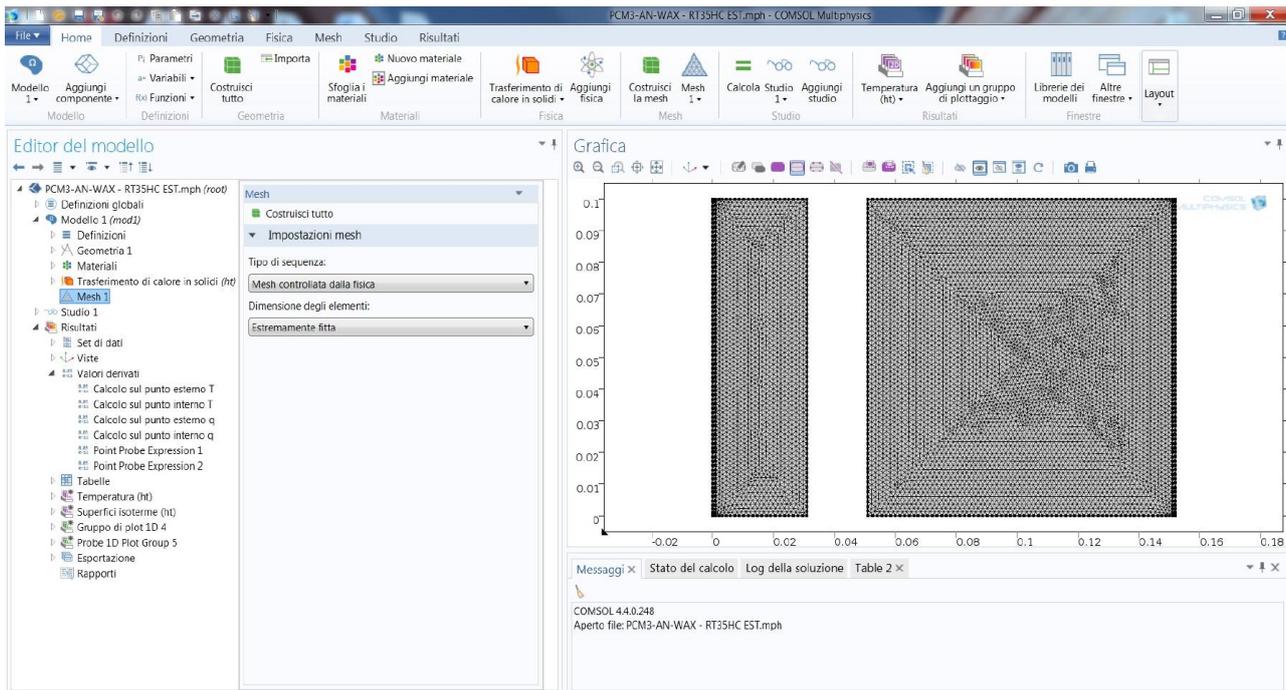


Figura 6. Esempio di Mesh del primo modello 2D simulato



**Figura 7. Esempio di Mesh del secondo modello 2D simulato**

Per una maggiore comprensione dei risultati delle molteplici elaborazioni eseguite, di seguito si riportano le giustificazioni alle scelte effettuate sia sul tipo di condizione al contorno che sui valori numerici dei parametri utilizzati.

## 2.2 Velocità di trasferimento

Dalla lettura del documento “Condizioni Generali di Trasporto delle Merci per Ferrovia” emesso da Trenitalia nel 2004, all’ Articolo 25 - Termini di Resa si può leggere al comma 25.2 le seguenti prescrizioni:

*Salvo che il contratto non disponga diversamente, il Termine di Resa viene calcolato nel modo seguente:*

- a) 12 ore per le operazioni di partenza;
- b) 24 ore per ogni 400 km indivisibili di percorrenza o frazione di essi;
- c) 12 ore per le operazioni di arrivo;
- d) 12 ore per il traghettamento da e per la Sicilia e 24 ore per il traghettamento da e per la Sardegna;
- e) 24 ore per i Trasporti diretti o provenienti dai porti direttamente collegati con la infrastruttura ferroviaria.

Analizzando quanto disponibile sulla classificazione dei treni merci si può leggere ad esempio come un treno Intermodale (Containers) sia impostato per una velocità massima di 100 km/h.

Al fine dello sviluppo della ricerca, alla luce di quanto indicato in precedenza, si comprende come sia necessario valutare nel processo di carico, trasferimento e scarico dei carri refrigerati tempi dilatati con soste prolungate e velocità di trasferimento limitate.

Tale variabilità della condizione ha una ripercussione sul bilancio energetico del sistema, andando a influenzare gli scambi termici superficiali esterni e quelli all’interno della intercapedine che si trova tra pcm e isolante termico nello specifico modello funzionale. Infatti nei momenti in cui il mezzo è fermo lo scambio termico tra superficie esterna e aria esterna avviene con un meccanismo di convezione naturale o mediamente ventilata nel caso che ci sia uno spostamento d’aria con una significativa velocità a causa del vento. Al contrario quando il mezzo è in movimento, lo scambio termico tra superficie esterna

dell'involucro del container e l'aria avviene per convezione forzata, dovuto al movimento del carro all'interno mezzo aria. Nel secondo caso il coefficiente di scambio termico aumenta sensibilmente, poiché la potenza termica è proporzionale alla velocità relativa aria-cella, determinando una variazione consistente nelle temperature e nei flussi riscontrabili all'interno della stratigrafia delle pareti delle celle frigorifere. Tale incremento dello scambio termico favorisce durante le ore notturne il passaggio di fase del PCM da liquido a solido, derivante da un migliore capacità di rilascio del calore accumulato nelle ore diurne. Al fine della presente analisi sono state valutate due condizioni:

1. a mezzo fermo, che nella realtà avviene a treno fermo, durante gli scambi e nelle aree di deposito,
2. treno in movimento con una velocità di 60km/h, che corrisponde a una situazione ipotizzata "media" di velocità del mezzo.



Figura 8 - vagone in stazionamento – (a) velocità 0 km/h – (b) velocità 60 km/h

### 2.3 Dati climatici

Nei paragrafi precedenti è stato affermato che le elaborazioni sono state effettuate con i parametri climatici caratteristici di un giorno tipo. In effetti le simulazioni effettuate sono relative al 3° giorno di un periodo di 3 giorni consecutivi poiché è necessario trovare la stabilizzazione dei dati di output ricavati. I dati climatici caratteristici del giorno tipo estivo (il più oneroso dal punto di vista termico per il PCM e per il modello funzionale) per le tre località (Palermo, Ancona, Milano), riportati nei grafici delle Figure 9-10-11 e 12 sono stati estrapolati dalla norma vigente nel settore di valutazione energetica degli involucri edilizi, i cui riferimenti sono riportati a margine delle tabelle 2,3,4,5 che di seguito riguardanti riportano riassunte le condizioni al contorno e i valori numerici dei parametri che hanno portato alla soluzione numerica del problema.

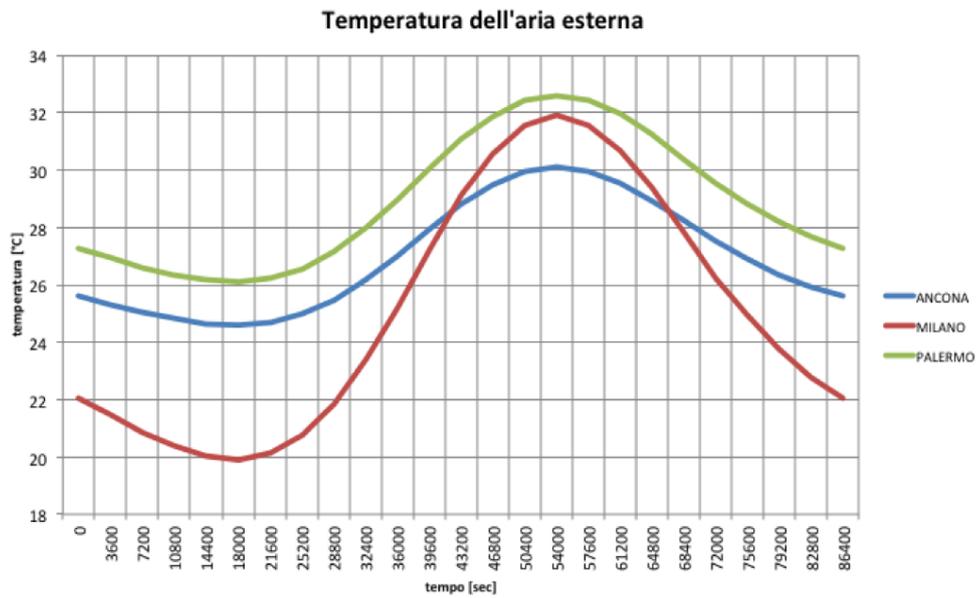


Figura 9: Andamento delle temperature nel giorno di riferimento nelle tre località.

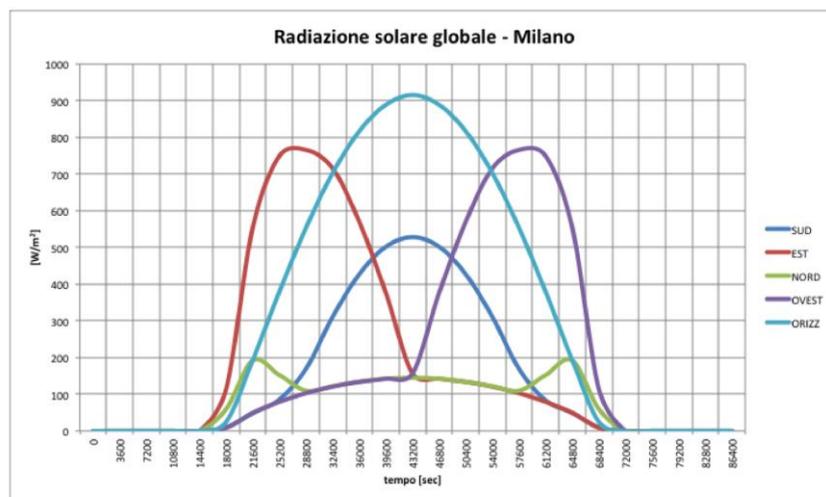


Figura 10. Radiazione solare per le diverse esposizioni – località climatica: Milano.

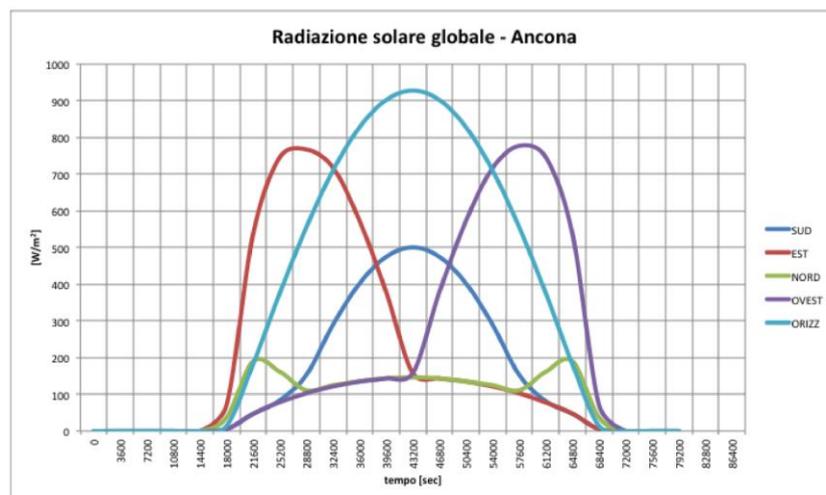


Figura 11. Radiazione solare per le diverse esposizioni – località climatica: Ancona.

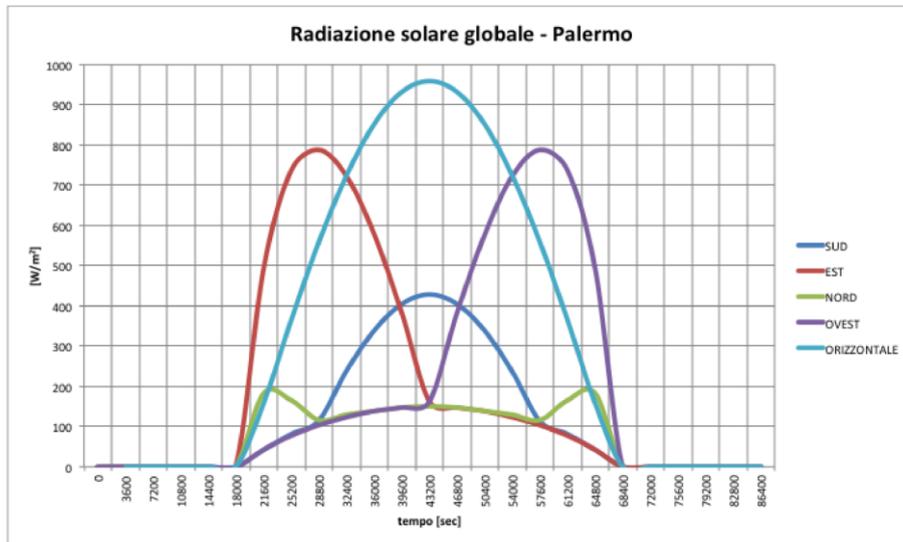


Figura 12. Radiazione solare per le diverse esposizioni – località climatica: Ancona.

## 2.4 Condizioni al contorno di trasferimento del calore

Quanto riportato in precedenza riguardante la dinamica della cella frigorifera e le condizioni climatiche di trasferimento o sosta, hanno portato a definire diverse condizioni al contorno, gran parte ipotizzate dalle normative di riferimento per il settore delle costruzioni edilizie ed altre calcolate attraverso i numeri adimensionali di Reynolds, Prandtl e Nusselt caratteristici della trasmissione del calore per convezione forzata. Nelle tabelle 2, 3, 4 e 5 vengono proposte le condizioni al contorno di carattere termico per i vari modelli funzionali.

	CONVEZIONE	IRRAGGIAMENTO
<b>esterno</b>	$h = 25 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ (**) $T_{\text{aria}} = (*)^\circ\text{C}$	SORGENTE TERMICA AL CONTORNO (radiazione solare) $[\text{W/m}^2]$
<b>interno</b>	$h = 8 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ (**) $h = 6 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ (**) $T_{\text{vano}} = 0^\circ\text{C}$	-

(\*) Variabile relativa alla condizione limite estiva secondo la UNI 10349.

(\*\*) Valori relativi a flusso termico orizzontale e discendente secondo la UNI 6946

Tabella 2: Condizioni al contorno riferite ai modelli teorici a) e b) con treno fermo.

	CONVEZIONE	IRRAGGIAMENTO
<b>esterno</b>	$h = 25 \text{ [W/m}^2\text{K]} (**)$ $T_{\text{aria}} = (*)^\circ\text{C}$	SORGENTE TERMICA AL CONTORNO (radiazione solare) $[\text{W/m}^2]$
<b>intercapedine</b>	$h = 1,25 \text{ [W/m}^2\text{K]} (**)$ $T_{\text{aria}} = (*)^\circ\text{C}$	$\epsilon_r = 0,74$ $T_{\text{pareti}} = \text{rilevate attraverso sonde}$
<b>interno</b>	$h = 8 \text{ [W/m}^2\text{K]} (**)$ $h = 6 \text{ [W/m}^2\text{K]} (**)$ $T_{\text{vano}} = 0^\circ\text{C}$	-

(\*) Variabile relativa alla condizione limite estiva secondo la UNI 10349.

(\*\*) Valori relativi a flusso termico orizzontale e discendente secondo la UNI 6946

**Tabella 3: Condizioni al contorno riferite al modello teorico c) con treno fermo.**

	CONVEZIONE	IRRAGGIAMENTO
<b>esterno</b>	$h = 76 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ $T_{\text{aria}} = (*)^\circ\text{C}$	SORGENTE TERMICA AL CONTORNO (radiazione solare) $[\text{W/m}^2]$
<b>interno</b>	$h = 8 \text{ [W/m}^2\text{K]} (**)$ $h = 6 \text{ [W/m}^2\text{K]} (**)$ $T_{\text{vano}} = 0^\circ\text{C}$	-

(\*) Variabile relativa alla condizione limite estiva secondo la UNI 10349.

(\*\*) Valori relativi a flusso termico orizzontale e discendente secondo la UNI 6946

**Tabella 4: Condizioni al contorno riferite ai modelli teorici a) e b) con treno a 60 Km/h**

	CONVEZIONE	IRRAGGIAMENTO
<b>esterno</b>	$h = 76 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ $T_{\text{aria}} = (*)^\circ\text{C}$	SORGENTE TERMICA AL CONTORNO (radiazione solare) $[\text{W/m}^2]$
<b>intercapedine</b>	$h = 72 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ $T_{\text{aria}} = (*)^\circ\text{C}$	$\epsilon_r = 0,74$ $T_{\text{pareti}} = \text{rilevate attraverso sonde}$
<b>interno</b>	$h = 8 \text{ [W/m}^2\text{K]} (**)$ $h = 6 \text{ [W/m}^2\text{K]} (**)$ $T_{\text{vano}} = 0^\circ\text{C}$	-

(\*) Variabile relativa alla condizione limite estiva secondo la UNI 10349.

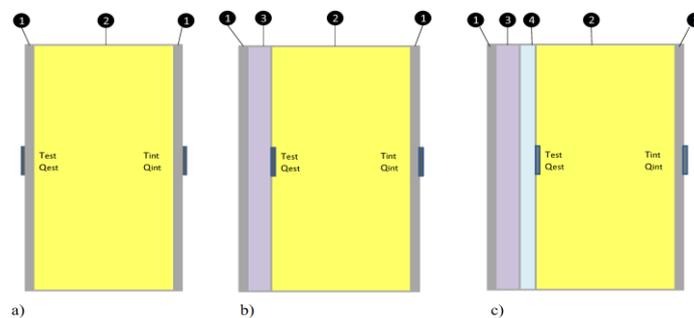
(\*\*) Valori relativi a flusso termico orizzontale e discendente secondo la UNI 6946

**Tabella 5: Condizioni al contorno riferite al modello teorico c) con treno a 60 Km/h.**

## 2.5 Modelli funzionali

Come ormai più volte ricordato, le elaborazioni numeriche sono state effettuate su vari modelli funzionali, per i quali, per razionalizzazione di esposizione, di seguito vengono riportati gli schemi che ne illustrano la stratificazione e le caratteristiche dimensionali:

- Pannello sandwich di base che è quello attualmente utilizzato nelle celle frigorifera;
- Pannello sandwich base sul quale è stato applicato uno strato di PCM, volta per volta di diversa formulazione;
- Pannello sandwich sul quale è stata applicata un'intercapedine ventilata di aria tra il PCM ed il poliuretano.



strato	materiale	spessore [mm]
1	lamiera d'acciaio	1
2	poliuretano espanso	100
3	PCM	30
4	aria	20

**Figura 13. Rappresentazione delle stratigrafie analizzate ed elenco dei materiali utilizzati**

Il terzo modello funzionale (C), come già ricordato nell'introduzione, è stato inserito per garantire la solidificazione del PCM nella posizione orizzontale poiché dal punto di vista del passaggio di fase, si configura come la più critica per la solidificazione al termine del periodo di irraggiamento diurno.

Qui di seguito vengono riportati i grafici relativi agli andamenti delle temperature calcolate rispettivamente tra il PCM ed il poliuretano per il modello b) ed il PCM e l'intercapedine di aria per il modello c).

In questi casi specifici è stato considerato il solo orientamento orizzontale poiché si configura come l'esposizione più critica.

## 2.6 Tipi di PCM analizzati

Come già affermato nel paragrafo 1.1, l'analisi numerica, oltre che ai due materiali di riferimento RT 35 e RT 35 HC, è stata estesa ad una serie di altri PCM le cui caratteristiche di comportamento termico sono compatibili con i livelli di temperatura e irraggiamento ambientale delle tre zone climatiche di studio. Si può infatti verificare dalla seguente tabella 6 come i materiali in passaggio di fase competitori dei due di riferimento, abbiano temperature di fusione compatibili con quelle raggiungibili sulle superfici esterne degli involucri delle celle frigorifere in trasferimento o sosta. I calori latenti di fusione sono invece sensibilmente differenti e così le densità e ciò è di estrema importanza nella scelta delle sostanze in quanto a parità di massa un aggravio di peso derivante dagli strati aggiuntivi di PCM possono vanificare i risparmi energetici conseguiti con l'applicazione dei materiali in passaggio di fase.

materiale	temperatura di fusione [°C]	conducibilità termica [W/mK]	calore sensibile [J/kgK]	calore latente di fusione [J/kg]	densità [kg/m <sup>3</sup> ]
lamiera d'acciaio	-	50	475	-	7800
poliuretano espanso	-	0,032	1400	-	40
PCM - paraffina RT 27	27	0,2	2000	165000	880
PCM - paraffina RT 28 HC	28	0,2	2000	226000	880
PCM - paraffina RT 31	31	0,2	2000	157000	880
PCM - paraffina RT 35	33	0,2	2000	157000	880
PCM - paraffina RT 35 HC	35	0,2	3000	222000	770
PCM - paraffina RT 42	41	0,2	2000	161000	880
PCM - paraffina RT 44 HC	43	0,2	2000	235000	780
PCM - paraffina RT 47	46	0,2	2000	157000	880
PCM - sale idrato C 48	48	0,6	3600	180000	1360

**Tabella 6: Parametri fisici dei materiali usati per la simulazione**

Con le elaborazioni numeriche, per tutti i materiali elencati sono stati calcolati i carichi termici giornalieri, in termini di riduzione dell'energia termica entrante attraverso la superficie dei pannelli, così da individuare quello più idoneo all'implementazione nei pannelli.

I risultati delle analisi confermano come il PCM RT35HC, grazie al suo elevato calore latente di fusione, in un intervallo di temperatura che può essere considerato ottimale alle latitudini di utilizzo del container refrigerato, determini una maggiore riduzione del flusso termico entrante, confermando così la bontà della soluzione in termini di riduzione dei consumi energetici necessari a mantenere la bassa temperatura nella cella.

Nel paragrafo seguente si approfondisce la conoscenza del comportamento energetico dei principali PCM competitori dell'elenco di tabella 6 e cioè RT 35 e RT35HC.

## 2.7 Scelta del PCM

I lavori eseguiti durante il primo anno della ricerca (Sett 2012 – Sett 2013) si sono basati sull'utilizzo come materiale in passaggio di fase della paraffina della Rubitherm GmbH, tipo RT 35 di cui nella tabella 7 si riportano le caratteristiche fisiche principali.

Melting area	29-36 (main peak 33)	[°C]
Congeealing area	36-31 (main peak 35)	[°C]
Heat storage capacity $\pm 7,5\%$ Combination of latent and sensible heat in a temperature range of 26°C to 41°C	170	[kJ/kg]
Specific heat capacity	2	[kJ/kg]
Density solid (at 15°C)	0,86	[kg/dm <sup>3</sup> ]
Density solit (at 45°C)	0,77	kg/dm <sup>3</sup>
heat conductivity (both phases)	0,2	[%]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point (PCM)	167	[°C]
Max operation temperature	65	[°C]

**Tabella 7: Caratteristiche fisiche della paraffina RT 35.**

All'inizio di questo secondo anno di ricerca, all'interno della stessa gamma di PCM offerti dall'industria tedesca Rubitherm, è comparso il nuovo tipo di paraffina Rubitherm RT 35 HC che, come la sigla indica, è l'evoluzione di quello usato in precedenza. Nella tabella 8 per RT 35 HC si riportano gli analoghi dati elencati per RT 35.

Melting area	34-36 (main peak 35)	[°C]
Congeealing area	36-34 (main peak 35)	[°C]
Heat storage capacity $\pm 7,5\%$ Combination of latent and sensible heat in a temperature range of 26°C to 41°C	240	[kJ/kg]
Specific heat capacity	2	[kJ/kg]
Density solid (at 15°C)	0,77	[kg/dm <sup>3</sup> ]
Density solit (at 45°C)	0,67	kg/dm <sup>3</sup>
heat conductivity (both phases)	0,2	[%]
Volume expansion	12	[%]
Flash point (PCM)	177	[°C]
Max operation temperature	70	[°C]

**Tabella 8: Caratteristiche fisiche della paraffina RT 35 HC.**

Com'è possibile notare dal confronto, risulta evidente la differenza di calore latente tra i due materiali, 170 kJ/kg per RTH35 e 240 kJ/kg per RTH 35 HC, con un aumento di circa il 40% nella prestazione del materiale evoluto.

Nelle figure seguenti (Figure 15-16) si può anche notare come sia variata nell'evoluzione tecnica del RT35 in RT35 HC la distribuzione del calore assorbito dall'unità di massa nel campo di temperatura del passaggio di fase che tra l'altro nel primo caso è esteso nella maggiore valore entalpico su un range di circa 6°C, che nel secondo caso si è ridotto a circa 3°C. I grafici delle temperatura e dei flussi termici relativi alle diverse condizioni climatiche e al contorno sono riportati in Allegato 3.

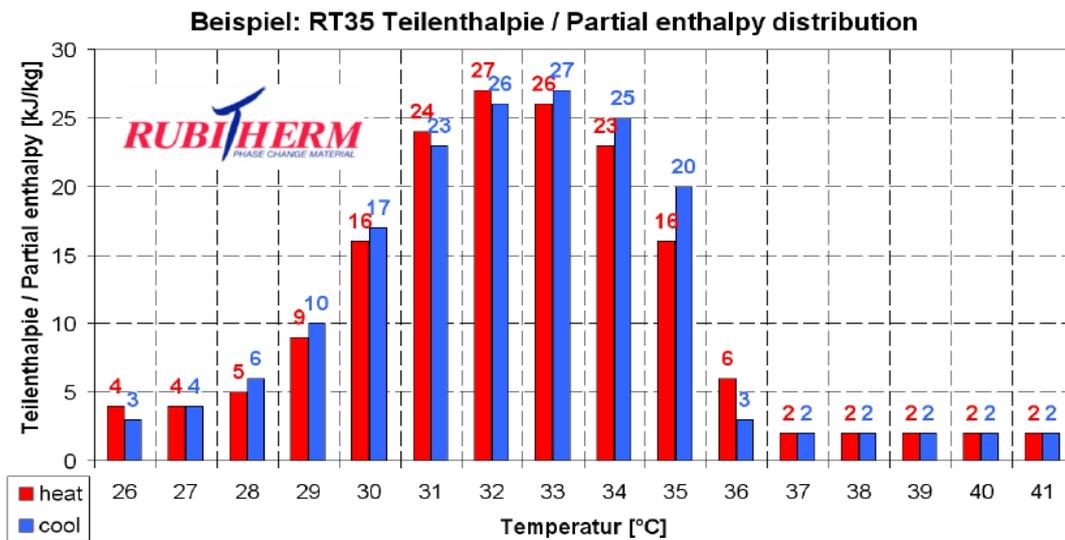


Figura 14. Distribuzione dell'entalpia specifica nel campo di temperatura di passaggio di fase di RT35

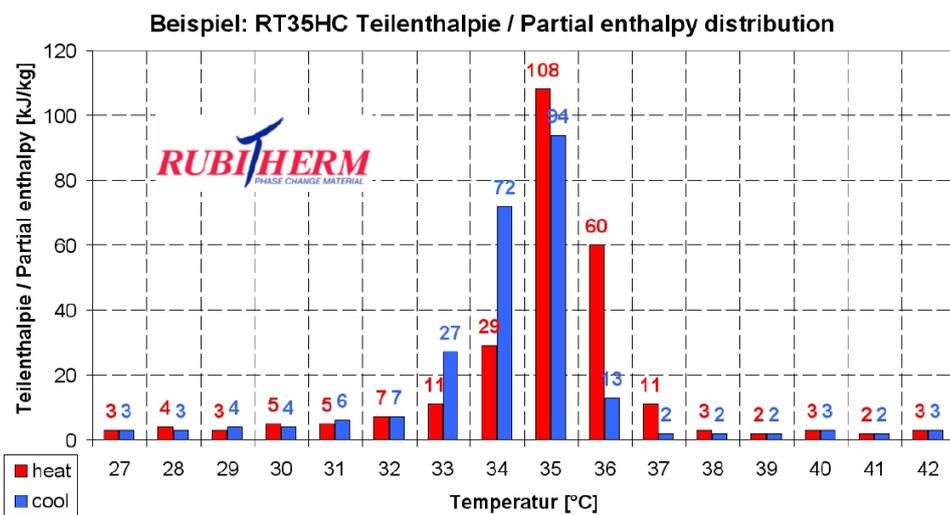


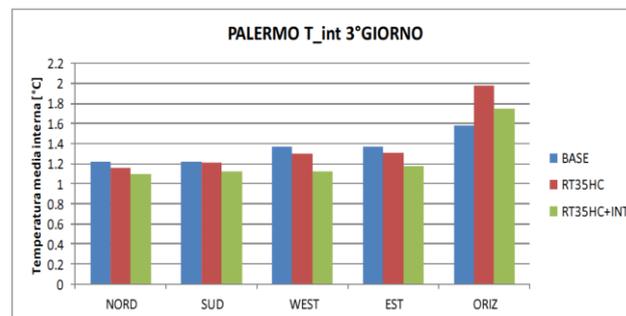
Figura 15. Distribuzione dell'entalpia specifica nel campo di temperatura di passaggio di fase di RT35HC

## 2.8 Risultati

### 2.8.1 Confronto tra il PCM “RT35” e “RT35HC”

A conferma di quanto intuibile dall’osservazione dei dati riportati in precedenza, di seguito si riportano i risultati delle elaborazioni numeriche effettuate sui due materiali a confronto RT35HC e RT35 a loro volta rapportati al pannello “base”. Per le tre località climatiche, per i vari orientamenti del pannello di seguito si riportano i valori di temperatura superficiale interna delle tre stratigrafie e i miglioramenti percentuali nell’uso dei materiali in esame.

PALERMO SIMULAZIONE A TRENO FERMO



PALERMO T\_int 3° GIORNO

	NORD	SUD	WEST	EST	ORIZ
BASE	1.220529	1.220529	1.371954929	1.372175	1.585298
RT35HC	1.162542	1.214511	1.302647	1.305443	1.974873
RT35HC+INT	1.09684	1.124986	1.124985786	1.176653	1.753899

Figura 16. Confronto delle temperature medie superficiali interne a treno fermo

PALERMO SIMULAZIONE A TRENO FERMO, MIGLIORAMENTI PERCENTUALI

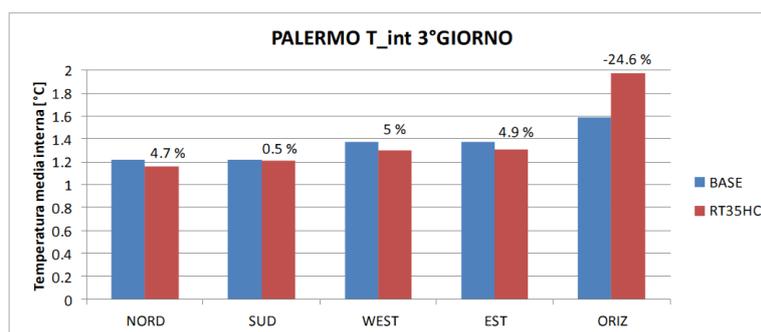
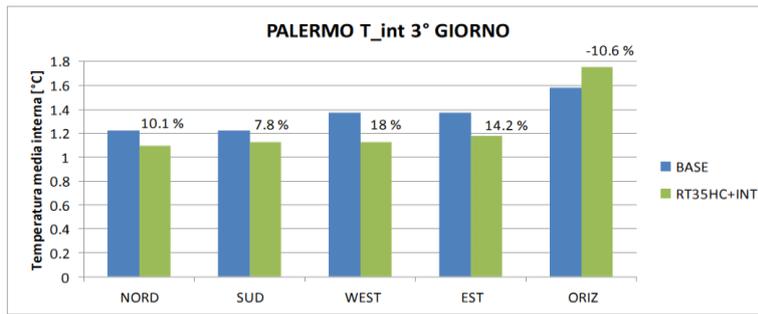


Figura 17. Confronto delle temperature medie superficiali interne a treno fermo – differenza percentuale

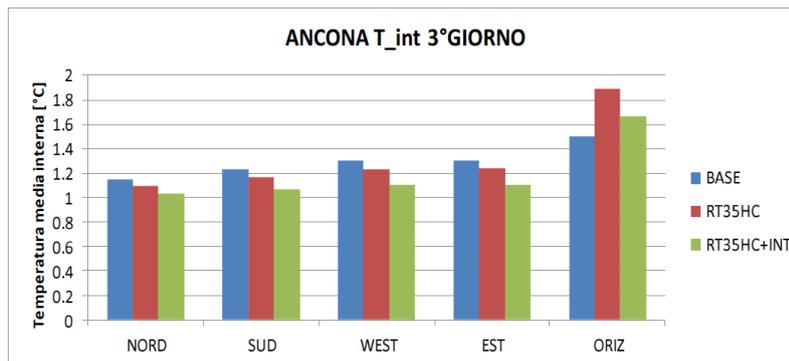


PERCENTUALE RISPETTO A "BASE"

	NORD	SUD	WEST	EST	ORIZ
RT35HC	4.750991	0.493024	5.051764247	4.863228	-24.57426764
RT35HC+INT	10.13403	7.828001	18.00125775	14.24905	-10.63528539

Figura 18. Confronto delle temperature medie superficiali interne a treno fermo.

ANCONA SIMULAZIONE A TRENO FERMO



ANCONA T\_int 3° GIORNO

	NORD	SUD	WEST	EST	ORIZ
BASE	1.14901	1.234422	1.303760357	1.303056	1.507179
RT35HC	1.096484	1.17257	1.230294929	1.240182	1.887467
RT35HC+INT	1.029432	1.070646	1.101697286	1.107667	1.663449

Figura 19. Confronto delle temperature medie superficiali interne a treno fermo.

ANCONA SIMULAZIONE A TRENO FERMO, MIGLIORAMENTI PERCENTUALI

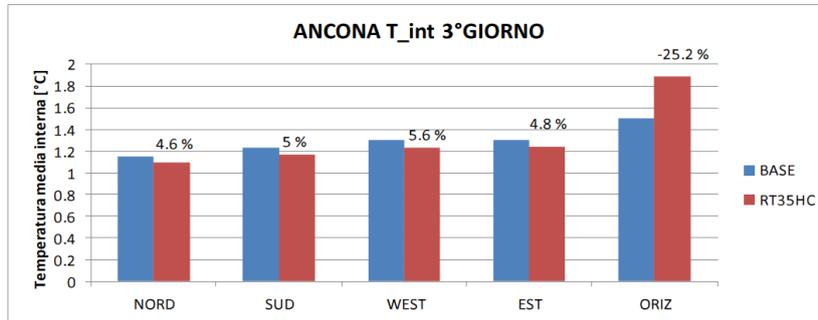
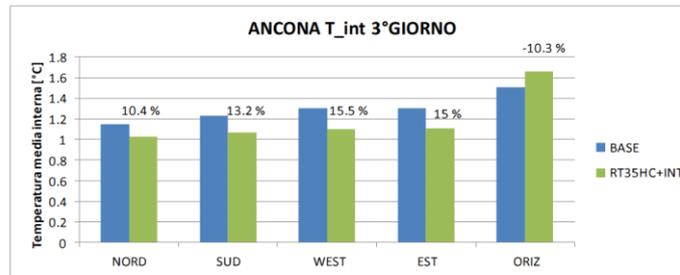


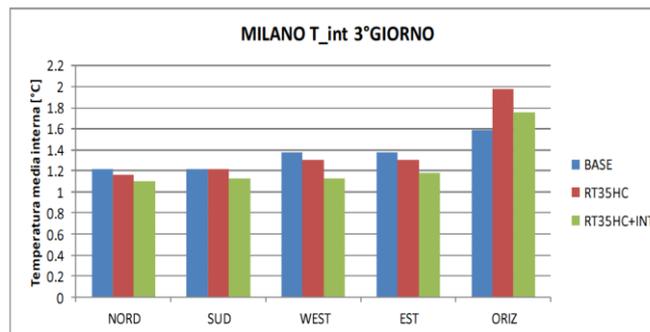
Figura 20. Confronto delle temperature medie superficiali interne a treno fermo.



PERCENTUALE RISPETTO A "BASE"					
	NORD	SUD	WEST	EST	ORIZ
RT35HC	4.571384	5.010593	5.634887	4.825114	-25.23170528
RT35HC+INT	10.407	13.2674	15.49848	14.99466	-10.36833135

Figura 21. Confronto delle temperature medie superficiali interne a treno fermo.

MILANO SIMULAZIONE A TRENO FERMO



MILANO T_int 3° GIORNO					
	NORD	SUD	WEST	EST	ORIZ
BASE	1.079135	1.176627	1.2357965	1.235712	1.434577
RT35HC	1.027799	1.114511	1.168735357	1.171134	1.47208
RT35HC+INT	0.961963	1.008698	1.037715071	1.040812	1.569849

Figura 22. Confronto delle temperature medie superficiali interne a treno fermo.

MILANO SIMULAZIONE A TRENO FERMO, MIGLIORAMENTI PERCENTUALI

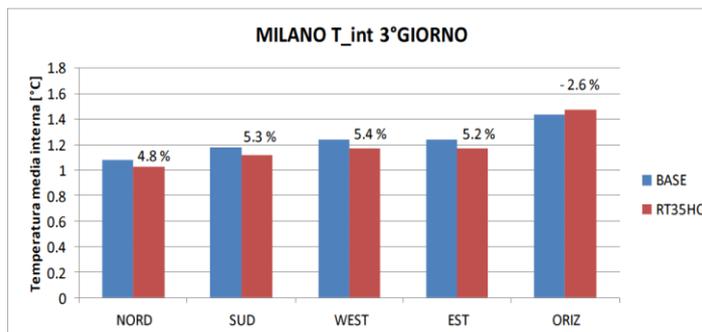
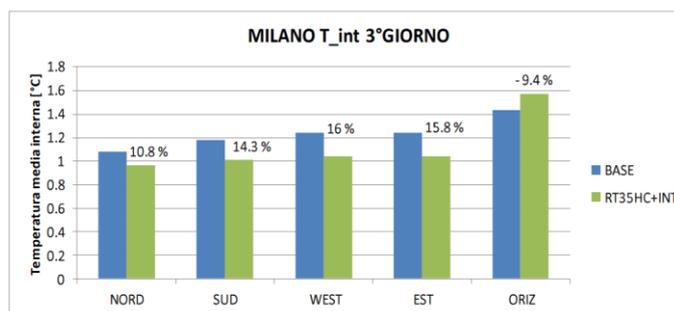


Figura 23. Confronto delle temperature medie superficiali interne a treno fermo.



PERCENTUALE RISPETTO A "BASE"					
	NORD	SUD	WEST	EST	ORIZ
RT35HC	4.757195	5.279128	5.426552257	5.225941	-2.614199383
RT35HC+INT	10.85799	14.27207	16.02864457	15.77226	-9.429386971

Figura 24. Confronto delle temperature medie superficiali interne a treno fermo.

## 2.8.2 Confronto tra i modelli funzionali con PCM (senza e con intercapedine)

Obiettivo di questo confronto è verificare gli eventuali benefici apportati dalla presenza dell'intercapedine. Questo strato aggiuntivo, determina un incremento dello spessore della parete e della complessità costruttiva dell'involucro (presenza di griglie di ingresso per l'areazione e distanziatori) e per giustificare tale modello, questo dovrebbe dare un sostanziale contributo al funzionamento del PCM. In particolare dovrebbe facilitare il fenomeno di scarico attraverso l'incremento della superficie scambiante con l'aria esterna. Lo scarico dell'energia termica accumulata durante il giorno risulta senza dubbio la fase critica del PCM durante le giornate estive, quando la temperatura notturna non sempre scende sotto livelli tali da permettere un completo rilascio dell'energia accumulata durante il giorno e il ritorno allo stato solido del PCM. Per valutare tale differenza si riportano i grafici della temperatura del PCM (valutata nell'interfaccia con il materiale isolante) per il PCM "RT 35 HC".

Dai grafici inseriti nell'allegato 1 si evince come l'intercapedine faciliti il rilascio del calore accumulato durante il giorno rispetto al modello base favorendo quindi il ripristino delle condizioni iniziali di partenza. Nonostante le evidenti differenze per ciascun PCM considerato, il comportamento delle due stratigrafie (nelle diverse località climatiche e per diverse velocità) risulta nel complesso tendenzialmente simile,

permettendo quindi di estendere le suddette osservazioni ai diversi tipi di PCM. A Titolo esemplificativo si riportano i grafici della superficie con esposizione orizzontale per la località climatica di Ancona, si nel caso di treno fermo che nel caso di treno in movimento. I grafici relativi alle altre condizioni climatiche e al contorno sono riportati in Allegato 1.

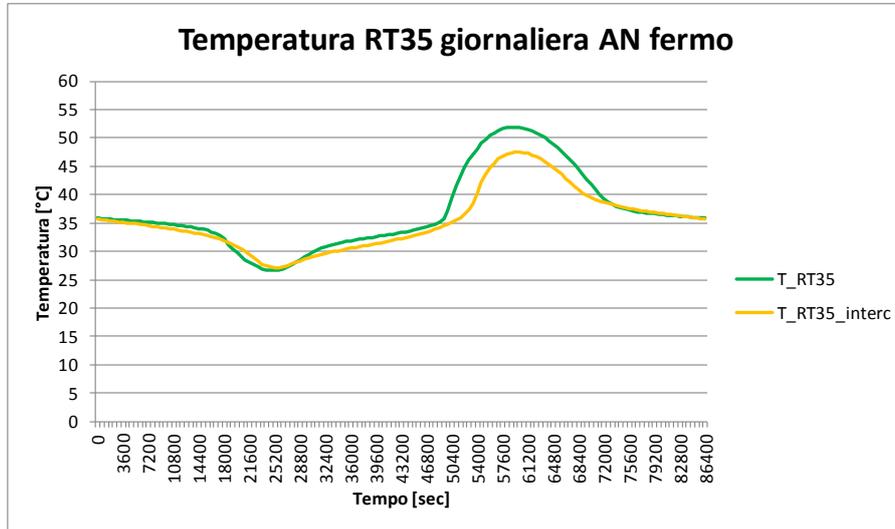


Figura 25. Confronto delle temperature medie superficiali interne a treno fermo.

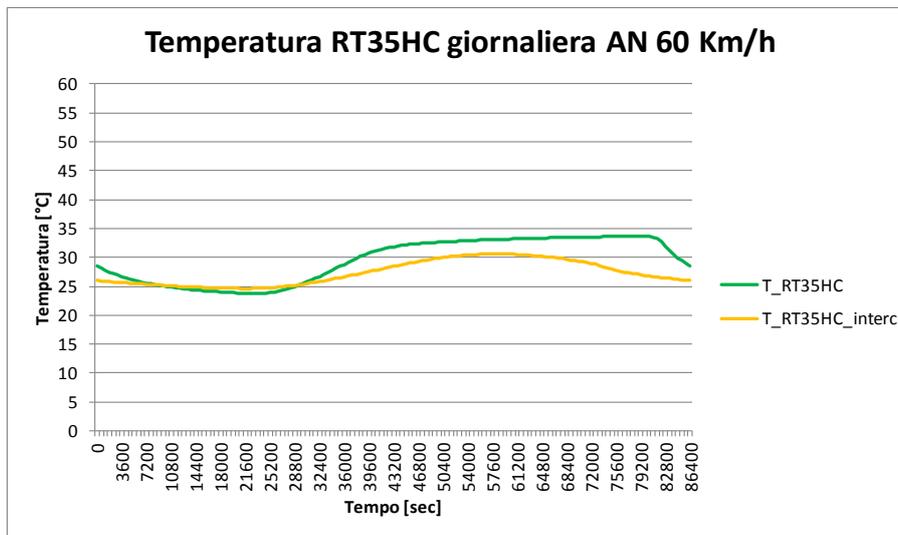
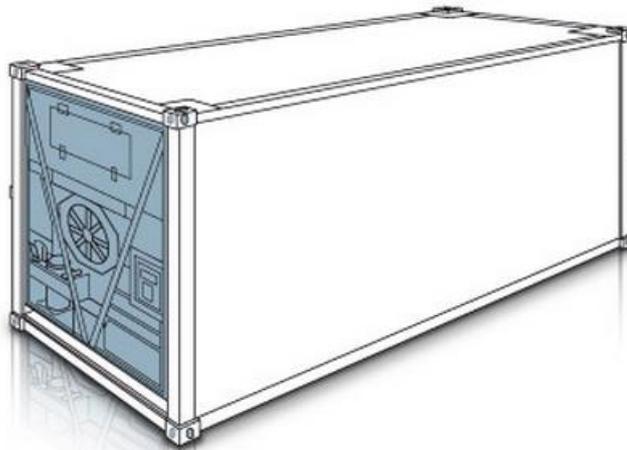


Figura 26. Confronto delle temperature medie superficiali interne a treno fermo.

### 2.8.3 Carico termico giornaliero – Confronto tra i diversi PCM

Il carico termico estivo è l'energia termica che attraversa l'involucro ed entra nella cella e che quindi deve essere asportato per far sì che l'ambiente interno rimanga a temperatura costante. Tale parametro rappresenta l'indicatore principale per la verifica del risparmio energetico ottenibile dall'applicazione dello strato di PCM. Nonostante questo, il carico termico è comunque un'energia teorica, e che quindi non può essere semplicemente trasformata in energia elettrica, a meno che non venga simulata anche l'efficienza della macchina frigorifera.

Al fine di sintetizzare i risultati ottenuti durante le elaborazioni, si riportano di seguito i grafici di confronto dei PCM presi in esame relativi ai carichi termici entranti nel vano refrigerato di un container ISO 20' reefer (Figura 27) ipotizzato fermo (Figura 28) e viaggiante a 60 Km/h (Figura 29) nelle tre località climatiche di Milano, Ancona e Palermo.



**Figura 27: Esempio di container ISO reefer 20'.**

In figura 28 vengono riportati i diagrammi di andamento del carico termico entrante nella cella refrigerata in un giorno tipo estivo, nelle tre località climatiche di riferimento, a convoglio fermo. Dalle curve in essi riportate si nota la differenza dei valori caratterizzanti la curva di carico del pannello base con quelli di tutte le stratificazioni contenenti i vari PCM studiati. Considerando le aree sottese alle curve si evidenzia una riduzione rilevante della energia entrante nella celle con PCM durante la fase diurna.

Dal confronto dei diagrammi a cella ferma con quelli a cella viaggiante a 60 km/h si nota come nei secondi la differenza di comportamento energetico tra la cella con pannello base e quelle con i vari PCM è notevolmente ridotta e ciò è da imputare allo scambio termico convettivo forzato che si attua tra le superfici esterne e l'aria ambiente, mentre a convoglio fermo c'è solamente convezione naturale. Dalla comparazione tra le curve dei materiali in passaggio di fase si evidenzia un migliore comportamento da parte di quelli con la sigla HC e cioè RT28HC, RT35HC e RT44HC poiché rispetto agli altri sono caratterizzati da un elevato calore latente di fusione. Il RT44HC risulta tra i tre il più penalizzato in quanto l'elevata temperatura di fusione gli permette di attivare l'accumulo termico con molto ritardo rispetto agli altri due dovendosi manifestare i valori di temperatura e irraggiamento compatibili con quella temperatura di fusione.

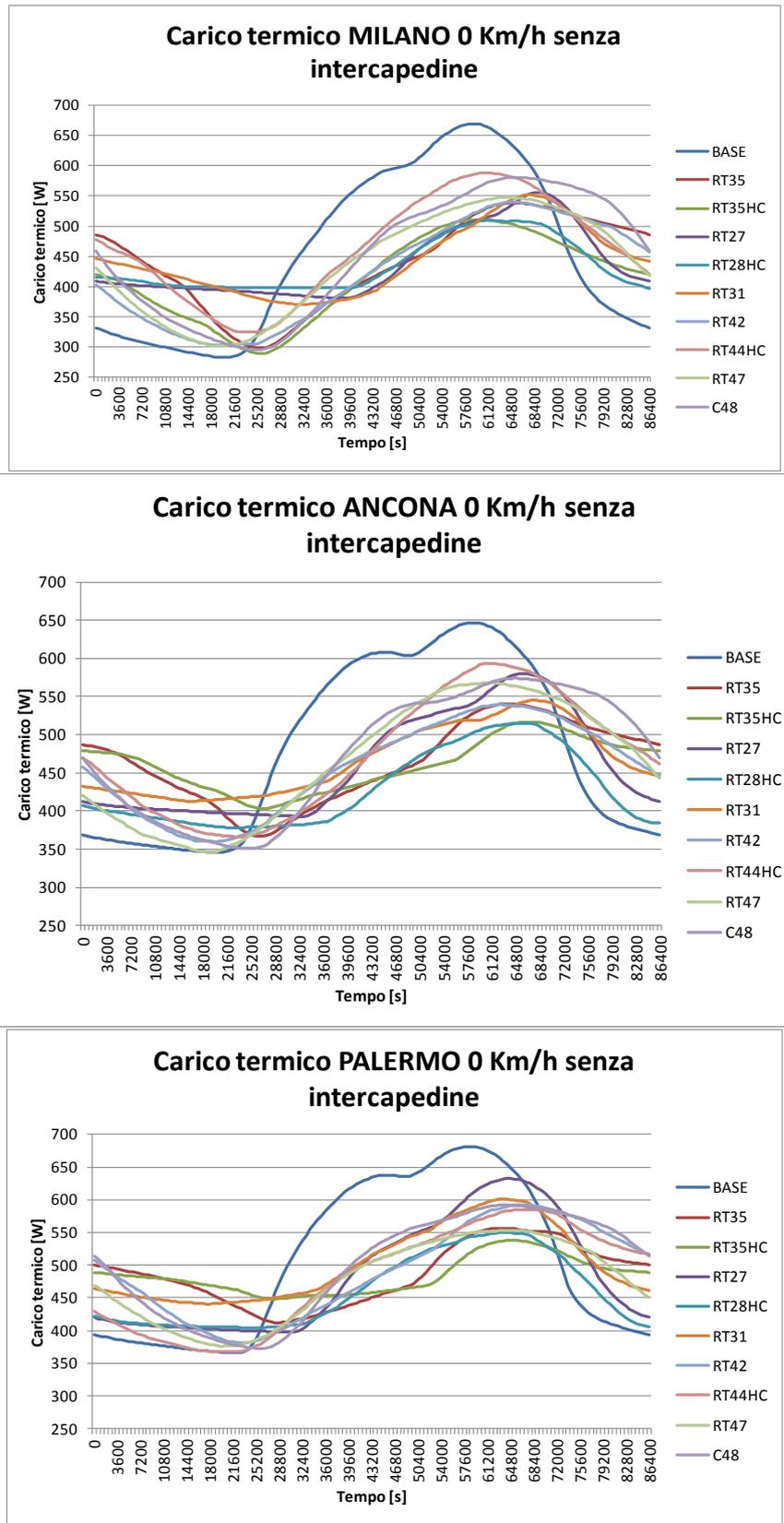


Figura 28 - vagoni in movimento - velocità 60 km/h

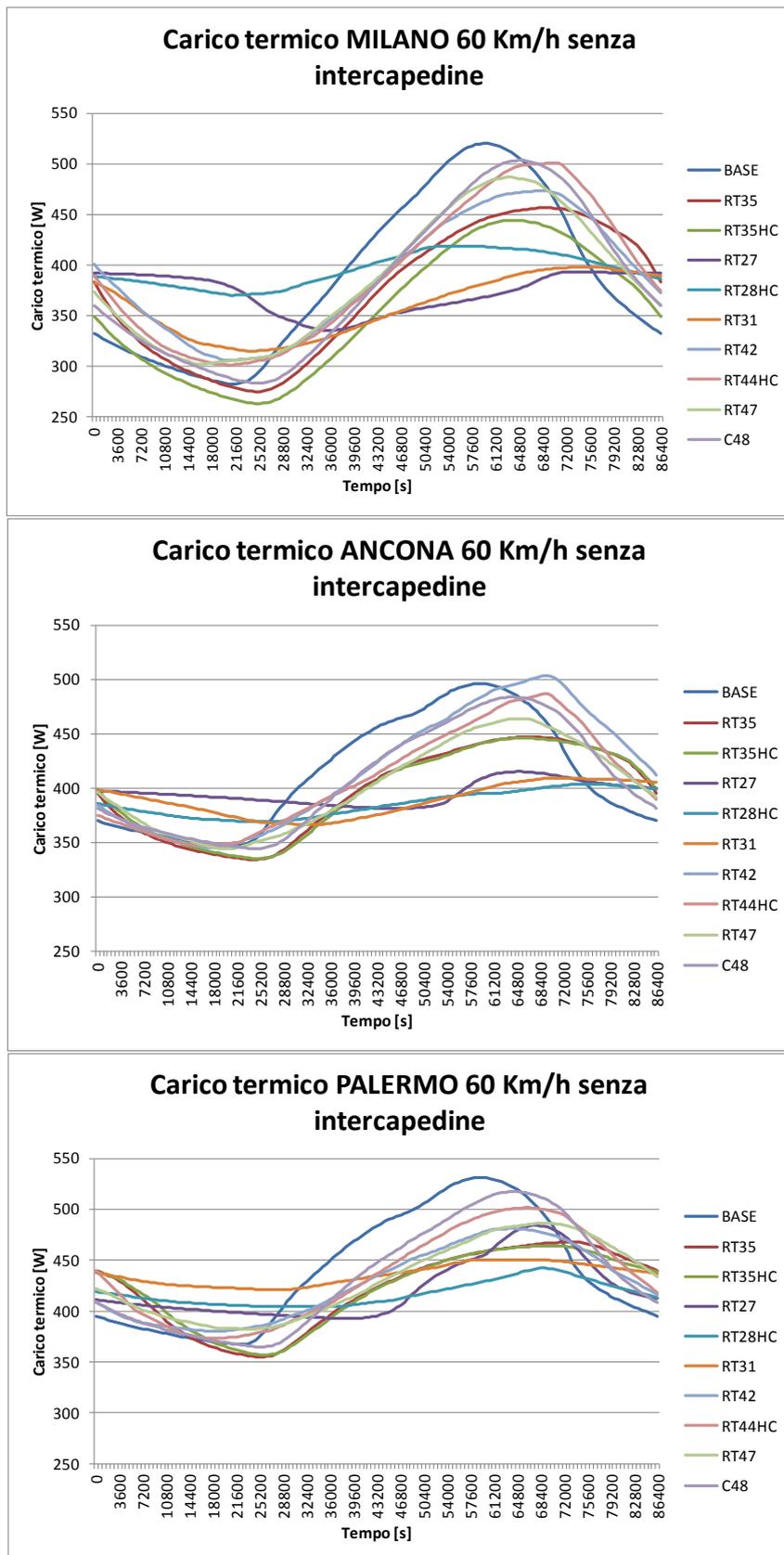


Figura 29 - vagoni in movimento - velocità 60 km/h

Nei grafici seguenti viene mostrato l'andamento del carico termico entrante nel vano interno del container standard (ISO 20' refer), durante il giorno estivo tipo, relativo alle sostanze RT35HC e RT35 calcolato per le condizioni ambientali delle zone climatiche di Ancona, Milano e Palermo, considerando le due velocità (0 km/h e 60 km/h). Dopo avere scelto nella gamma dei PCM analizzati quello a migliore comportamento energetico, si è voluto confrontare le prestazioni di suddetto materiale introdotto nei due diversi modelli funzionali (con e senza intercapedine) rapportati con il modello funzionale base. Dai diagrammi si può evincere come sia a treno fermo che viaggiante la curva gialle (con intercapedine) risulta sempre più bassa di quella verde e ciò conferma che l'intercapedine contribuisce positivamente allo scarico verso l'esterno del calore accumulato. I grafici relativi alle altre condizioni climatiche e al contorno sono riportati in Allegato 2.

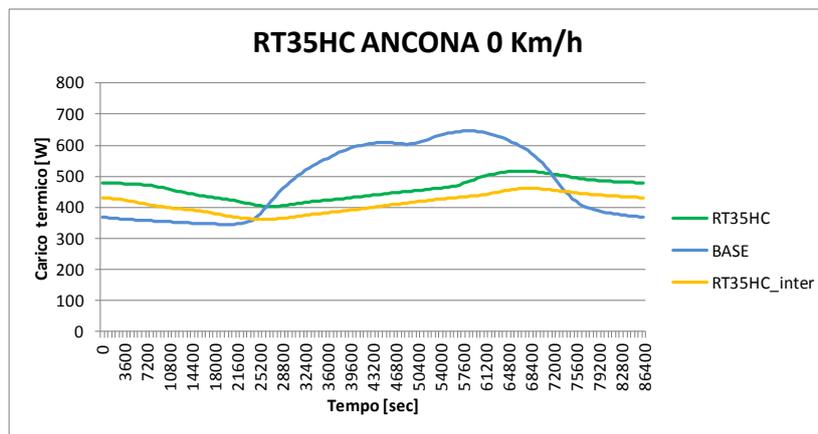


Figura 30 Grafico dell'andamento del flusso termico in funzione del tempo per vagone fermo, località Ancona, RT35HC.

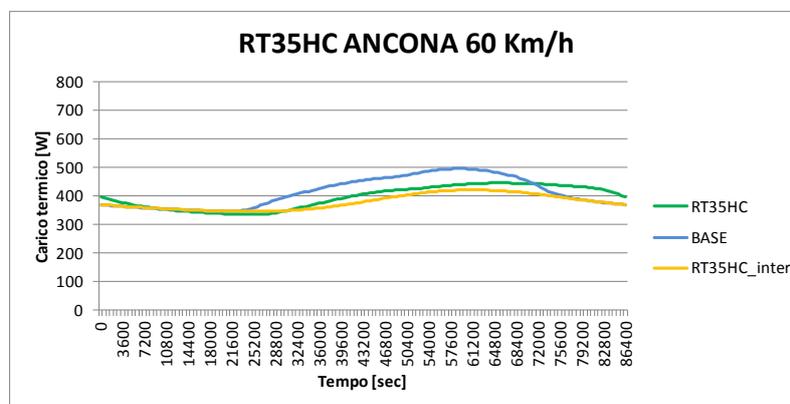


Figura 31 Grafico dell'andamento del flusso termico in funzione del tempo per vagone in movimento, località Ancona, RT35HC.

### 3 Analisi tecnologica e realizzazione dei prototipi con PCM

Questa fase della ricerca è stata condotta per individuare, analizzare le tecnologie riferite al packaging del PCM prima e all'intera stratificazione poi. Dai risultati si è passati alla realizzazione degli specifici prototipi sui quali sono successivamente state effettuate pratiche sperimentali sia in laboratorio indoor che all'esterno.

#### 3.1 Analisi tecnologica

I risultati complessivi dell'analisi teorica hanno indicato quali caratteristiche costruttive debba avere il pannello innovativo per la realizzazione dell'involucro della cella frigorifera.

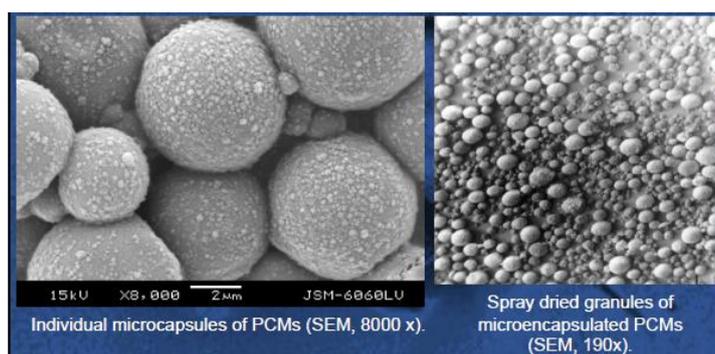
Il primo problema tecnologico da risolvere è stato come contenere all'interno della stratificazione il materiale in passaggio di fase RT35HC che, essendo una paraffina, nella fase di liquefazione dei vari cicli di comportamento diffonderebbe all'interno degli strati adiacenti. E' emersa quindi la necessità di realizzare lo strato funzionale di accumulo termico impermeabile al PCM in fase liquida. Particolarmente importante è stata la quindi progettazione e messa a punto del sistema di packaging necessario al contenimento del PCM e di implementazione dello stesso con gli strati adiacenti del pannello.

La progettazione del sistema ha avuto inizio dalla revisione bibliografia sulle modalità di impacchettamento del PCM, estensione di quella eseguita nel primo anno, che ha evidenziato come i sistemi attualmente presenti sul mercato abbiano, ciascuno per la propria caratteristica, peculiarità non compatibili con la natura degli strati adiacenti.

Tralasciando sali e concentrando l'attenzione solo sulle paraffine, i sistemi di packaging più usati sul mercato sono quelli riportati di seguito. Le paraffine possono essere commercializzate in polvere contenute in microcapsule delle quali in figura 33 si propone l'immagine al microscopio



Figura 32 Alcune forme di preparazione delle paraffine: a destra in polvere, a sinistra in microcapsule .



**Figura 33 Immagine al microscopio delle microcapsule .**

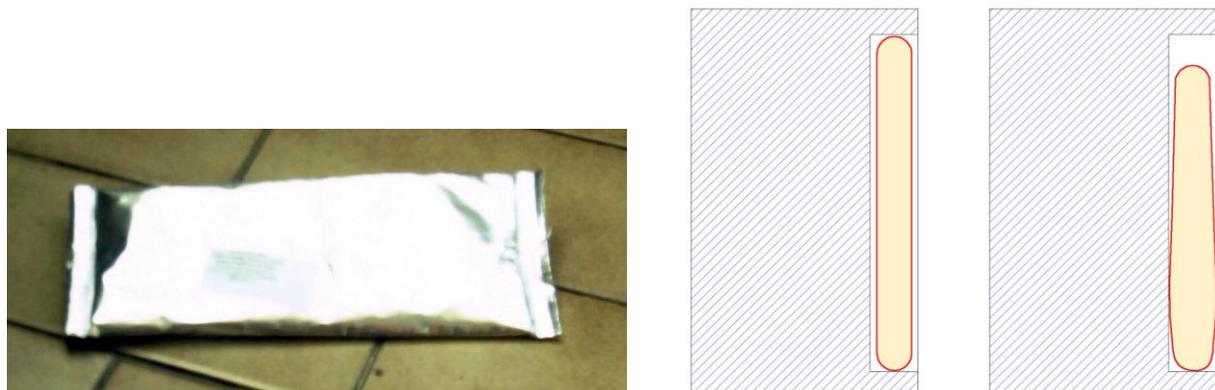
Questa tipologia di impacchettamento viene usata solo se il PCM va miscelato con altre sostanze come cemento, gesso per realizzare strati solidi nei quali però la densità del materiale in passaggio di fase risulta bassa e quindi altrettanto bassa è la capacità di accumulare calore per unità di massa della sostanza risultante. Tra l'altro la capacità di adesione agli strati contigui può risultare non compatibile con le sollecitazioni a vibrazione alle quali verrà sottoposto il pannello montato su carro ferroviario circolante. Tale soluzione è risultata quindi non applicabile al caso in esame.

Una seconda soluzione possibile è quella dell'impacchettamento all'interno di buste realizzate con fogli laminati composti di plastica e alluminio quali quelle mostrate nella figura seguente.



**Figura 34 Modalità di packaging con buste in foglio laminato polimero alluminio .**

Questa soluzione evidenzia un difetto che ne rende incompatibile l'uso nella stratificazione del pannello innovativo. Infatti la flessibilità del materiale del contenitore durante i cicli di fusione e solidificazione permette l'adattamento della forma alla variazione di volume specifico e di compattazione del materiale in fase liquida sul fondo.



**Figura 35. A destra la busta riempita con il PCM, a destra la deformazione della busta dopo cicli di passaggio di fase.**

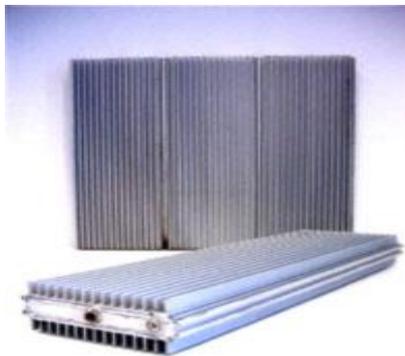
Altre soluzioni sono improponibili per forma e materiali usati. Ad esempio:

- a) contenitore sferico



**Figura 36. Le dimensioni di sistemi dai packaging a macrosfere in polimero**

b) contenitore di acciaio o alluminio



**Figura 37. Contenitori di PCM in profilati di acciaio e alluminio**

c) contenitori polimerici



**Figura 38. Contenitori di PCM in scatole di polimero**

Il risultato finale dell'analisi ha evidenziato la necessità di procedere ad una progettazione originale del sistema di impacchettamento, partendo dalle principali caratteristiche che lo stesso deve avere per renderlo compatibile con le esigenze funzionali del pannello innovativo e cioè:

- a. assoluta impermeabilità;
- b. adattamento alla variazione di volume specifico pur rimanendo rigido nella forma;
- c. tenace adesione agli strati adiacenti per resistere alle sollecitazioni meccaniche di vibrazione;
- d. Adesione agli strati adiacenti per permettere il corretto trasferimento del calore;
- e. Facile riempimento del PCM e perfetta sigillatura del contenitore;

### 3.2 Realizzazione del contenitore del PCM e riempimento

Dopo avere vagliato varie ipotesi di soluzione è stato scelto e studiato un sistema di impacchettamento del PCM la cui tecnologia è derivata dal packaging dei prodotti alimentari, quali ad esempio quelli per il contenimento dello yogurt. Questa soluzione prevede la realizzazione di pannelli di adeguate dimensioni, costituiti da una molteplicità di vaschette affiancate, di forma quadrata o rettangolare, aventi profondità uguale allo spessore che dovrà avere lo strato funzionale di PCM. Le vaschette, aperte nella parte superiore permettono il riempimento dall'alto, per caduta della paraffina in fase liquida ed infine possono essere sigillate per termosaldatura in pressione con un foglio di materiale composito. La forma delle vaschette e la loro composizione nel pannello creano tra una vaschetta e l'altra dei vani profondi che permettono, nella fase di schiumatura del poliuretano, l'invasione dello stesso tra i vani creando così un aggancio tenace tra i due strati. Lato superficie di sigillatura il packaging aderisce al foglio di lamierino di acciaio esterno in modo da permettere la corretta trasmissione, lato ambiente esterno, del calore prodotto sulla superficie del lamierino per assorbimento della radiazione solare. Per la costruzione del sistema di packaging a cura dell'ENEA sono state utilizzate tecniche industriali che hanno portato alla realizzazione di un primo prototipo denominato Prot 1 (Figura 39). Quest'ultimo è stato realizzato in PET (polietilene) stampato con la tecnica del vacuum che da un foglio di polimero riscaldato, sotto l'azione di forze di richiamo per depressione, si genera un pannello con un reticolo a maglia quadrata di 256 tasche parallelepipedo aventi dimensioni 3 cm x 3 cm x 1,5 cm. Tale pannello, dopo il riempimento delle tasche con il PCM deve essere sigillato con un foglio di PVC saldato a pressione e ad una certa temperatura compatibile con i materiali.

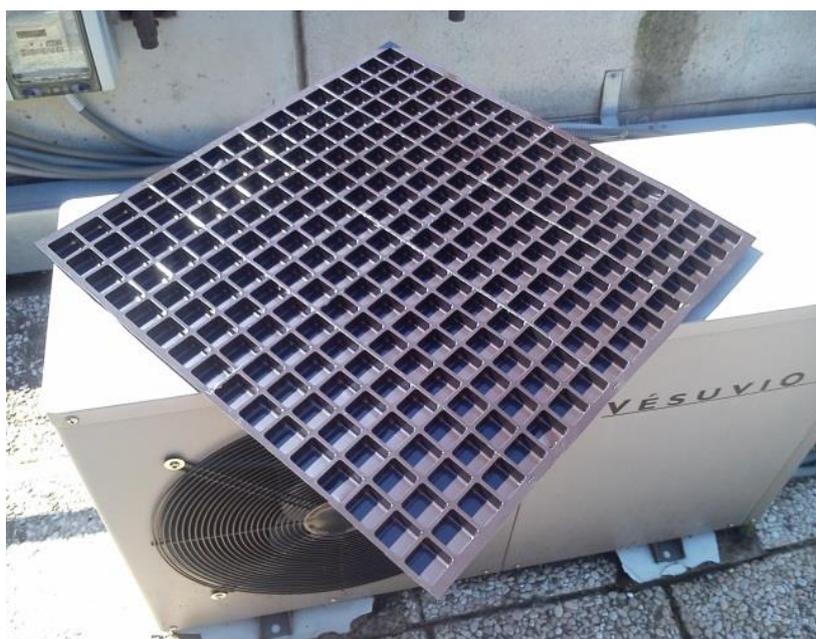
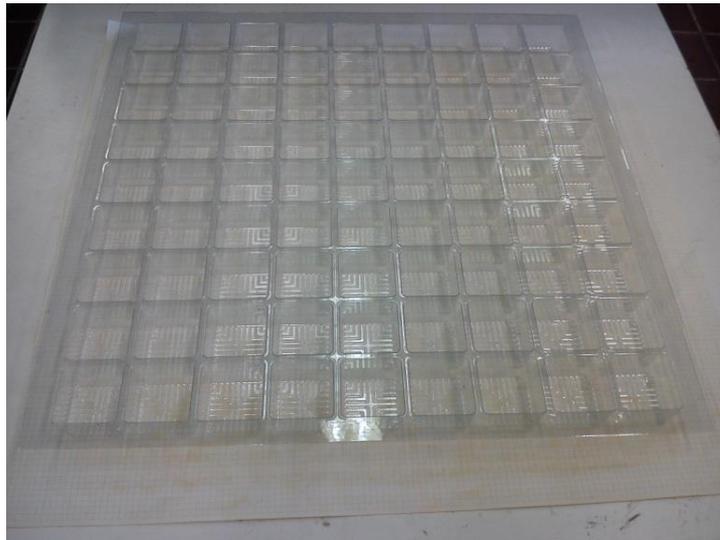


Figura 39. Primo prototipo di contenitore della paraffina

La prima sperimentazione su questo prototipo ha evidenziato difetti costruttivi sia di tipo dimensionale che di tenuta. Infatti la tecnica del vacuum, richiamando il materiale plastico scaldato a deformarsi da piano a tridimensionale, assottiglia negli spigoli lo spessore del materiale, rendendolo debole alle sollecitazioni di variazione di volume del PCM per effetto dei passaggi di fase. Sperimentalmente dopo alcuni cicli di fusione e solidificazione alcune zone delle vaschette hanno ceduto, creando il deflusso del PCM fuso.

Questa esperienza ha suggerito il perfezionamento del disegno e della tecnica costruttiva e così si è passati alla progettazione del secondo prototipo denominato Prot. 2. Quest'ultimo prevede la variazione per pannello del numero di vaschette e la variazione della tecnica costruttiva. Il nuovo pannello di packaging è caratterizzato da un reticolo a maglia quadrata di 81 vasche, di forma parallelepipedo, aventi dimensioni 5 cm x 5 cm x 3 cm di profondità, ma realizzato con la tecnica industriale dello stampaggio (Figura 40).



**Figura 40. Prototipo definitivo di contenitore della paraffina**

Per questo è stato necessario procedere da parte dell'ENEA alla realizzazione di un adeguato stampo con il quale, considerando le esigenze di sperimentazione, si sono prodotti più di 30 contenitori aventi dimensioni 51 cm x 51 cm, realizzati in PET stampato e sigillati con analogo tecnica descritta per Prot1.

A cura del DIISM-UNIVPM è stato curato il riempimento e sigillatura dei contenitori.

Per il riempimento di tutti i contenitori è stata stimata e successivamente utilizzata una massa di RT35HC di 160 kg , acquistata presso la Rubitherm GmbH di Berlino, Germania.

Il PCM spedito dalla fabbrica costruttrice all'interno di un barile metallico ( Figura 41) è stato inserito all'interno di un forno capace, alla temperatura di circa 50 °C al fine di fondere il PCM, senza creare problemi di decomposizione del materiale stesso (Figura 42).

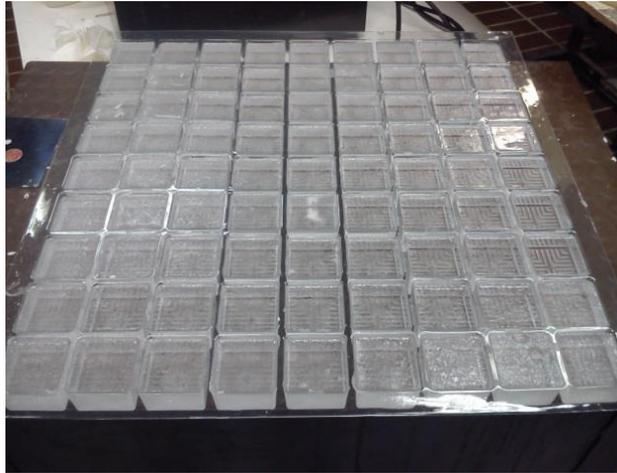


**Figura 41. La paraffina RT35HC**



**Figura 42. Riscaldamento in forno per liquefazione**

La paraffina, dopo essere stata portata totalmente a fusione all'interno di forno elettrico, è stata prelevata dal barile ed utilizzata per il riempimento delle tasche di ciascun contenitore con una tecnica puramente manuale (Figura 43.). Confermata la tipologia di packaging ovviamente, in fase di lavorazione industriale, dovrà essere sviluppato un macchinario per il riempimento automatico realizzato con un preriscaldatore della paraffina e un set di iniettori che in un tempo limitato riescano a riempire contemporaneamente tutte le vaschette del contenitore.



**Figura 43. Riempimento del modulo contenitore con PCM in fase liquida**

Nelle pratiche eseguite in laboratorio, in assenza di temperature ambiente superiori al punto di fusione, la paraffina è lentamente passata allo stato solido cambiando visivamente la trasparenza (Figura 44).



**Figura 44. Il modulo contenitore con PCM in fase solida**

La fase successiva ha visto effettuare la sigillatura termica a pressione costante dei contenitori applicando la pellicola sulla superficie alla pressione di 3bar ed una temperatura di 170°C, secondo quanto prescritto dal fornitore che ha portato al prodotto finale (Figura 45, Figura 46).

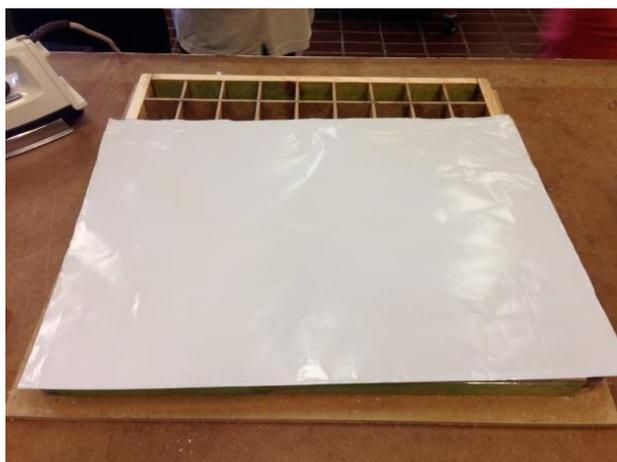


Figura 45. Fase di sigillatura del contenitore

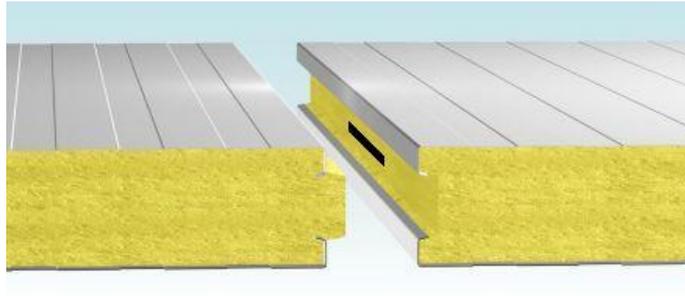


Figura 46. Il pannello sigillato contenente il PCM

### 3.3 Realizzazione del pannello sandwich.

Le elaborazioni numeriche hanno portato a definire completamente il progetto termico e di conseguenza la stratificazione del pannello contenente PCM e a valutarne i comportamenti energetici per le caratteristiche ambientali nelle quali i materiali compositi vengono ad agire e sotto le varie condizioni al contorno.

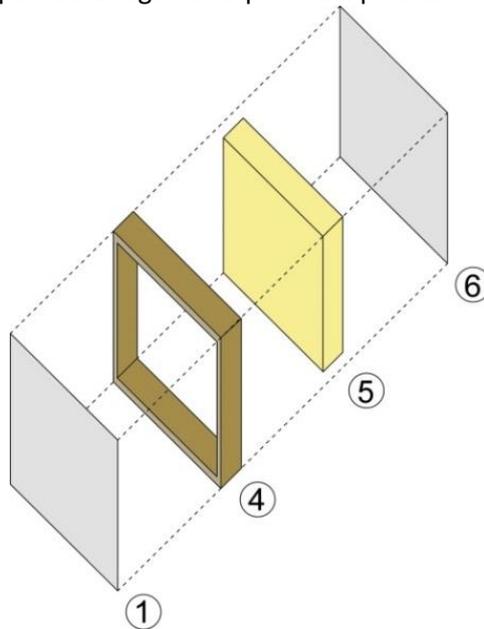
La progettazione tecnologica del pannello ha imperniato i presupposti sulla composizione del pannello base di una attuale cella frigorifera che prevede, secondo quanto riportato nella immagine che segue (Figura 47), a partire dall'interno i seguenti strati: lamiera plastificata, schiuma poliuretanicca ed infine lamiera plastificata.



**Figura 47. Composizione pannello di riferimento**

Lo spessore dello strato di materiale isolante è sempre proporzionale alla temperatura interna di funzionamento della cella e per il caso di studio, con cella negativa a 0°C, è stato definito in 10 cm.

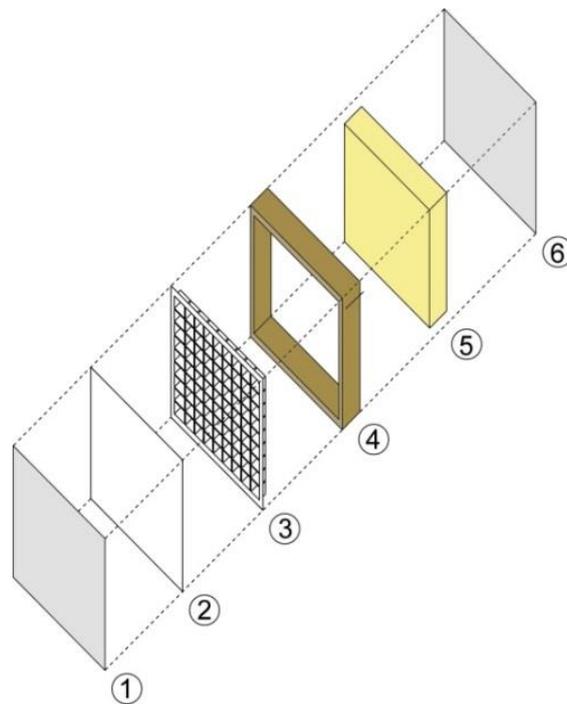
A questo punto i componenti del prototipo pannello base risultano essere i seguenti: 1 Lamierino esterno plastificato (spessore 8/10 mm), 4 telaio (tavola di legno per il prototipo, mentre nelle costruzioni industriali è profilato polimerico), 5 schiuma poliuretana espansa, 6 Lamierino interno plastificato (spessore 8/10 mm). Essendo necessario realizzare un pannello da testare sperimentalmente in camera climatica sotto la radiazione emessa dal simulatore solare, le dimensioni del prototipo sono state fissate in circa 0.6 x 0.6 m. In figura 48 si riporta il disegno in esploso del pannello con i principali componenti.



**Figura 48. Stratificazione del pannello di riferimento**

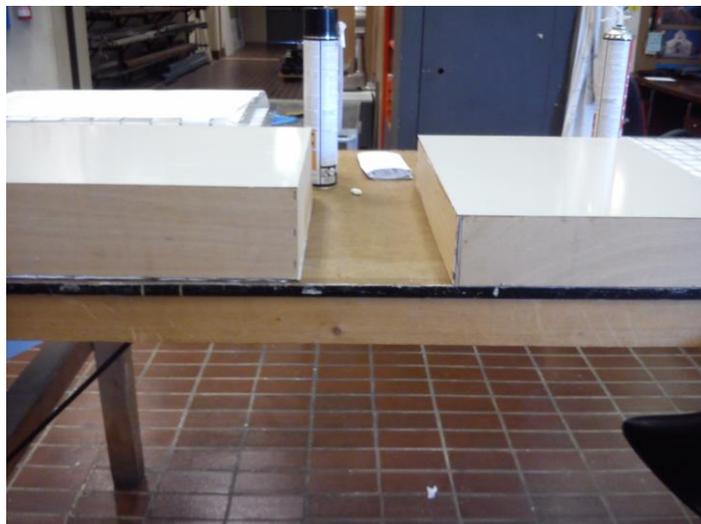
Per rendere possibile il confronto anche il pannello innovativo avrà composizione e dimensioni derivate da quello base con l'inserimento del pannello contenitore del PCM (Figura 49).

Pertanto, seguendo il disegno in esploso del pannello innovativo di figura risultata la seguente con l'inserimento tra lo strato di poliuretano espanso e la lamiera di finitura si può verificare la sequenza dei componenti e cioè: 1 lamierino esterno, 2 strato di sigillatura PCM, 3 strato di PCM, 4 telaio, 5 poliuretano espanso, 6 Lamierino interno



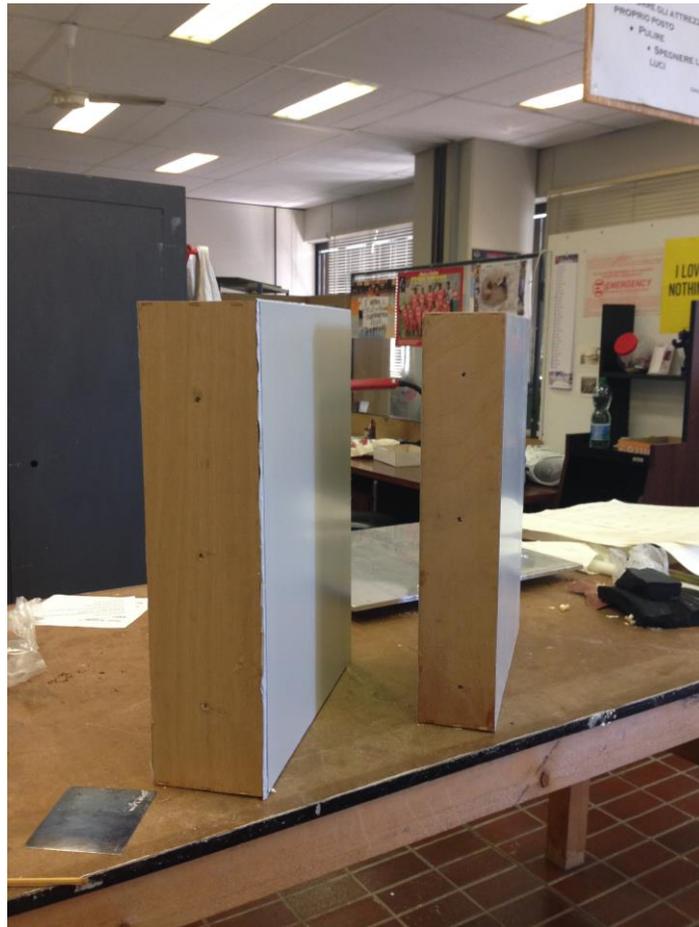
**Figura 49. Stratificazione del pannello implementato con PCM**

In funzione di queste indicazioni progettuali, i prototipi sono stati realizzati dall'ENEA e risultano essere quelli visualizzati nella immagine seguente. In particolare si può notare come nel pannello di destra che è quello "base", lo spessore risulti inferiore a quello di sinistra (con PCM) per il mantenimento dello spessore della schiuma poliuretanic a valore identico di 10 cm.



**Figura 50. I pannelli prototipo: da sinistra quello con PCM e quello base**

Nella immagine riportata nella Figura 51 si nota invece l'aspetto esteriore, di finitura dei due prototipo che sono stati messi a confronto nelle prove di laboratorio indoor.



**Figura 51. Finitura dei prototipi**

## 4 Analisi sperimentale

L'analisi sperimentale condotta ha avuto lo scopo di verificare le prestazioni delle soluzioni tecnologiche studiate e i prototipi realizzati. L'obiettivo della fase sperimentale non è stato solo di verificare il comportamento energetico e i benefici derivanti dall'applicazione, ma è stato quello di ottenere informazioni riguardanti l'affidabilità e le problematiche legate all'aspetto tecnologico.

Le analisi condotte possono essere suddivise in:

- Analisi sperimentali indoor sul prototipo di pannello sandwich, effettuate in camera climatica con condizioni ambientali impostate e con l'utilizzo del sistema di simulazione dell'irraggiamento solare.
- Analisi sperimentale outdoor sulle celle frigorifere, con condizioni al contorno reali.

### 4.1 Analisi sperimentale indoor

#### 4.1.1 Camera di prova

I test per la caratterizzazione dei pannelli sono stati eseguiti in una camera di prova che ha la caratteristica di riprodurre le condizioni climatiche desiderate. Come mostrato nella figura 52, l'apparato è costituito da un telaio portante con dimensioni pari a 4,37 m per 3,39 m per un'altezza di 2,70 m. La tamponatura delle pareti è costituita da pannelli in cartongesso e poliuretano, mentre il pavimento, di tipo galleggiante, sollevato di 40 cm dal piano del laboratorio, è costituito da moduli quadrati 60 cm x 60 cm, supportati da piedini regolabili in acciaio zincato. Il soffitto è stato realizzato con elementi prefabbricati in fibra montati su telaio in alluminio. Poiché il 70% della superficie dell'involucro è costituito da pannelli modulari facilmente sostituibili in qualsiasi punto della camera di prova, è possibile inserire elementi destinati all'immissione e alla ripresa dell'aria con qualsiasi combinazione, determinando così configurazioni diverse. In questo modo si possono definire i migliori assetti di distribuzione dell'aria per i diversi tipi di diffusore. La camera climatica è dotata di circuito aerulico (figura 54) alimentato da piccola unità di trattamento, collegata a produttori di acqua refrigerata e calda. Questi fluidi possono anche essere inviati a pannelli radianti a piastra piana immerse su due delle pareti verticali in maniera di poter impostare temperature superficiali delle pareti. Per questo ultima funzione la camera è dotata di un complesso sistema idronico (figura 53) di regolazione e misura delle portate di fluido immerse.



**Figura 52. Particolari costruttivi della camera climatica : struttura**



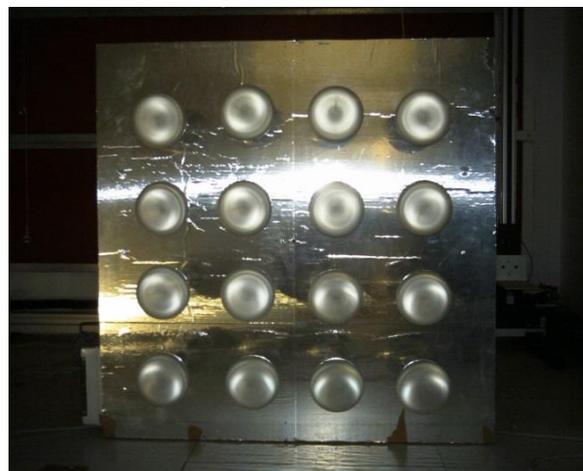
**Figura 53. Particolari costruttivi della camera : il sistema di regolazione idronico**



**Figura 54. Particolare dei circuito aeraulico**

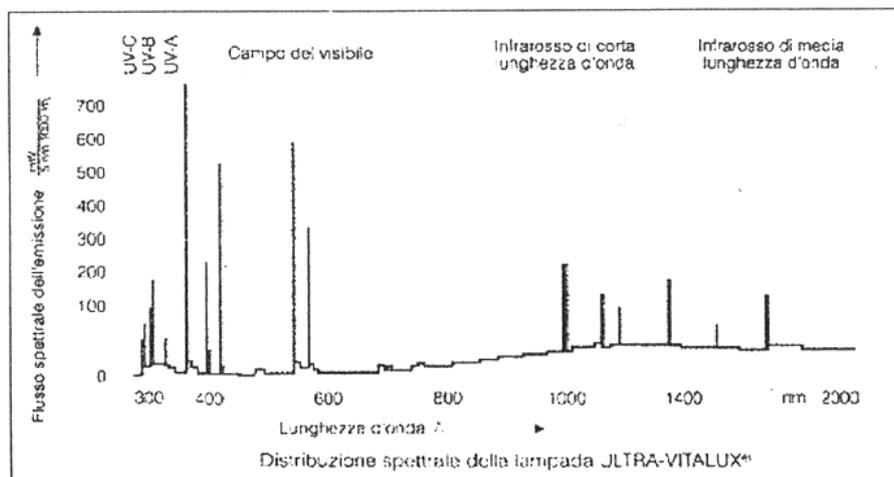
#### 4.1.2 Sistema di simulazione solare

Il simulatore solare è costituito da un pannello in legno, concepito in modo da poter essere facilmente orientabile secondo le due direzioni (in altezza e lungo il suo piano di scorrimento) grazie ad una guida tubolare e a quattro ruote che gli permettono di muoversi lungo il piano d'appoggio; i portalampada sono alloggiati sul piano verticale del pannello ligneo e capaci di ruotare attorno al proprio asse anche se, per la sperimentazione in corso, ciò non è risultato necessario.



**Figura 55. Il simulatore del flusso solare**

Il numero delle lampade è stato scelto per simulare un flusso solare capace di irraggiare la superficie in maniera uniforme. Per questo l'apparato è costituito da 16 proiettori OSRAM Ultra-Vitalux, disposti su una superficie di 1 mq e aventi distribuzione spettrale come rappresentato nella figura che segue.



**Figura 56. Distribuzione spettrale di una lampada OSRAM Ultra-Vitalux**

Le lampade sono trattate con un film diecrico che riduce l'emissione infrarossa e realizzano uno spettro simile a quello della luce solare. Questo simulatore può produrre flussi sino a 1'000 W/mq su di un'area di 1,20 x 1,20 m, con un'uniformità del 5% circa. L'emissione della lampada, simile a quella del sole in alta montagna, viene prodotta da un tubo di scarica in mercurio ad alta pressione (emissione ultravioletta) e da un filamento in tungsteno (emissioni visibili ad infrarossi) contenuto in un bulbo di vetro duro a forma di fungo con riflettore alluminato incorporato che consente il passaggio alle sole emissioni simili a quelle solari.

Grazie alle sue proprietà, la lampada Ultra-Vitalux si presta in modo particolare all'esecuzione di prove secondo la norma DIN 50 (UNI 4818) sull'influenza del clima su materiali ed apparecchiature, quali:

- idoneità ai climi tropicali;
- invecchiamento artificiale;
- determinazione delle variazioni delle caratteristiche dei materiali, della sicurezza di funzionamento e della durata in condizioni climatiche particolari.

La lampada solare OSRAM Ultra-Vitalux, rappresentata in figura 57, viene avvitata all'apparecchio portalampana e collegata ad una tensione di rete. La lampada deve restare accesa per circa 2 minuti prima dell'utilizzazione. Dopo essere stata spenta, può essere riaccesa solo dopo circa 2-3 minuti di tempo di raffreddamento.



**Figura 57. Lampada OSRAM Ultra-Vitalux**

Di seguito vengono riportate le caratteristiche tecniche delle lampade impiegate:

- potenza assorbita: 300 W;
- attacco: E27 (IEC 7004-21);
- durata utile media: 1'000 ore;
- posizione di funzionamento: qualsiasi;
- tempo di riscaldamento prima dell'uso: 2 minuti;
- tempo di raffreddamento dopo lo spegnimento: 2-3 minuti.

#### 4.1.3 Allestimento della camera di prova

Il confronto di comportamento energetico tra il pannello contenente il PCM e quello tradizionale, è stato effettuato allestendo un sistema di prova all'interno della camera ventilata (schema di Figura ). Il pannello di prova è stato inserito come parete di tamponamento del sesto lato di un box refrigerato (posizione indicata sul disegno con il 3). La refrigerazione dell'aria interna al box per instaurare le temperature interne di una cella frigorifera è stata effettuata inserendo all'interno del box un ventil-convettore (4) alimentato da bagno termostatico (5). Successivamente è stato installato il sistema di monitoraggio dei flussi e delle temperature composto dalle sonde indicate in Figura 58 con i simboli rossi. Per misurare le temperature nei vari strati dei pannelli e nell'ambiente sono state installate termoresistenze PT100 e termocoppie di tipo T, calibrate e riferite allo zero. Nella figura viene è illustrato il posizionamento delle termocoppie per il rilevamento delle temperature dell'aria all'interno dei due ambienti che sono stati creati nella camera ventilata. Il sistema di monitoraggio per prove consistevano in un sistema di rilevamento della temperatura dell'aria attraverso una serie di tre termocoppie tipo T per ambiente poste in posizione centrale ma posizionate ad altezze diverse rispettivamente a 50, 140 , 230 cm di altezza dal piano del pavimento. Terminata la predisposizione, sono stati effettuati i test durante i quali Il pannello è stato irraggiato (Figura 59 ) con il simulatore solare (1,) mentre venivano rilevati e registrati i valori di temperatura e di flusso termico sulle superfici interna ed esterna del pannello ed il valore di temperatura dell'aria sia nella camera climatica che all'interno del box.

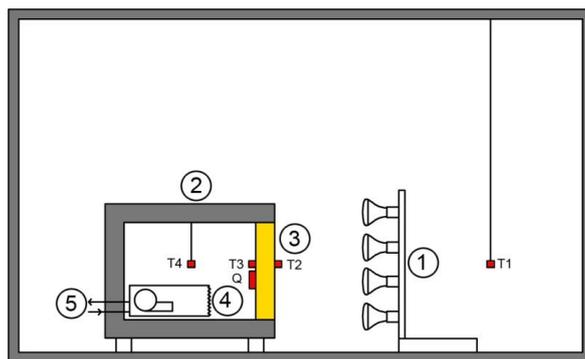


Figura 58. Schema dell'apparato di prova e del sistema di monitoraggio



Figura 59. Immagine ripresa durante una prova indoor con il simulatore solare

#### 4.1.4 Il sistema di acquisizione dei dati

Per l'acquisizione dei valori delle temperature durante le prove in camera climatica è stato utilizzato un sistema di acquisizione composto dai seguenti elementi:

- HP AGILENT 34420 A NANOVOLT – MICROOHM METER
- HP 34970 A DATA ACQUISITION – SWITCH UNIT
- PC con Processore Pentium 800 MHz
- Termoresistenze PT100
- Termocoppie tipo T

La gestione delle unità di acquisizione per la conversione analogico-digitale erano controllate attraverso il software "HP BENCHLINK DATA LOGGER" che consentiva di acquisire e memorizzare in un database i valori delle temperature letti durante le prove (Figura 60).



**Figura 60 – L'apparecchiatura per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati**

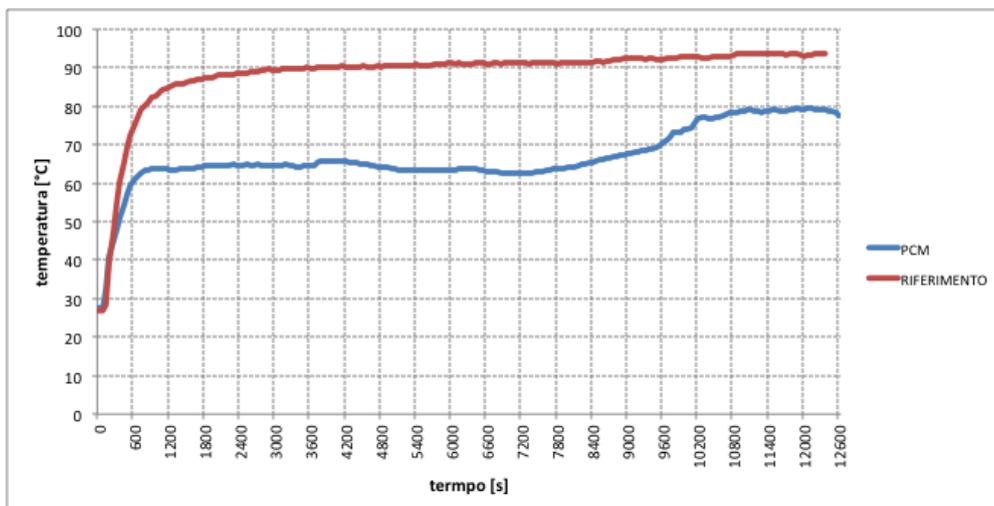
Nelle figure seguenti, che vanno da 61 a 65, vengono riportati gli andamenti delle temperature e dei flussi termici rilevati durante un periodo di prova di 12.600 s, cioè 3,5 ore. In esse, dopo un primo periodo di regime variabile, si nota il raggiungimento del regime stazionario. Le prove sono state svolte in momenti separati cercando di riprodurre più possibile le stesse condizioni iniziali e al contorno (temperatura dell'aria interna ed esterna, irraggiamento).

Da una analisi di dettaglio dei singoli diagrammi si possono fare alcune riflessioni.

La Figura 61 mostra la differenza tra le temperature superficiali esterne misurate rispettivamente sul pannello base (linea rossa) e con PCM (linea azzurra). I più alti valori di temperatura mantenuti nel tempo sulla superficie esterna del base rispetto al pannello con PCM, dimostrano come il materiale in passaggio di fase assorba, fondendo, il calore prodotto per assorbimento della radiazione solare da parte del lamierino esterno. Analogamente dal diagramma dei flussi termici è possibile notare come il PCM tenda a ridurre i flussi entranti, durante il periodo in cui attraverso il passaggio di fase assorbe calore latente.

Di conseguenza si può notare da Figura 64 come questa situazione si ripercuota anche sulla superficie interna dei pannelli, pur con una differenza inferiore a quella esterna. Le rimanenti Figure 62 e 63 mostrano come durante le prove effettuate sia sul pannello base che su quello con PCM, le condizioni di temperatura dell'aria all'interno e all'esterno dei pannelli siano state sostanzialmente uguali.

La Figura 65 infine da conferma a quanto risulta dalle Figure 61 e 64, mostrando la differenza tra i flussi termici per unità di superficie entranti attraverso la superficie interna dei pannelli.



**Figura 61. Confronto delle temperature superficiali esterne tra pannello di riferimento e pannello implementato con PCM.**

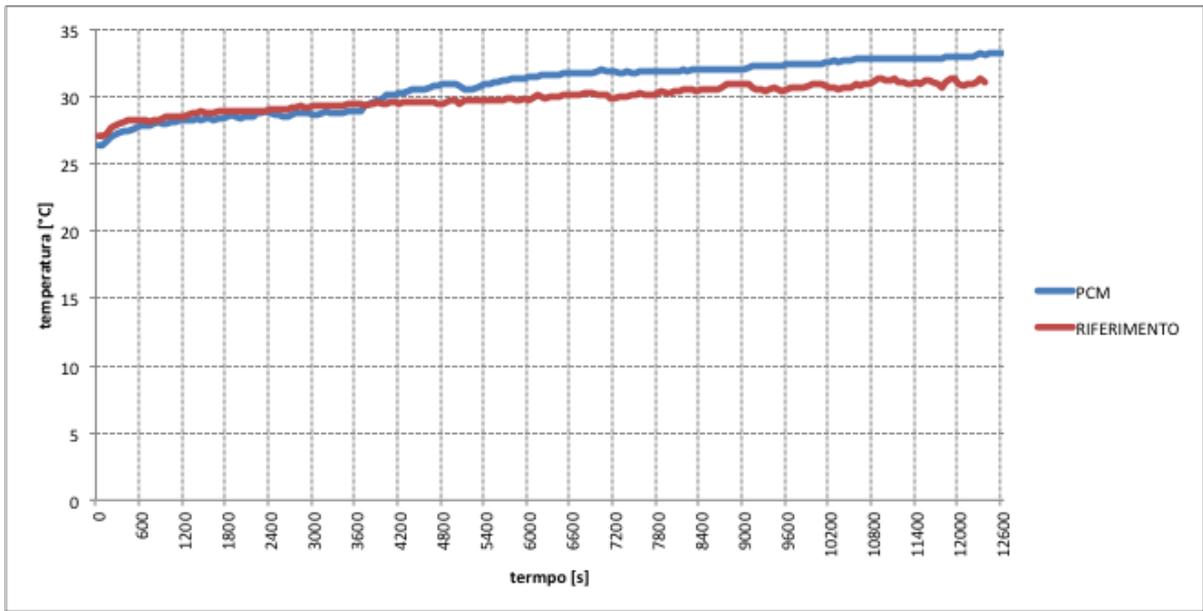


Figura 62. Confronto delle temperature dell'aria esterna durante le prove del pannello di riferimento e del pannello implementato con PCM.

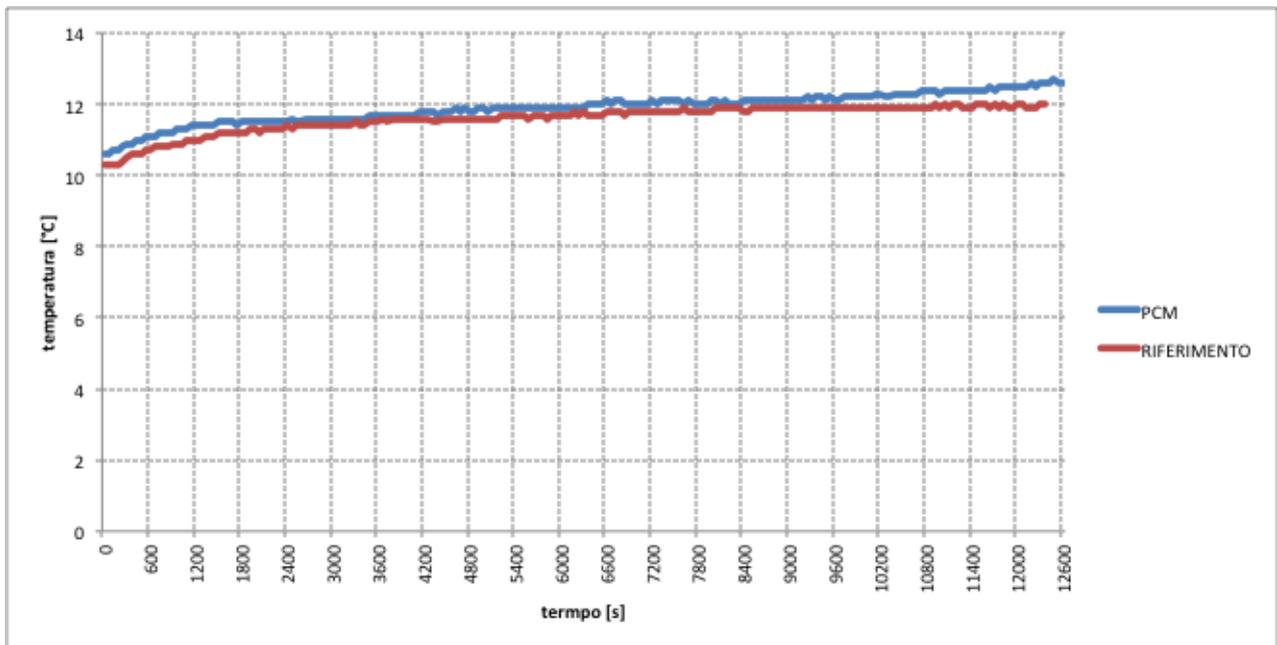


Figura 63. Confronto delle temperature dell'aria interna durante le prove del pannello di riferimento e del pannello implementato con PCM.

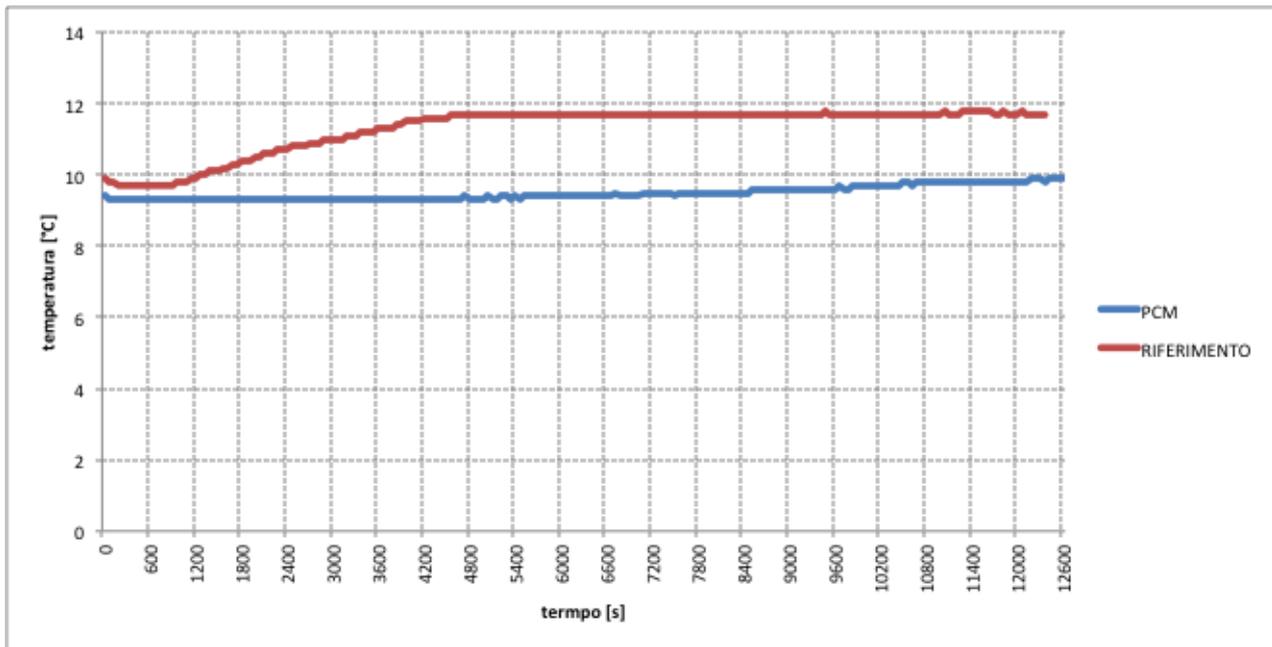


Figura 64. Confronto delle temperature superficiali interne tra pannello di riferimento e pannello implementato con PCM.

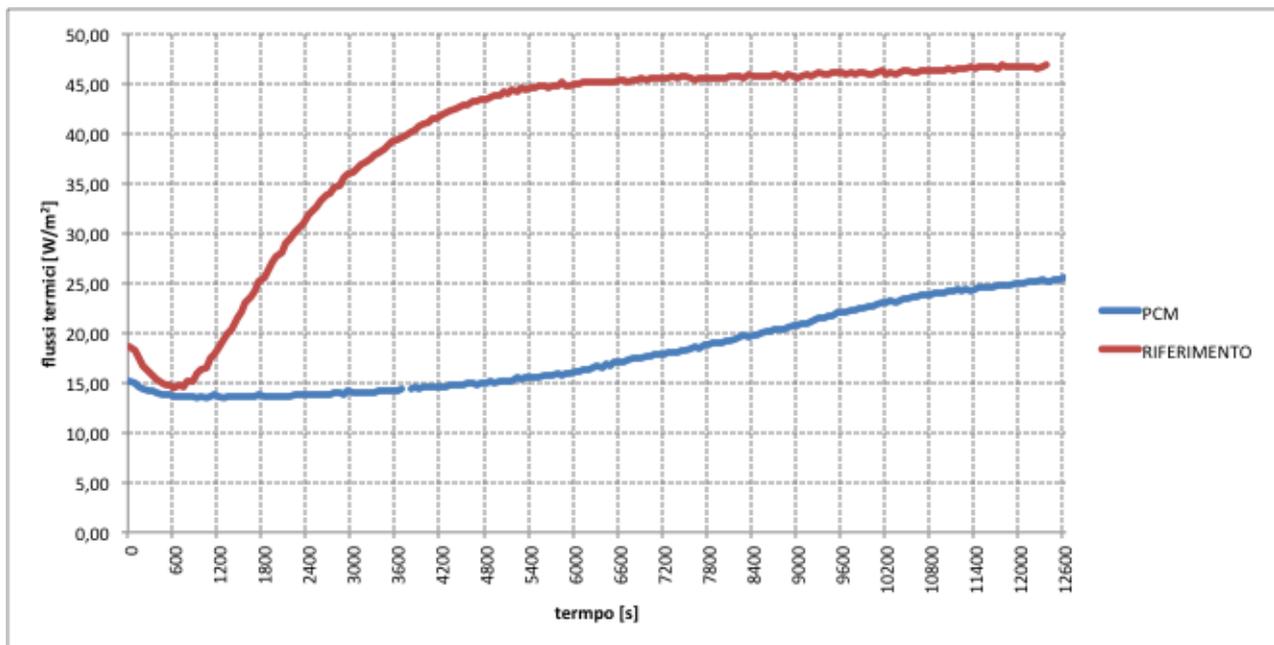


Figura 65. Confronto flussi termici misurati sulla superficie interna tra pannello di riferimento e pannello implementato con PCM.

## 4.2 Analisi sperimentale outdoor

Una seconda fase sperimentale è stata effettuata utilizzando le due celle frigorifere esistenti, modificando l'involucro di una delle due con la sostituzione dei pannelli originali, di natura tradizionale, con quelli innovativi. Le celle sono state esposte alle condizioni climatiche dell'ambiente esterno con lo scopo di verificare il comportamento energetico dell'involucro implementato con lo strato di PCM a confronto con quello dell'involucro tradizionale. A tal fine è progettato e sviluppato un idoneo sistema di monitoraggio per la registrazione di tutti i dati ambientali esterni e di quelli interni alle celle ed agli strati di materiali componenti i pannelli.

### 4.2.1 Allestimento della celle frigorifera di prova

L'analisi outdoor è stata condotta utilizzando le due celle frigorifere acquistate nel primo anno della ricerca posizionale sull'area all'aperto del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze matematiche. Ricordando che nel primo anno ad una delle due celle era stata applicata sulla unica superficie esterna della copertura uno strato di PCM contenuto in profilati sigillati di alluminio, come da programma, nel secondo anno l'intera superficie esterna esposta alla radiazione della cella è stata implementata con uno strato di tre centimetri di PCM. Sempre da programma era infatti stato ipotizzato il confronto di comportamento alle condizioni esterna tra una cella tradizionale ed una identica, ma dotata sulla sua superficie esterna di uno strato uniforme di PCM.

Pertanto, utilizzando 28 contenitori sigillati di PCM, come da precedente descrizione, si è applicato lo strato di paraffina alla superficie esterna della cella, proteggendolo successivamente con il lamierino plastificato esterno. In questo modo si è realizzata la parete come da modello utilizzato nelle elaborazioni numeriche, caratterizzata dalla seguente stratificazione, partendo dall'interno: lamierino plastificato, 10 cm di poliuretano espanso, 3 cm di paraffina, lamierino plastificato esterno. Dalle immagini delle figure seguenti si può verificare il metodo costruttivo e l'aspetto esteriore della cella modificata.



Figura 66. Prime fasi del montaggio dei contenitori di PCM



**Figura 67. Chiusura con il lamierino di finitura esterna delle pareti della cella frigo di prova**



**Figura 68. Completamento dell'allestimento della celle frigo di prova.**



**Figura 69. Le celle di prova a confronto**

#### 4.2.2 Sistema di monitoraggio

Durante l'installazione degli strati, sono state installate sonde di temperatura e di flusso all'interfaccia degli strati che influenzano il campo termico con maggiore intensità. Il sistema di monitoraggio è stato completato inserendo anche sulla superficie interna della parete e in aria, nel vano della cella sonde per la misura dei parametri termici fondamentali come flusso termico, temperatura superficiale e temperatura interna dell'aria. L'analisi termica viene poi completata con la registrazione dei dati climatici esterni quali temperatura dell'aria, irraggiamento solare, velocità e direzione del vento. Le sonde sono state collegate a data logger per la registrazione dei dati che vengono successivamente scaricati con idoneo software su personal computer per essere di seguito elaborati sotto forma di grafici dei quali si riportano quelli relativi alle interfacce tra gli strati delle tre pareti orientate a sud, est, ovest e alla copertura orizzontale.

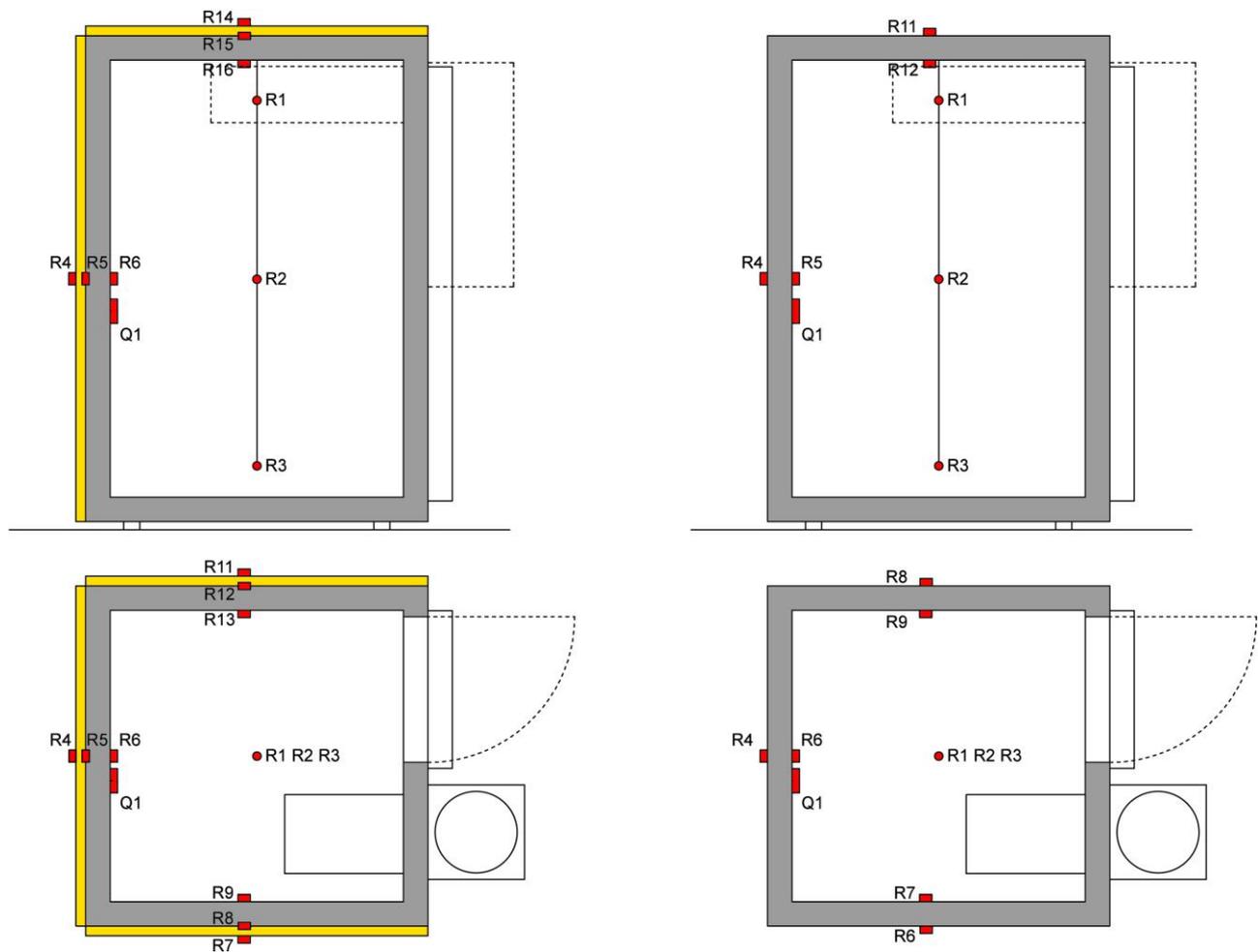


Figura 70. Sezione e pianta delle celle frigorifere e dei sensori per il monitoraggio

Per la misura del flusso termico entrante dalla superficie di copertura sono stati utilizzati termoflussimetri Lsi lastem BSR240 (figura 37), posizionati sulla superficie interna della struttura. Le caratteristiche tecniche vengono riportate in Tabella 9.

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

**Tabella 9. Caratteristiche tecniche dei termoflussimetri**

Per la misurazione della temperatura dell'aria e superficiale all'intradosso delle superfici di copertura, 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 all'interno degli ambienti (Figura 38)



**a**



**b**



**c**



**d**

**Figura 71** immagini della strumentazione: **(a) termoflussimetro, (b) Datataker DT 500 (c) termoresistenze per la misura della temperatura dell'aria (d) termoresistenze per la misura della temperatura superficiale.**

Per l'acquisizione, la conversione e la memorizzazione delle grandezze sono stati utilizzati degli acquisitori DATATAKER DT 500 (figura 39), uno per ogni ambiente monitorato. Il Datataker è un dispositivo per la acquisizione dei valori da rilevare attraverso dei sensori. 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 Datalogger attraverso un cavo seriale collegato ad una porta COMMS e scaricare i dati memorizzati nella memoria interna.

Il monitoraggio è stato effettuato durante il periodo estivo per 1 settimana consecutiva, caratterizzate da condizioni climatiche variabili.

#### 4.2.3 Risultati delle prove sperimentali

I risultati delle prove sperimentali sono stati riportati in grafici alcuni dei quali mostrano l'andamento delle temperature delle interfacce più significative tra gli strati delle pareti Sud, Est, Ovest e della copertura. Com'è possibile verificare dai grafici proposti, vengono riprodotti gli andamenti di alcune temperature significative delle due stratificazioni messe a confronto. Per la parete di riferimento quelle superficiali interne ed esterne, misurate sui lamierini di finitura, mentre per la parete innovativa, le stesse due temperature più quella di interfaccia tra PCM e poliuretano espanso (linea rossa). E' proprio l'andamento di questa ultima curva che evidenzia uno sfasamento temporale con i massimi picchi della temperatura superficiale esterna, caratteristica del comportamento termico dei materiali in passaggio di fase. Altra condizione rilevabile è quella per la quale le temperature superficiali interne dei pannelli con e senza PCM sono scarsamente influenzate dalla diversa composizione, ma chi determina i valori registrati è l'influenza dei cicli di funzionamento della macchina frigorifera e della convezione forzata dell'aria interna sulle superfici introdotta dal ventilatore dell'evaporatore.

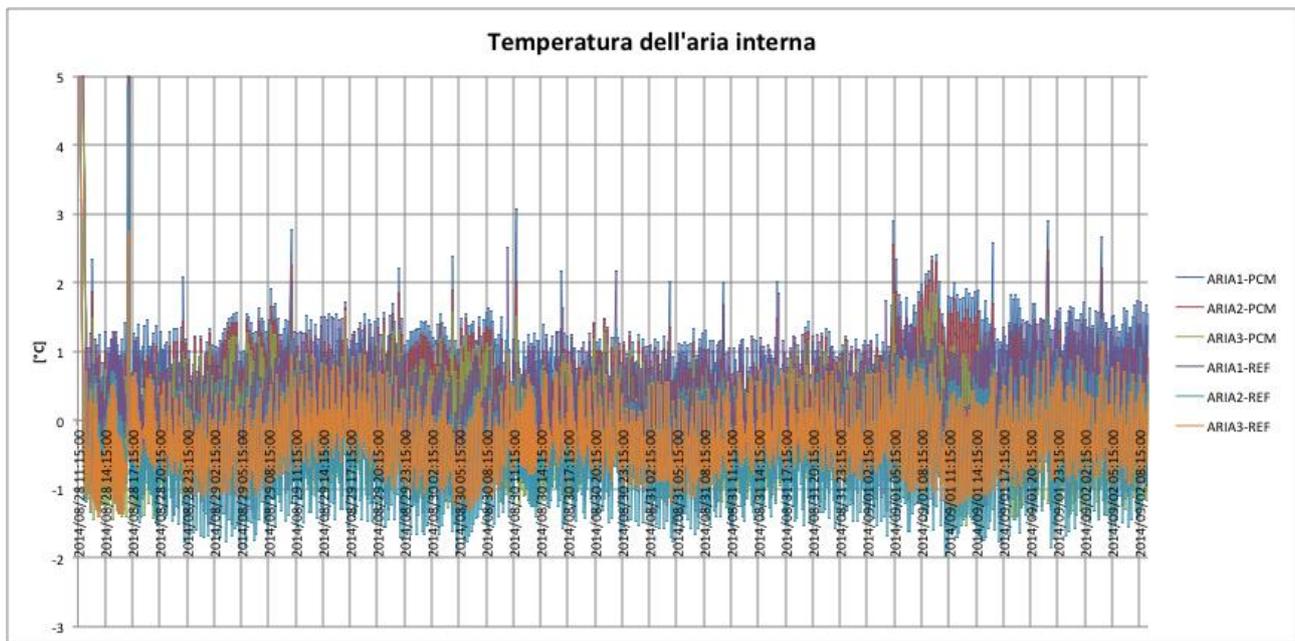


Figura 72. Andamento delle Temperature interne alle celle frigorifere.

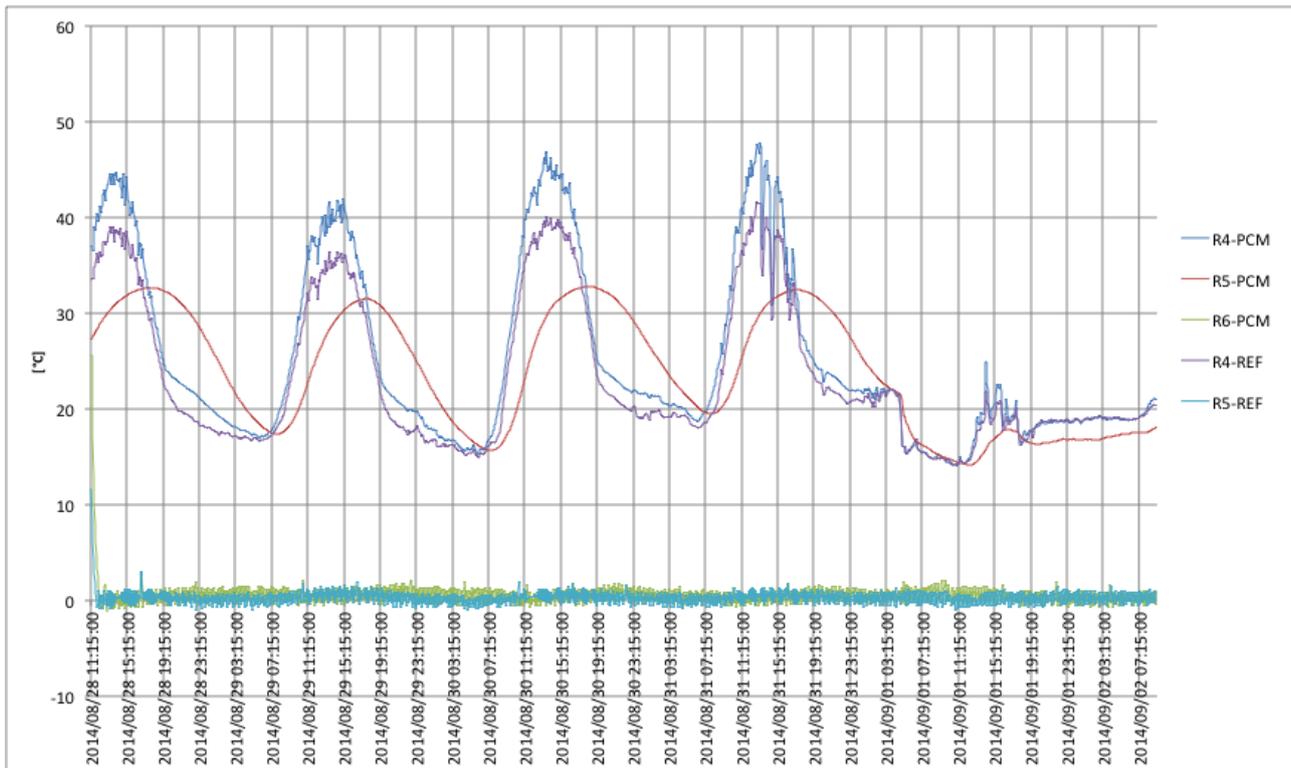


Figura 73. Andamento delle temperature alle interfacce della parete Sud

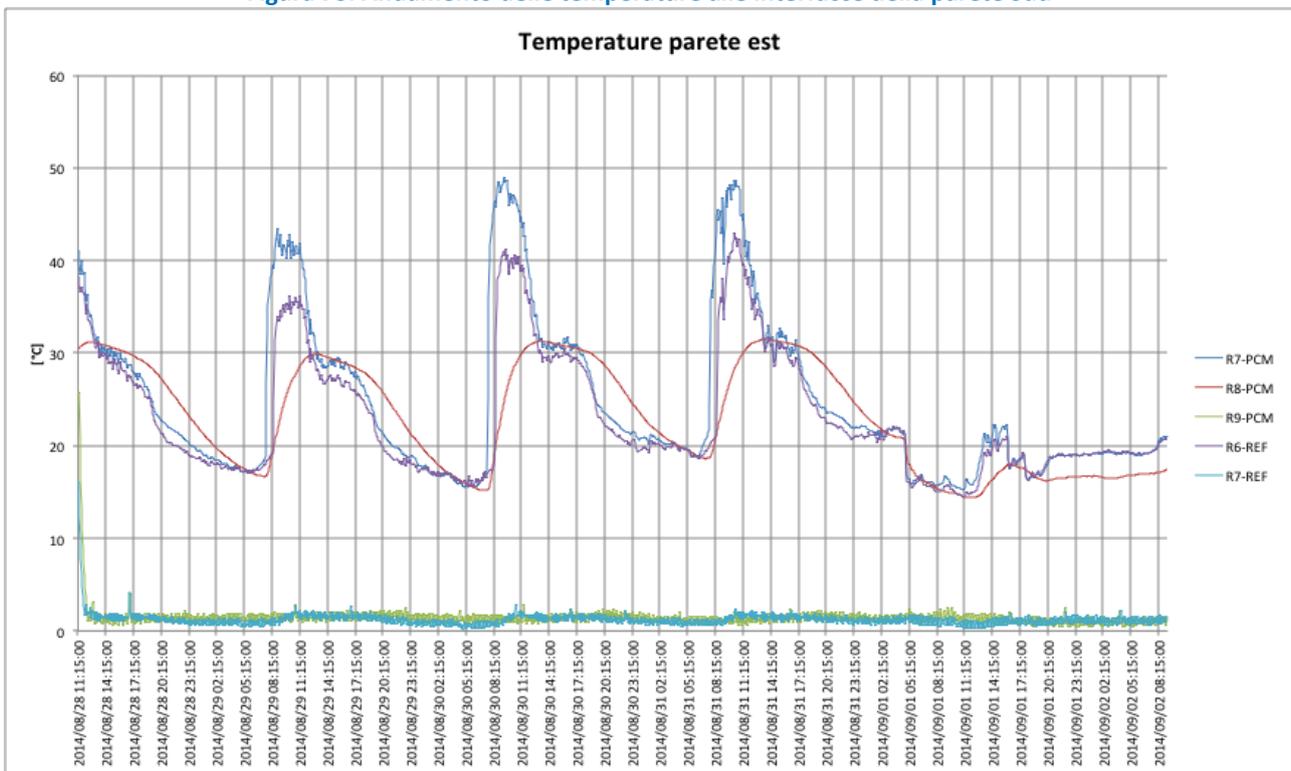


Figura 74. Andamento delle temperature alle interfacce della parete Est

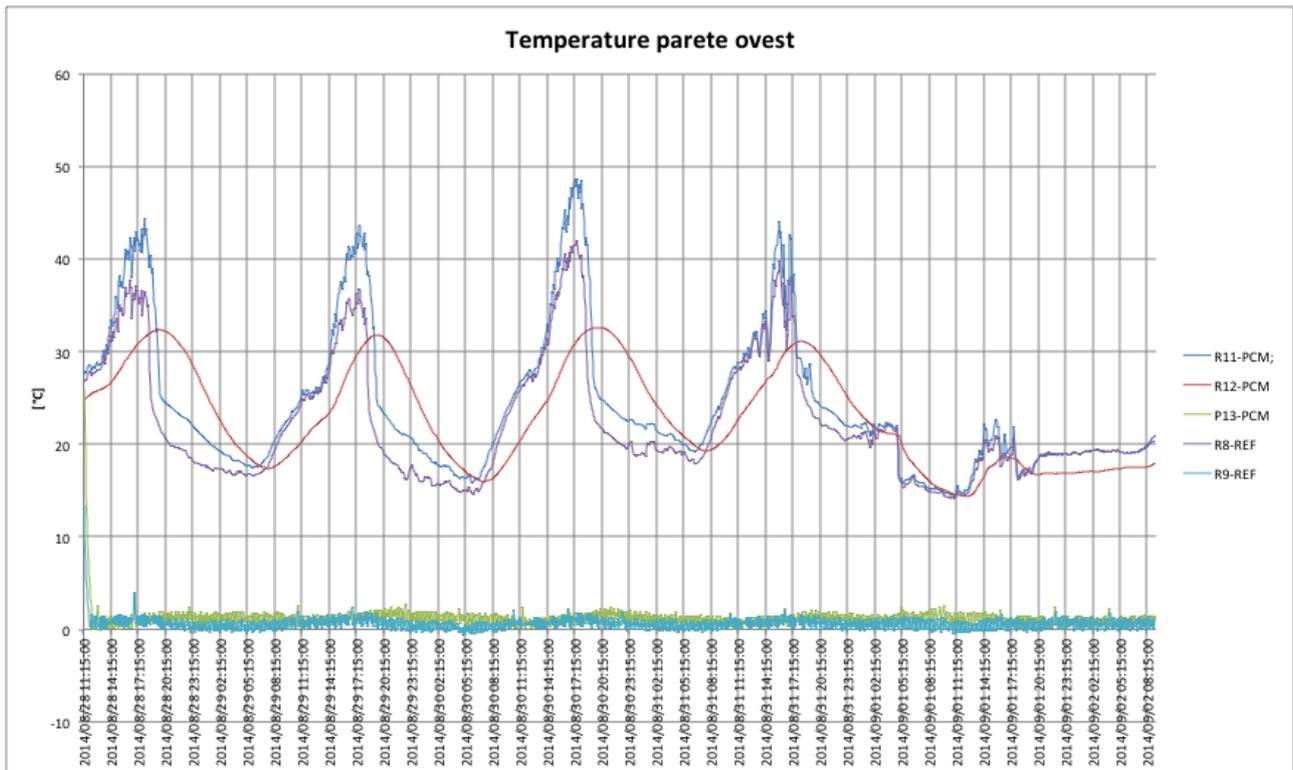


Figura 75. Andamento delle temperature alle interfacce della parete Ovest.

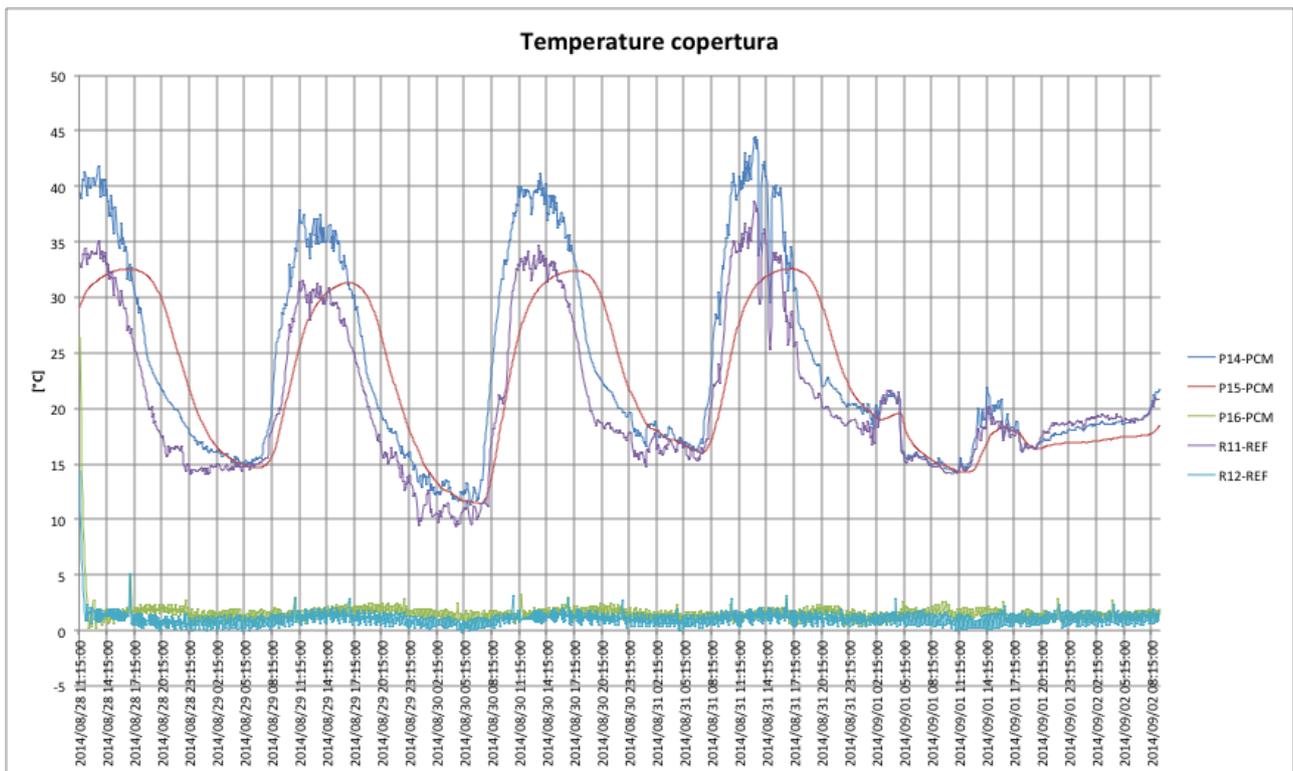


Figura 76. Andamento delle temperature alle interfacce della copertura.

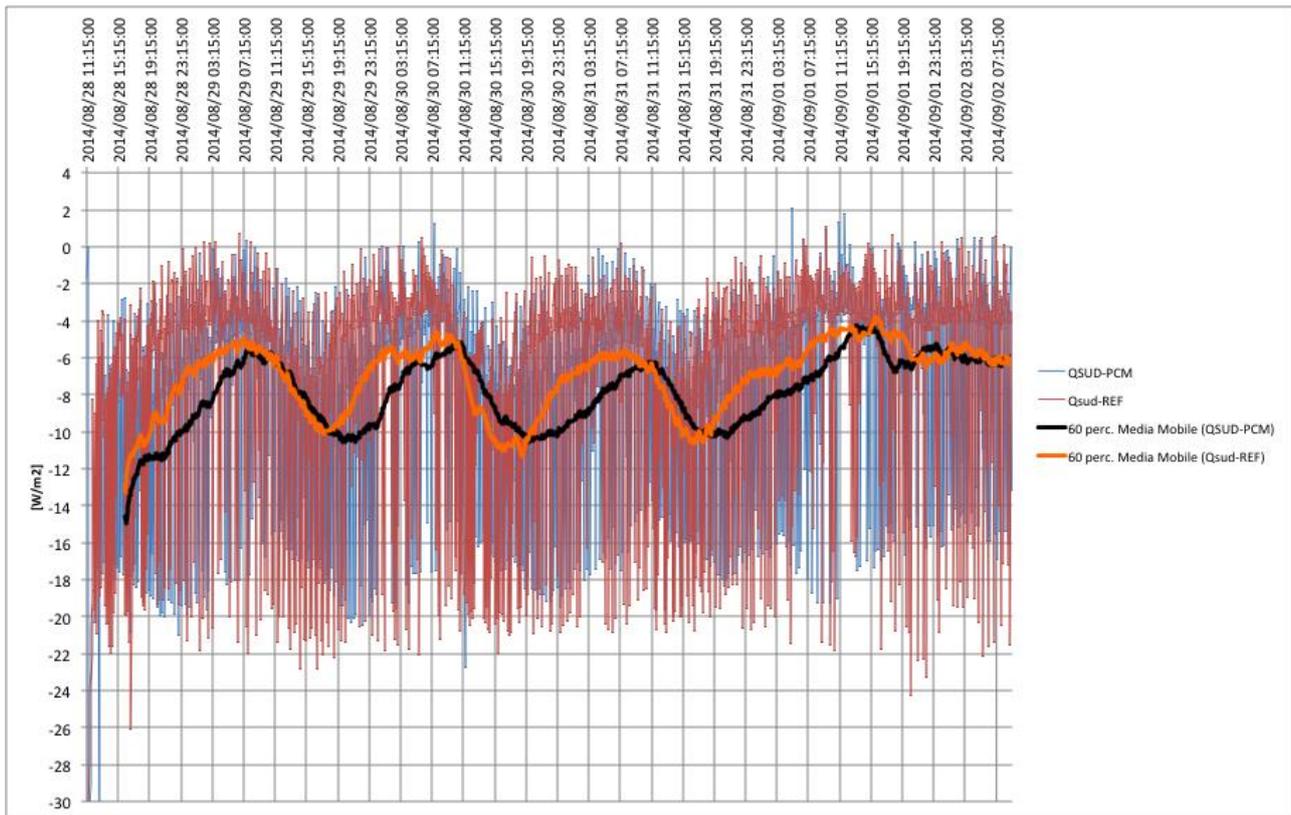


Figura 77. Flussi termici sul lato sud.

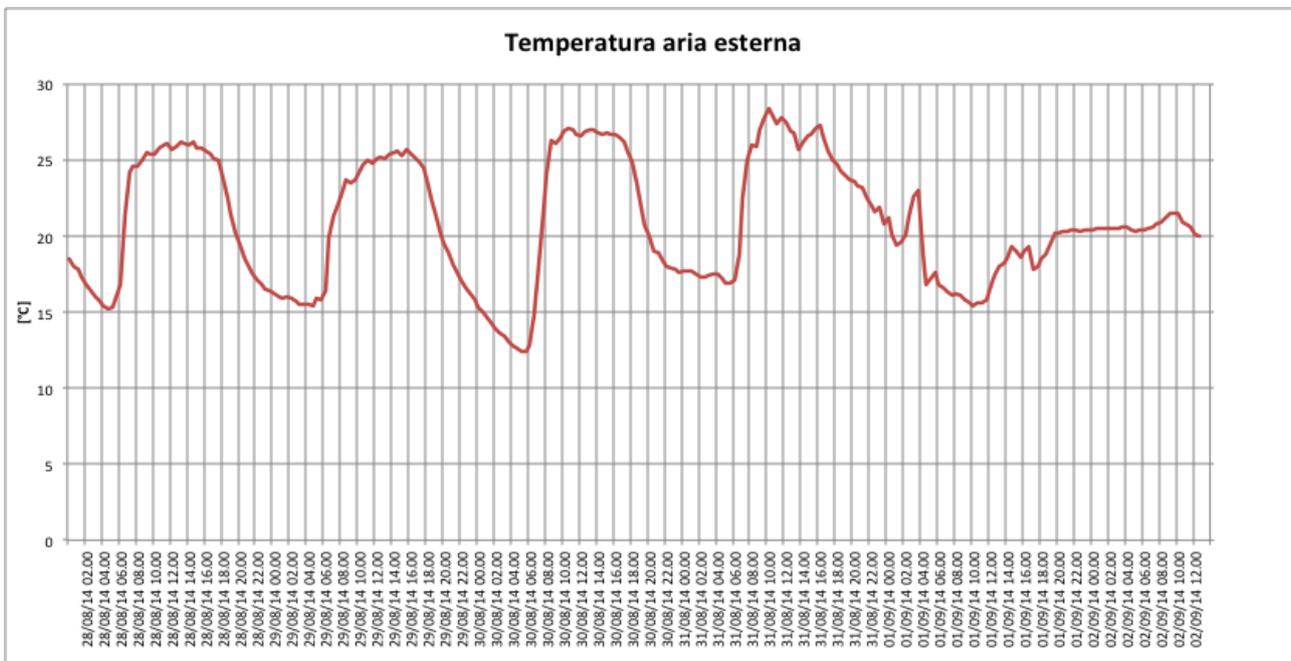


Figura 78. Andamento delle temperature dell'aria esterna

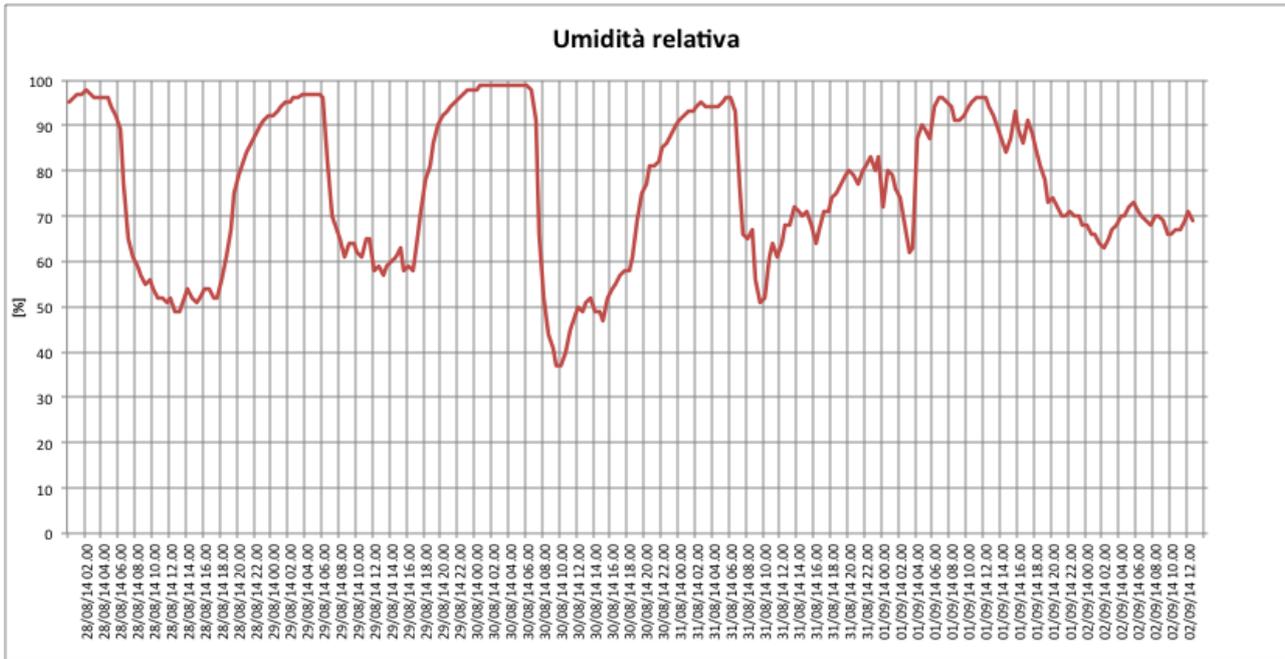


Figura 79. Andamento dell'umidità relativa

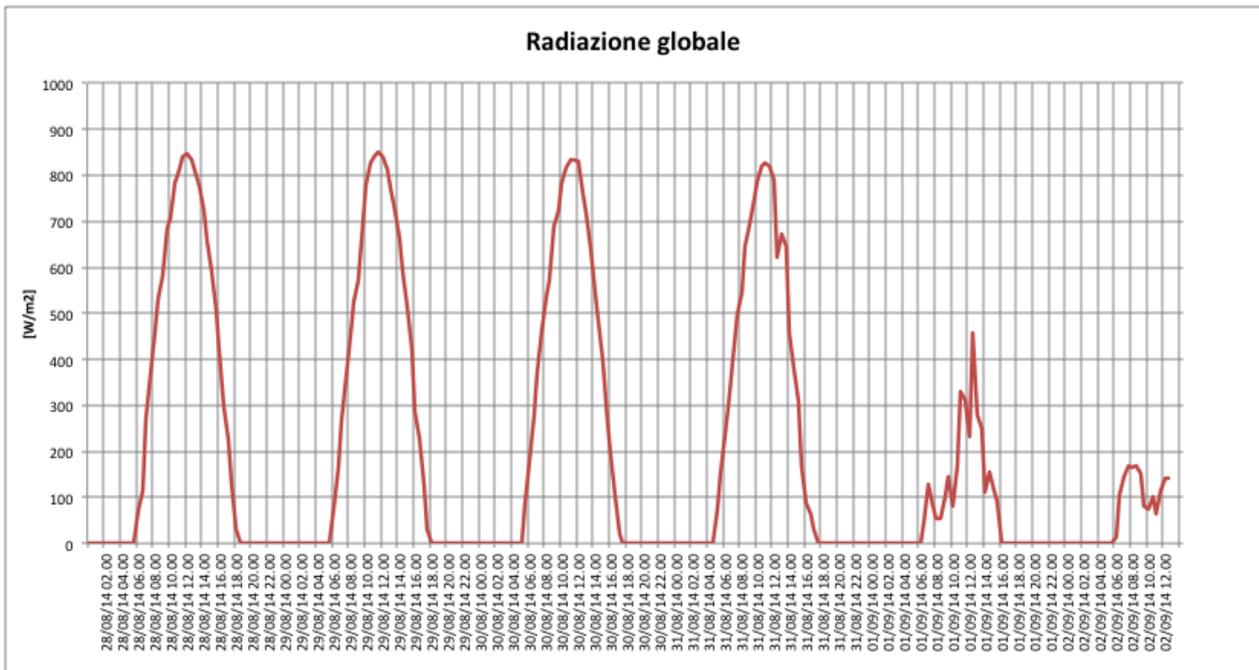


Figura 80. Andamento della radiazione solare

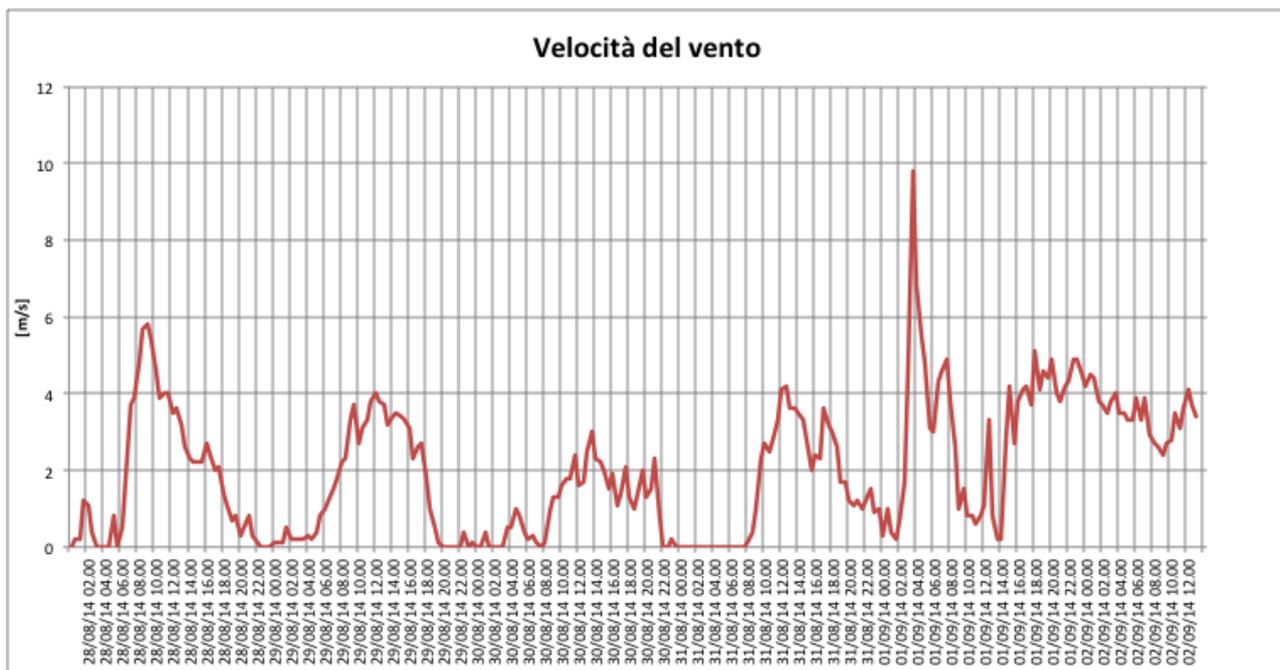


Figura 81. Velocità del vento

Per la sola superficie orizzontale di copertura dotata di PCM della cella e per quella base di riferimento, sono state effettuate elaborazioni numeriche che hanno utilizzato esperienze e dati climatici risultanti dalle misure risultanti dalle prove sperimentali. Infatti utilizzando il software ComSol, partendo dai modelli funzionali senza intercapedine, ma modificando la stratificazione tra lamierino esterno e PCM, si è voluto applicare al modello teorico le condizioni reali nelle quali si è effettuata la sperimentazione. Poiché si riscontrava dal confronto tra i risultati teorici e quelli sperimentali sulla cella frigorifera dotata di PCM, si è notato come la differenza tra le temperature superficiali del lamierino esterno emerse dalle elaborazioni e quelle misurate dalla sonda di temperatura fossero differenti in maniera rilevante per la presenza nella stratificazione della cella di un sottile intercapedine d'aria tra lamierino e strato di PCM per la tipologia di installazione degli stessi che non ha permesso la perfetta aderenza all'interfaccia dei due strati. Pertanto anche al modello funzionale teorico è stata applicata tale intercapedine per un valore medio dello spessore di 4mm. Per realizzare una elaborazione la più vicina alle effettive situazioni ambientali nelle quali è stata effettuata la sperimentazione, le condizioni al contorno dell'analisi teorica sono state inserite acquisendo i dati di temperatura dell'aria esterna, dell'irraggiamento solare globale e la velocità del vento registrati dalla centralina climatica durante lo stesso periodo della prova sperimentale, selezionando dei 5 giorni di sperimentazione solo i tre centrali in quanto il primo è stato eliminato perché parziale, mentre il 5° giorno non è stato trattato perché le condizioni ambientali non sono state idonee al confronto. Sono stati altresì modificati i valori teorici, precedentemente utilizzati nelle elaborazioni, del coefficiente di assorbimento ( $\alpha$ ) della superficie esterna del lamierino esterno sia della cella di riferimento che di quella implementata con PCM. Nelle elaborazioni teoriche infatti i valori di  $\alpha$  erano stati fissati pari a 0.9, identici per le due celle. Considerando diverse le colorazioni e la rugosità di finitura dei lamierini della cella di riferimento e di quello applicato alla cella innovativa, si è voluto diversificare i valori con  $\alpha=0.3$  per il lamierino approntato alla cella implementata con PCM e  $\alpha=0.2$  per la cella di riferimento. Di seguito si riporta il grafico

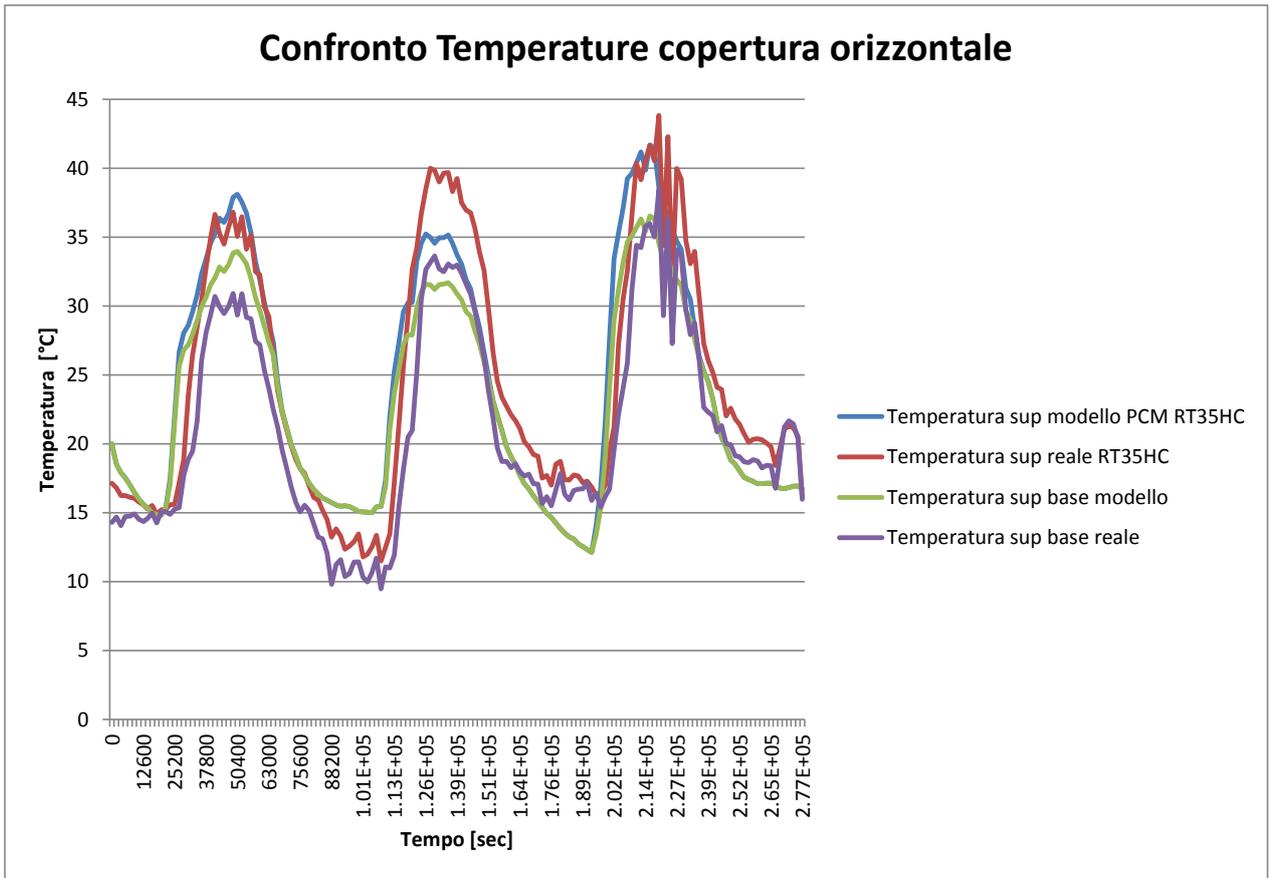


Figura 82. Risultati della simulazione numerica effettuata con condizioni al contorno reali

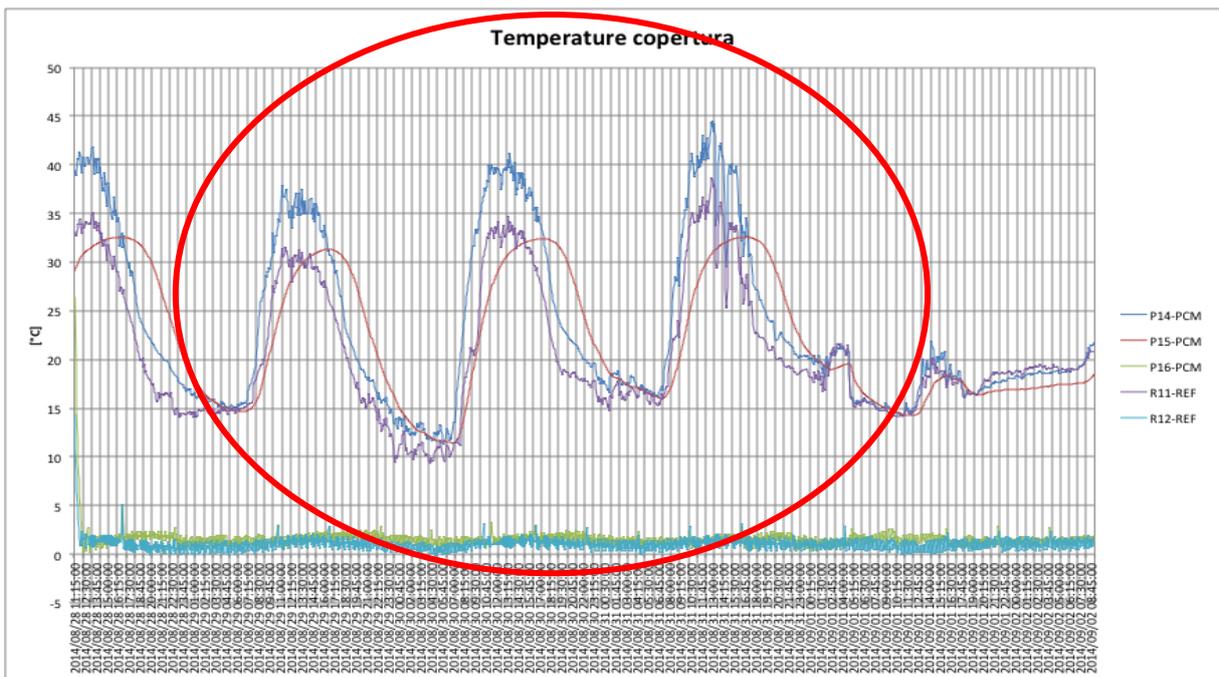


Figura 83. Risultati della sperimentazione

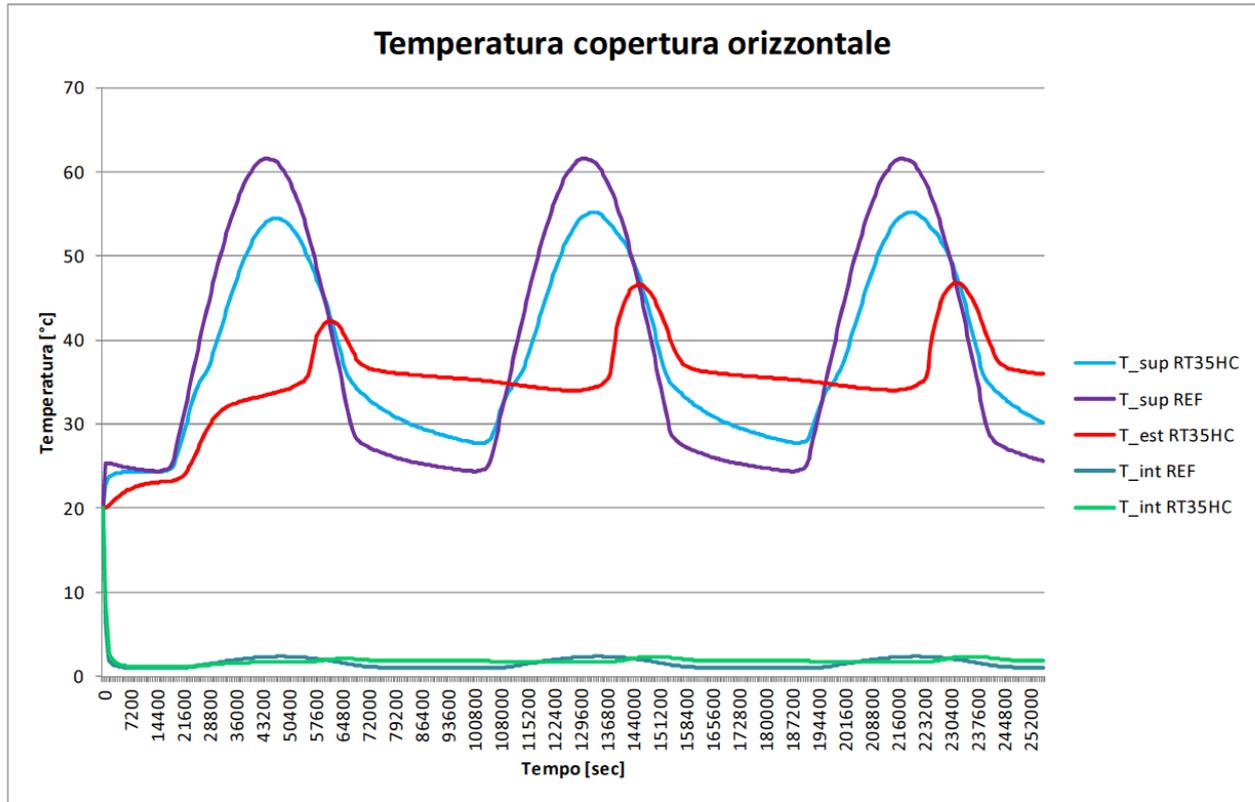


Figura 84. Risultati della prima simulazione numerica

## 5 Conclusioni

Quanto riportato ai punti A, B, C e D è un estratto dall'Allegato Tecnico all'Accordo di Collaborazione tra ENEA e Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria industriale e Scienze Matematiche. In essi vengono descritte le fasi nelle quali veniva proposta l'articolazione dei lavori per lo sviluppo della ricerca del secondo anno di attività.

Nel documento programmatico si può quindi leggere:

- A. individuazione delle tecniche costruttive, di packaging e di implementazione dei PCM con gli strati isolanti dei pannelli. Particolare attenzione verrà posta nella compatibilità tra isolante termico e PCM. Successivamente si devono realizzare dei modelli funzionali e attuare simulazioni numeriche per la valutazione a livello teorico del comportamento energetico sotto condizioni ambientali esterne caratterizzanti diverse zone climatiche, in funzione delle diverse condizioni termiche interne alla cella per il mantenimento di materiali deperibili.
- B. Studio tecnologico, progettazione e costruzione, in collaborazione con aziende specializzate nel settore dei pannelli isolanti prefabbricati, di prototipi di pannelli a diversa configurazione basati sui modelli risultati delle elaborazioni numeriche.
- C. Realizzazione di processi di analisi sperimentale singolarmente sui pannelli realizzati in fabbrica e successiva analisi su cella modificata con l'inserimento dei pannelli prototipo con pratiche di laboratorio sia in ambiente indoor che in quello outdoor, previa realizzazione di sistemi di monitoraggio.
- D. Disseminazione dei risultati raggiunti attraverso comunicazioni a seminari, convegni, congressi e pubblicazione articolo/i scientifico/i.

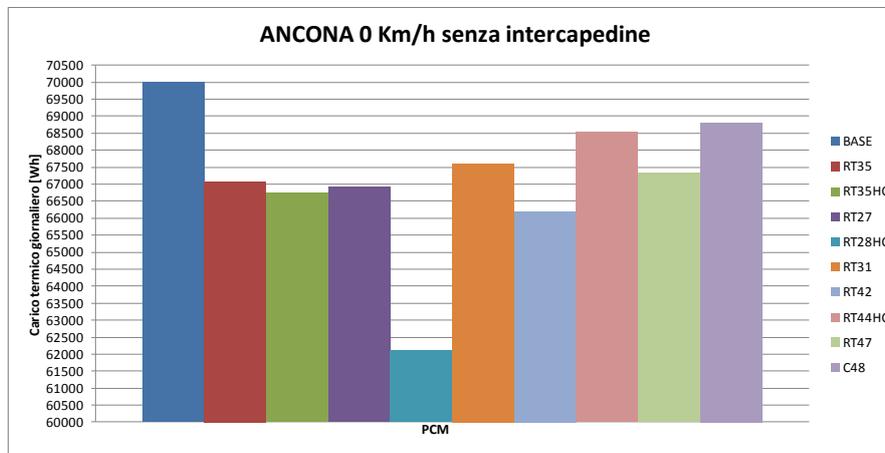
A conclusione dei lavori di ricerca è possibile affermare che gli argomenti previsti sono tutti stati affrontati e completati ad eccezione della disseminazione per la quale viene di seguito descritto un programma che sarà esaurito nei tempi previsti dalla regolamentazione.

I risultati dello studio tecnologico hanno mostrato come il pannello innovativo implementato con il PCM è risultato idoneo ad essere applicato all'involucro delle celle frigorifere determinando un miglioramento delle prestazioni energetiche. A conferma della bontà del progetto è necessario evidenziare che le prove sperimentali alle quali sono stati sottoposti i prototipi hanno mostrato una buona resistenza del pannello alle sollecitazioni termiche e meccaniche assicurandone la compatibilità con la movimentazione sulla rete ferroviaria, considerando le azioni contemporanee di vibrazione e sollecitazione termica sotto le azioni più drastiche dal punto di vista climatico (leggi temperatura dell'aria e radiazione solare). Ovviamente la produzione industriale, con l'uso delle tecnologie costruttive più accurate, ridurrà le imprecisioni dovute ad una costruzione artigianale, aumentando ulteriormente le caratteristiche prestazionali. Infatti, come è stato evidenziato in uno specifico paragrafo, le imperfezioni costruttive quali ad esempio la non completa e uniforme aderenza del pannello esterno di finitura con la superficie esterna del sistema di impacchettamento dello strato di PCM ha introdotto all'interfaccia una sottile intercapedine d'aria che a livello sperimentale non ha fatto raggiungere al pannello i livelli di efficienza attesi dai risultati delle elaborazioni numeriche. La resistenza termica conduttiva introdotta dal sottile strato di aria riduce fortemente la capacità di trasmettere il calore verso lo strato di accumulo termico.

Comunque i risultati dell'indagine teorica hanno mostrato come l'azione del materiale in passaggio di fase riesca a sfalsare temporalmente l'ingresso del calore nella cella frigorifera anche di un periodo di otto ore e ridurre il picco di carico termico delle ore diurne derivante dal contemporaneo contributo dell'azione del flusso solare e della differenza tra la temperatura dell'aria interna e quella esterna.

Dall'istogramma di figura 85 si può evincere come il calore totale entrante nella cella si possa ridurre rispetto all'uso del pannello base applicando i PCM in un intervallo che va dal 4% al 12% circa.

Lo sfasamento dell'ingresso del calore dalle ore diurne a quelle notturne permette alla macchina frigorifera di lavorare a temperature esterne inferiori, migliorando l'efficienza energetica, avvicinando le temperature di condensazione ed liquefazione e quindi abbassando il lavoro di compressione come rilevabile dal ciclo di Carnot inverso.



**Figura 85. Confronto di comportamento energetico tra il container con pannello base e quelli con i PCM**

Ipotizzando una possibile evoluzione della ricerca con proiezione verso sviluppi future, è possibile affermare come, dopo gli studi sugli elementi base, sia necessario realizzare un container implementato con le tecnologie analizzate fino a questo momento della ricerca e montarlo su un carro ferroviario per analizzarne i comportamenti energetici in situazione reale. Più precisamente il container frigorifero dovrà essere completamente monitorato, congiuntamente ad un analogo container di tipo tradizionale, utilizzandoli entrambi nella composizione di un convoglio ferroviario per il trasporto di materiali deperibili. In questo modo potranno essere misurati i consumi elettrici che potranno confermare o meno le previsioni di miglioramento scaturiti dalle ricerche precedenti.

Si potranno anche effettuare studi di integrazione della tecnologia del pannello innovativo con altre soluzioni tecnologiche che prevedono sempre l'utilizzo del PCM ma all'interno del vano refrigerato con lo scopo plurimo di assorbire eventuali carichi termici emessi da sostanze organiche contenute nella cella e stabilizzare le temperature interne, migliorando anche l'efficienza della macchina frigorifera. La soluzione risulta idonea anche a contrastare il rapido riscaldamento della cella frigorifera in condizioni estive, in caso di blackout elettrico, fungendo da accumulo freddo che, senza di apporto della macchina frigorifera, contribuisca a mantenere le temperature dell'aria refrigerata a livelli bassi per un periodo di tempo necessario ad intervenire sul gusto, pur mantenendo inalterate le caratteristiche organolettiche delle sostanze conservate.

Per quanto riguarda la fase di disseminazione dei risultati raggiunti, si intende articolare gli interventi in un seminario da attuare presso la sede ENEA o all'interno dell'Università e partecipare ad un congresso specifico dell'innovazione sui materiali e la refrigerazione, con l'invio di una articolo scientifico.

## 6 Riferimenti bibliografici

1. Principi, P.; Di Perna C.; Carbonari, A.; Ferrini, M., (2004), – Validation of Numeric finite Element Calculation Model Through the Laboratory experimentation of Artificial Programmable Inertia Walls, Proceedings of XXXII IAHS World Congress on Housing, Trento, Italy, 2004.
2. P. Principi and R. Fioretti, Thermal analysis of the application of pcm and low emissivity coating in hollow bricks, *Energy and Buildings* 51 (2012) 131-142.
3. R. Fioretti and P. Principi, Blocchi termici in laterizio: analisi teorico sperimentale.
4. P. Principi and R. Fioretti, Passive solar wall integrated with a latente storage layer, International Conference Sustainable Building South Europe, Torino 2007.
5. M. De Grassi, A. Carbonari, G. Palomba, A statistical approach for the evaluation of the thermal behavior of dry assembled PCM containing walls, *Building and Environment* 41 (2006) 448–485.
6. M. Lemma, R. Fioretti, M. Imperadori, Development of a technology for inserting a PCM layer in building envelopes, Atti del XXXIII IAHS World Congress “Housing, Process & Product”, Pretoria 2005.
7. 5<sup>th</sup> Framework Programme of the European Community for Research Technological Development and Demonstration Activities. Changeable Thermal Inertia Dry Enclosures.
8. Mario A. Medina, Jennifer B. Kingb, Meng Zhangc, On the heat transfer rate reduction of structural insulated panels (SIPs) outfitted with phase change materials (PCMs). *Energy* 33 (2008) 667–678.
9. Francesco Fiorito, Trombe walls for lightweight buildings in temperate and hot climates. Exploring the use of phase-change materials for performances improvement. *Energy Procedia* 30 (2012) 1110-1119.
10. M. Pomianowskia, P. Heiselberga, Y. Zhangb, Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings, *Energy and Buildings* 67 (2013) 56–69.
11. B.L. Gowreesunkera, S.B. Stankovicb, S.A. Tassoua, P.A. Kyriacoub, Experimental and numerical investigations of the optical and thermal aspects of a PCM-glazed unit, *Energy and Buildings* 61 (2013) 239–249.
12. F. Goia, M. Perino, V. Serra, Improving thermal comfort conditions by means of PCM glazing systems, *Energy and Buildings* 60 (2013) 442–452.
13. P. Schossig, H.M. Henning, S. Gschwander, T. Haussmann, Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 89 (2005) 297–306.
14. T. Kousksoua, A. Arida, A. Jamilb, Y. Zeraoulia, Thermal behavior of building material containing microencapsulated PCM, *Thermochimica Acta* 550 (2012) 42– 47.

15. R. Ansuini, R. Larghetti, A. Giretti, M. Lemma, Radiant floors with PCM for indoor temperature control, *Energy and Buildings* 43 (2011) 3019–3026.
16. E. Oró, A. de Gracia, A. Castell, M.M. Farid, L.F. Cabeza, Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications, *Applied Energy* 99 (2012) 513–533.
17. E. Oró, C. Barreneche, M.M. Farid, Luisa F. Cabeza, Experimental study on the selection of phase change materials for low temperature applications. *Renewable Energy* 57 (2013) 130-136.
18. 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.
19. 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.
20. W. Lu, S.A. Tassou, Characterization and experimental investigation of phase change materials for chilled food refrigerated cabinet applications, *Applied Energy* 112 (2013) 1376–1382.
21. 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.
22. 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.
23. Gin, M. M. Farid, The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food, *Journal of Food Engineering* 100 (2010) 372–376.
24. K. 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.
25. K. Azzouz, D. Leducq, D. Gobinb, Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage, *international journal of refrigeration* 31 (2008) 892-901.
26. Azzouz, K., Leducq, D., Guilpart, J., Gobin, D., Improving the energy efficiency of a vapor compression system using a phase change material. In: *Proceedings 2nd Conference on Phase Change Material & Slurry*, Yverdon les Bains, Switzerland. (2005).
27. 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.
28. 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.
29. S.A. Tassou, G. De-Lille, Y.T. Ge, Food transport refrigeration – Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport,
30. *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 1467–1477.

31. 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.
32. 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) 5797e5804.
33. Carbonari, M. De Grassi, C. di Perna, P. Principi, Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls, *Energy and Buildings* 38 (2006) 472-483.

## 7 Abbreviazioni ed acronimi

PCM Phase Change Material

DIISM Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

UNIVPM Università Politecnica delle Marche

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

### 8.1 CV - Paolo Principi

Paolo Principi è Professore Ordinario di Fisica Tecnica Ambientale presso l'Università Politecnica delle Marche, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche. Attualmente è titolare dei corsi di Progettazione di impianti di climatizzazione, Fisica tecnica ambientale e Risorse energetiche ed energie alternative.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

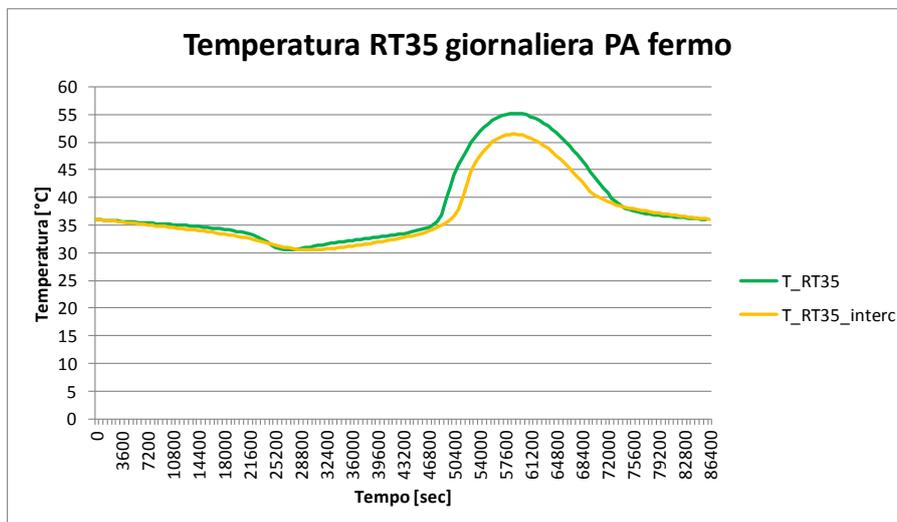
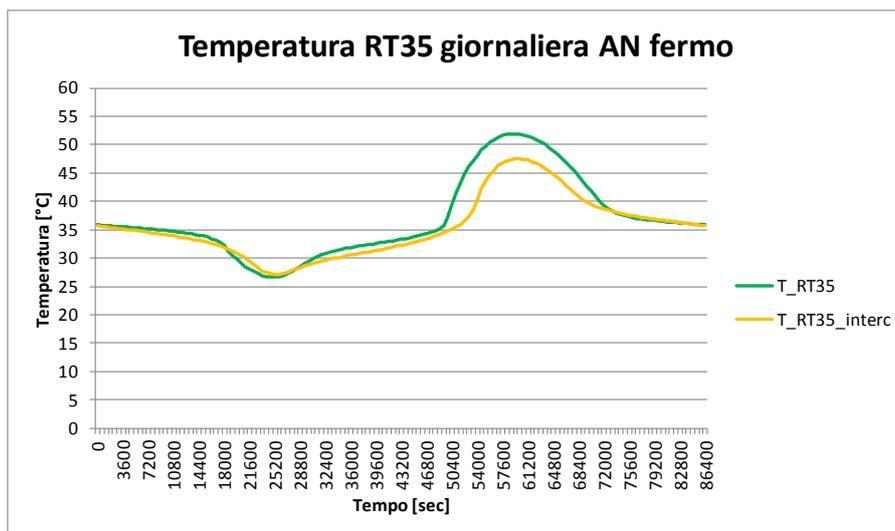
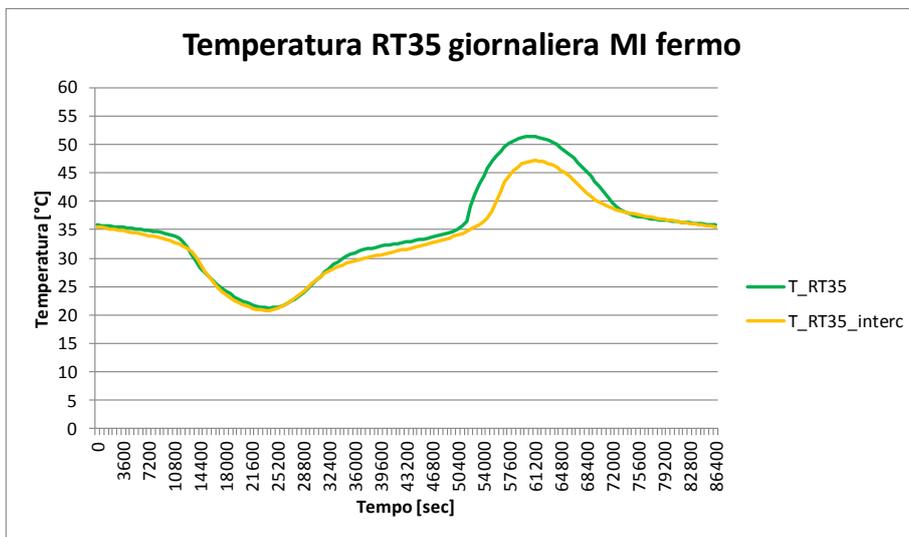
## 8.2 CV- Roberto Fioretti

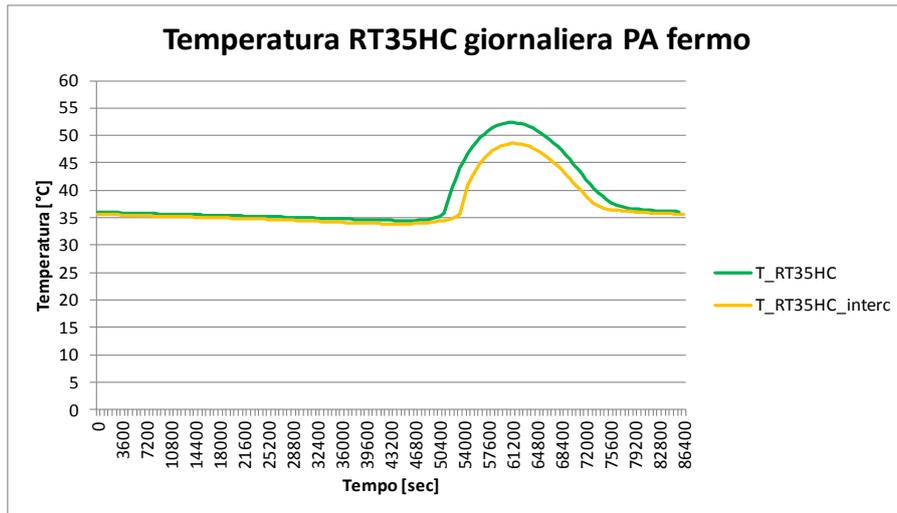
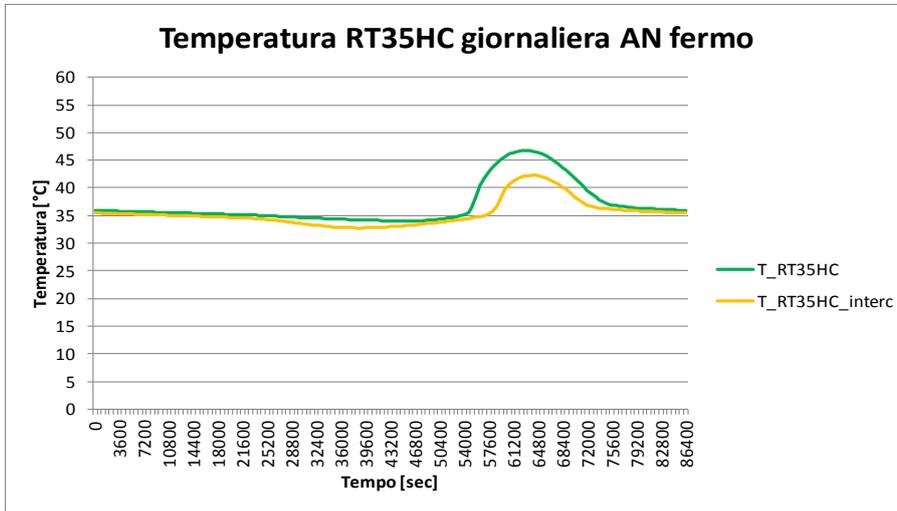
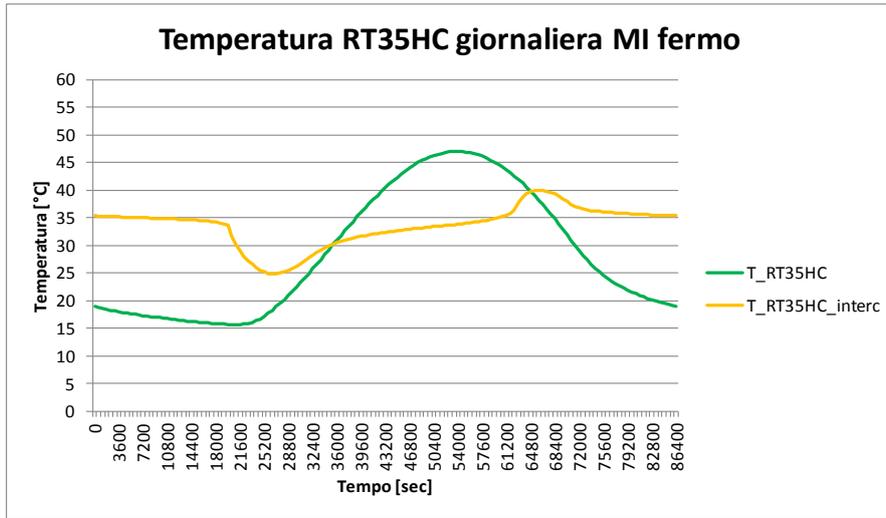
Roberto Fioretti, ingegnere edile architetto con laurea conseguita presso L'Università Politecnica delle Marche con una tesi sull'applicazione dei materiali a passaggio di fase (PCM) negli involucri edilizi. Consegue il dottorato di ricerca in energetica proseguendo il lavoro sui PCM. Collabora dal 2005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

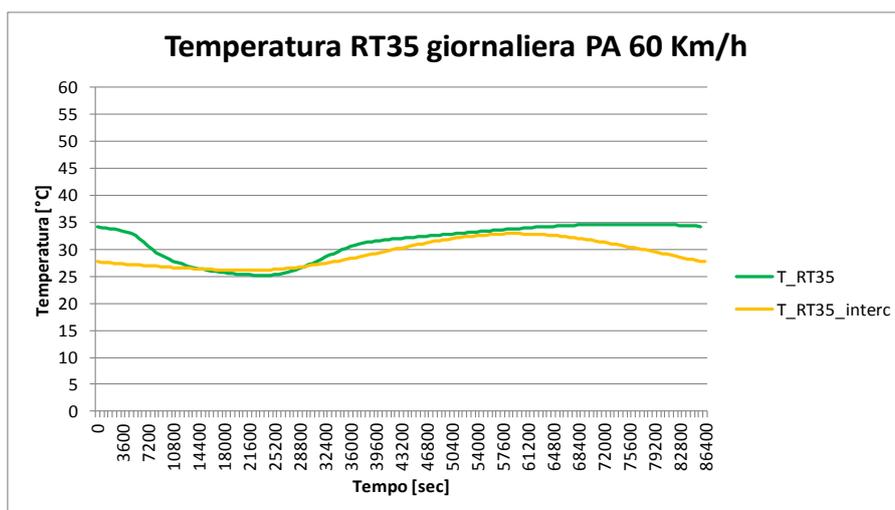
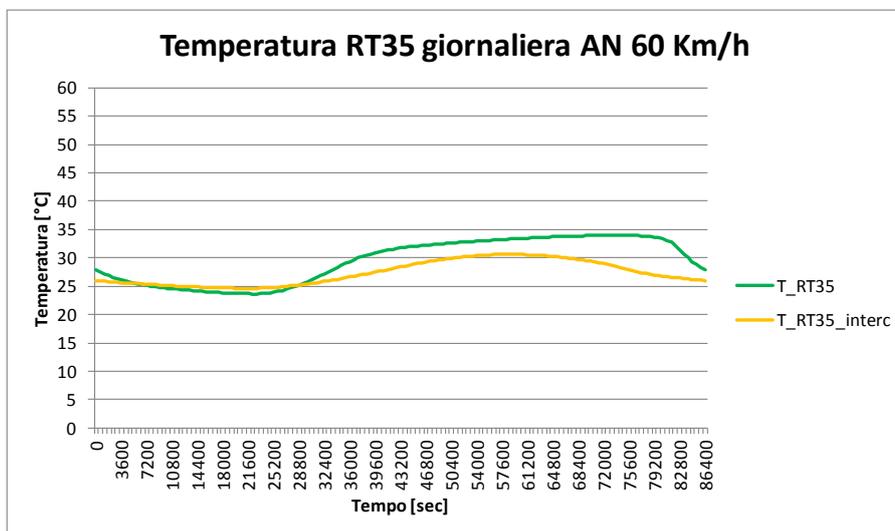
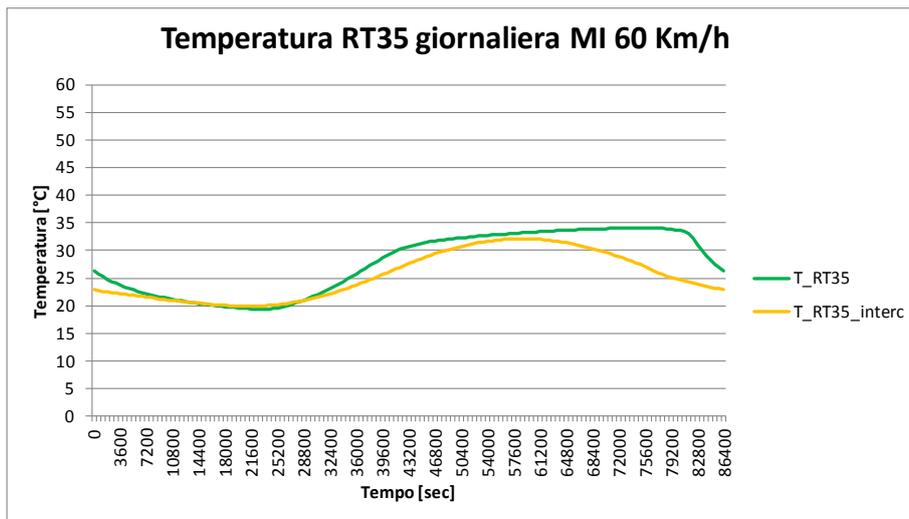
## 8.3 CV- Benedetta Copertaro

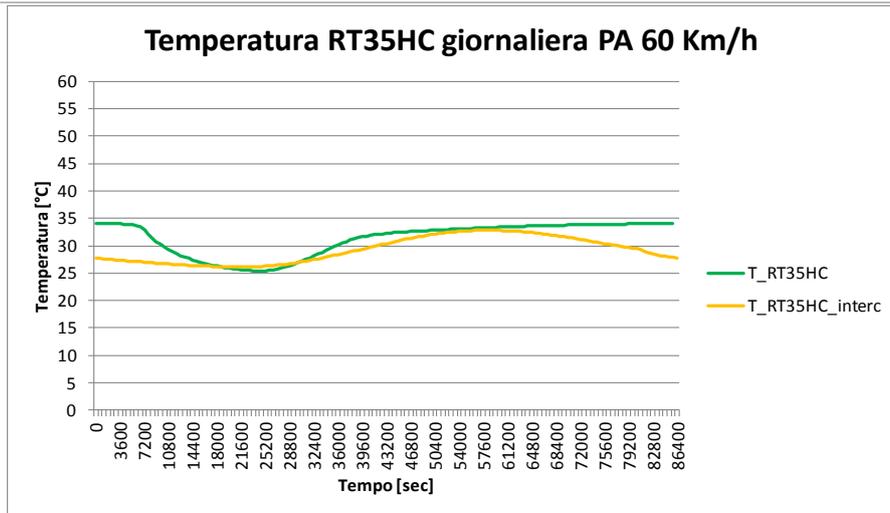
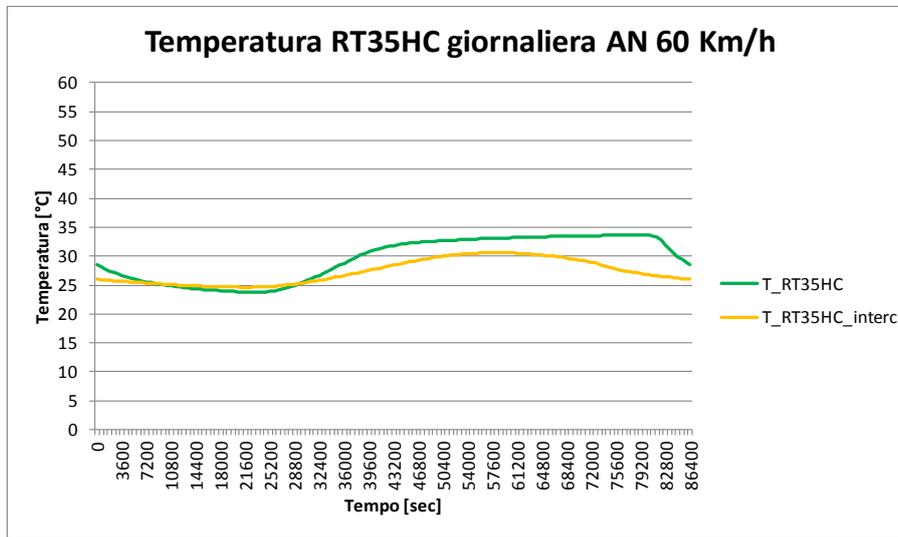
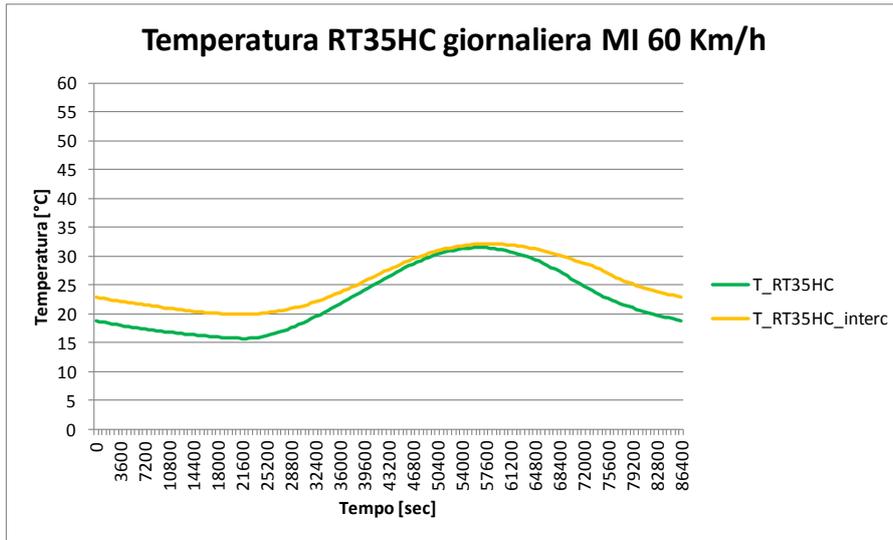
Benedetta Copertaro, ha conseguito la laurea triennale in Biologia applicata all'ambiente presso l'Università degli Studi di Camerino e la laurea magistrale in Sostenibilità Ambientale e Protezione Civile presso l'Università Politecnica delle Marche, con una tesi relativa all'analisi di Rischio Ecologico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

## ALLEGATO 1

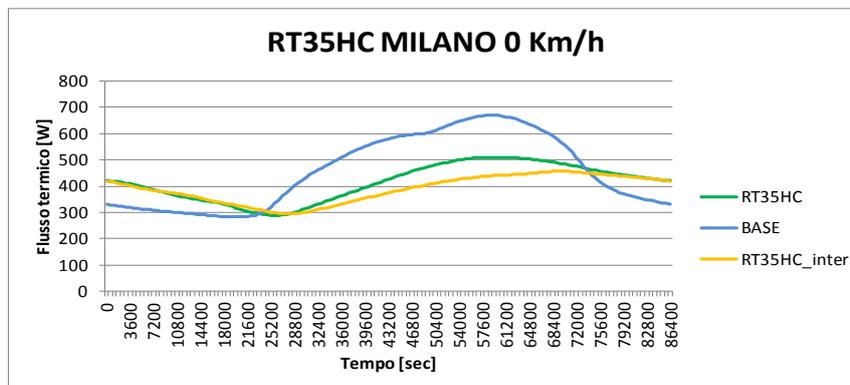
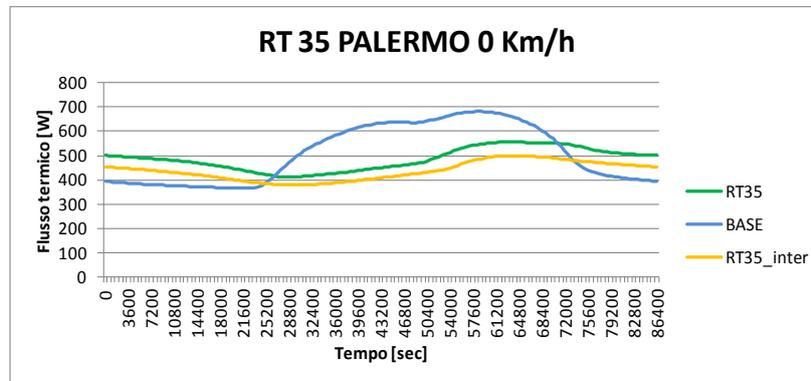
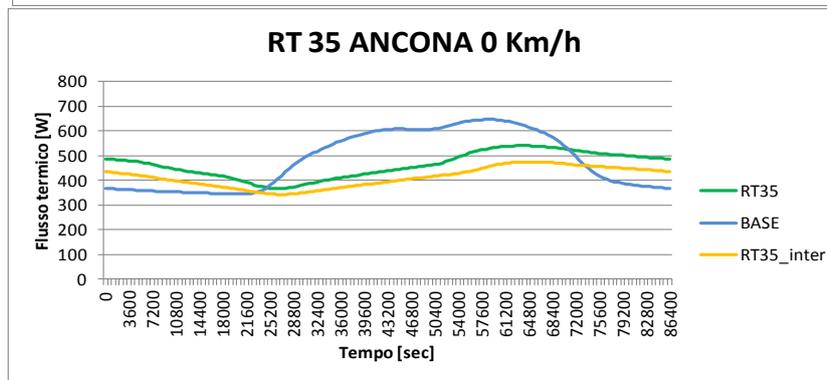
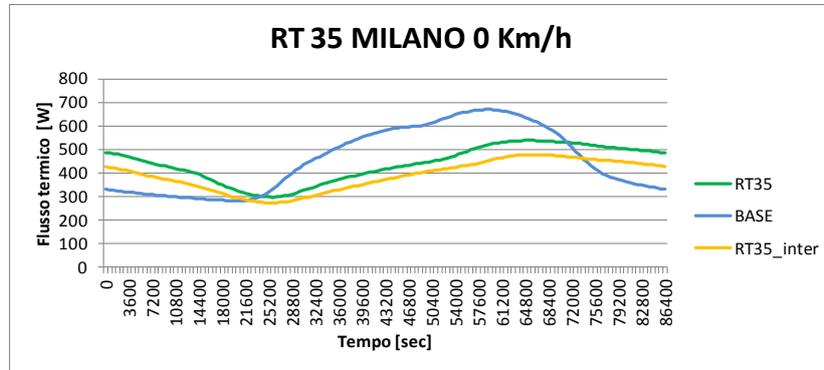


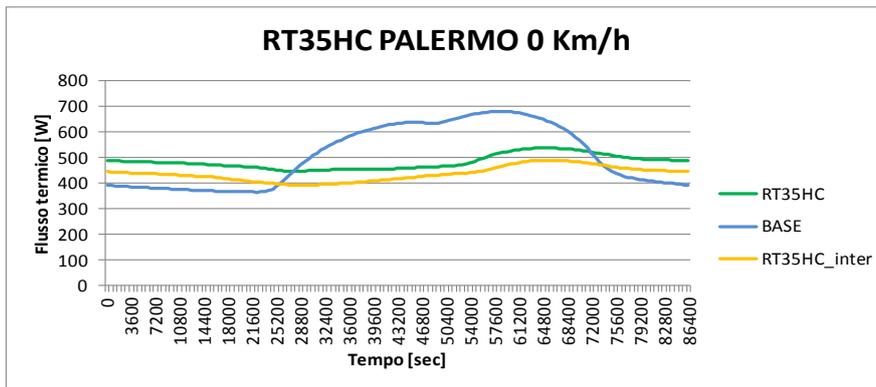
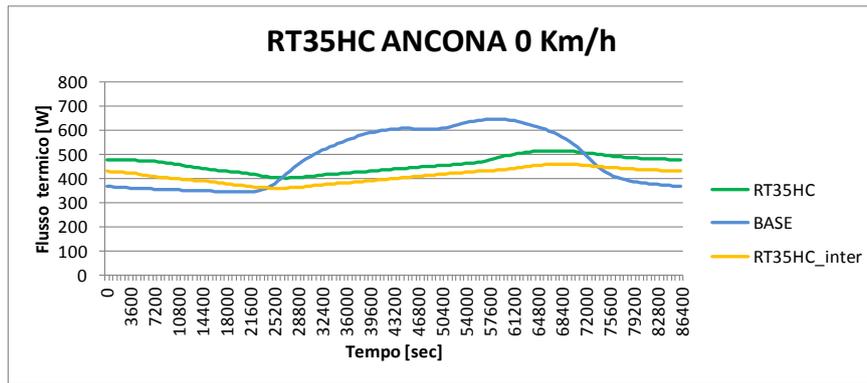


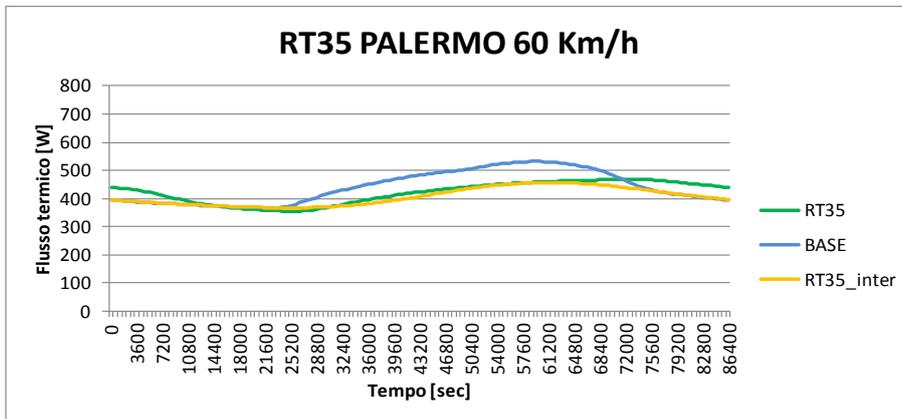
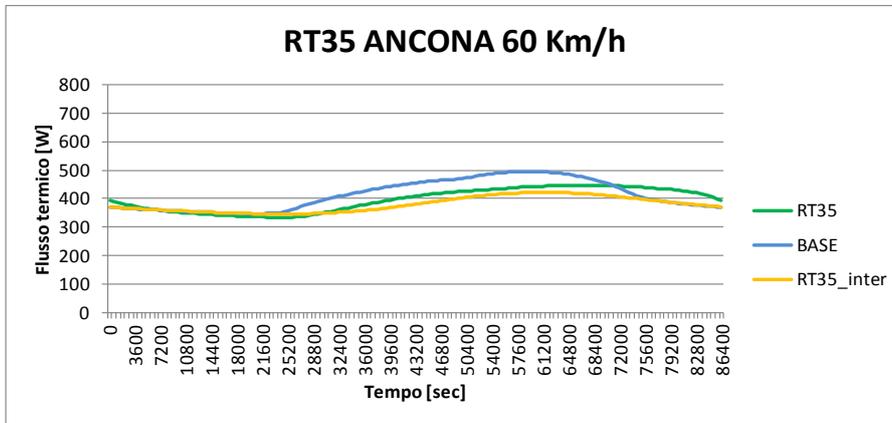
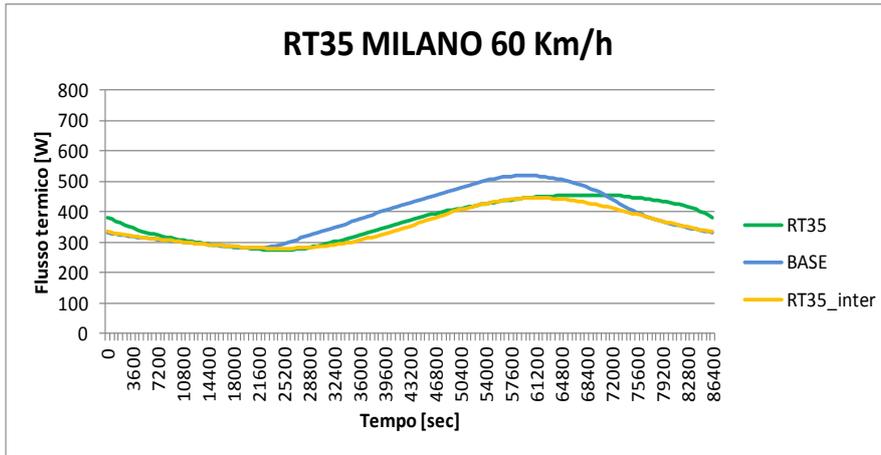


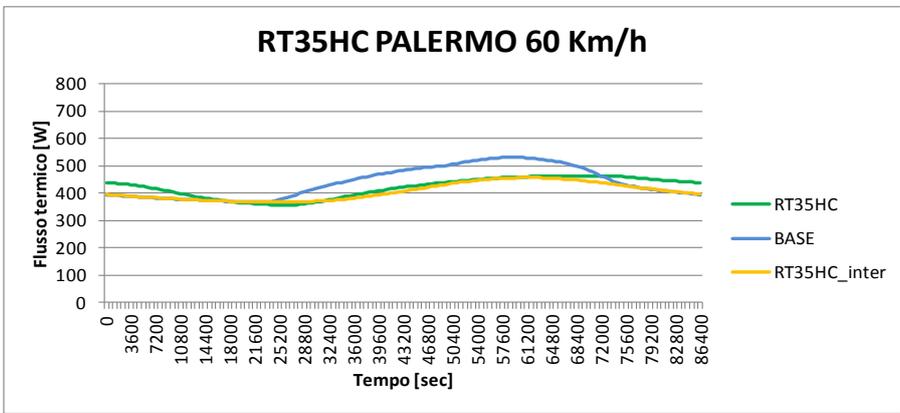
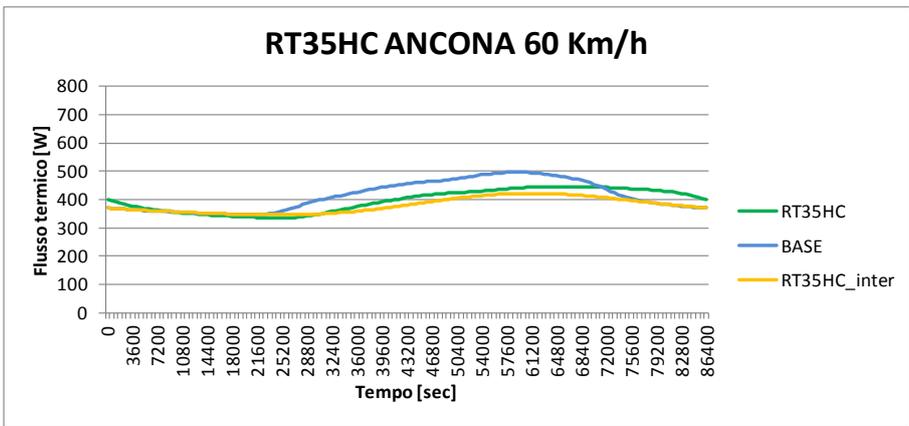
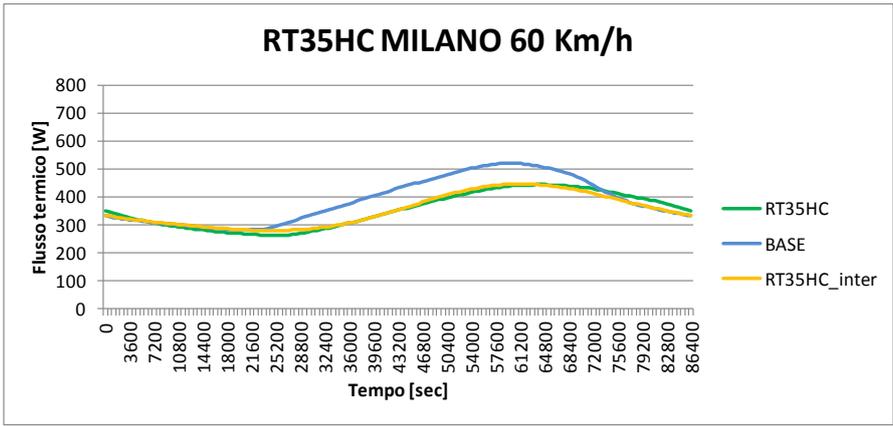


## ALLEGATO 2



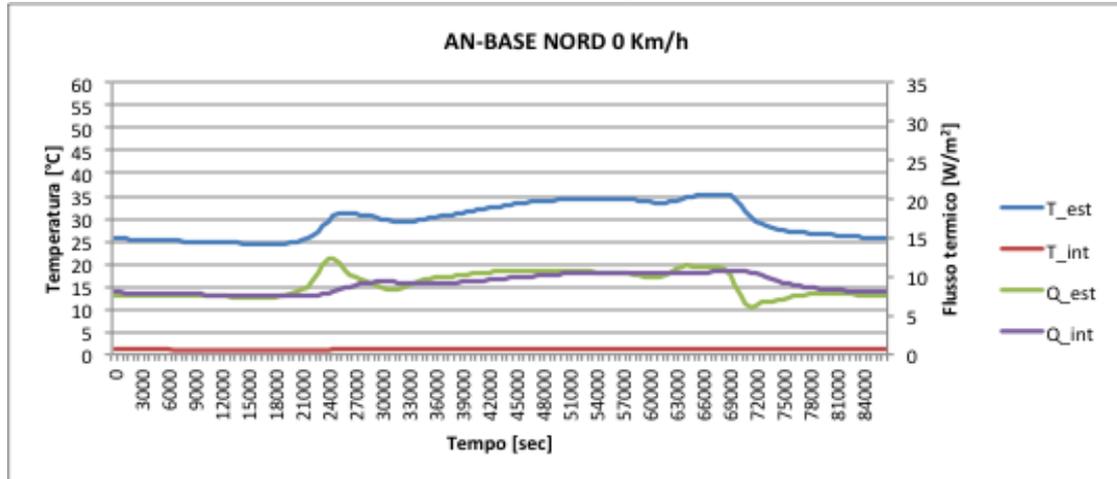




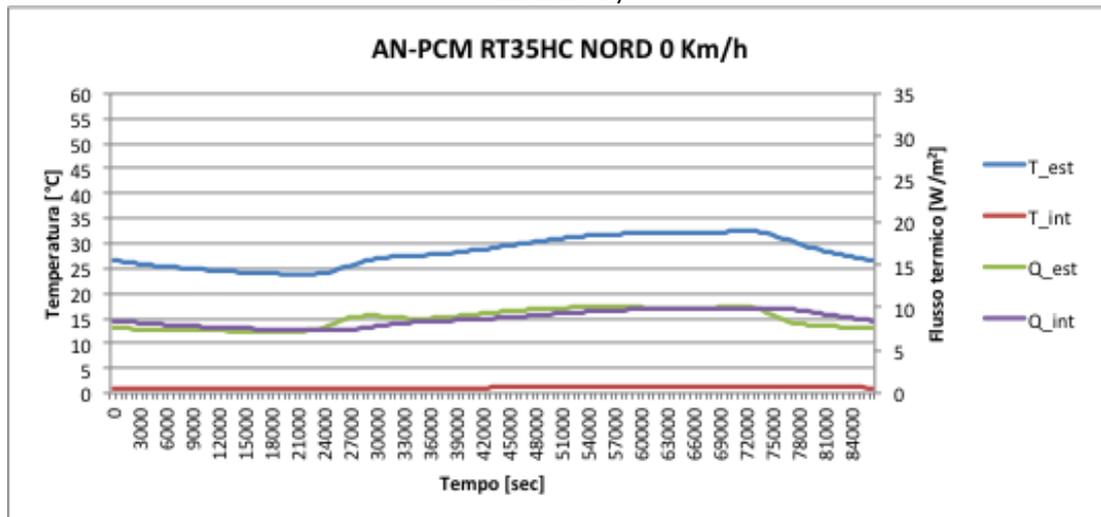


## ALLEGATO 3

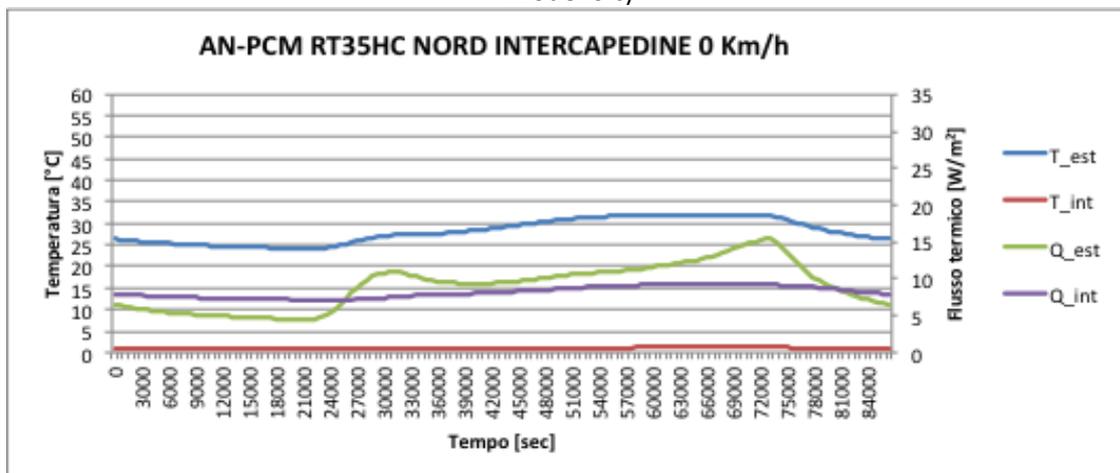
SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, ANCONA, NORD  
Modello a)



Modello b)

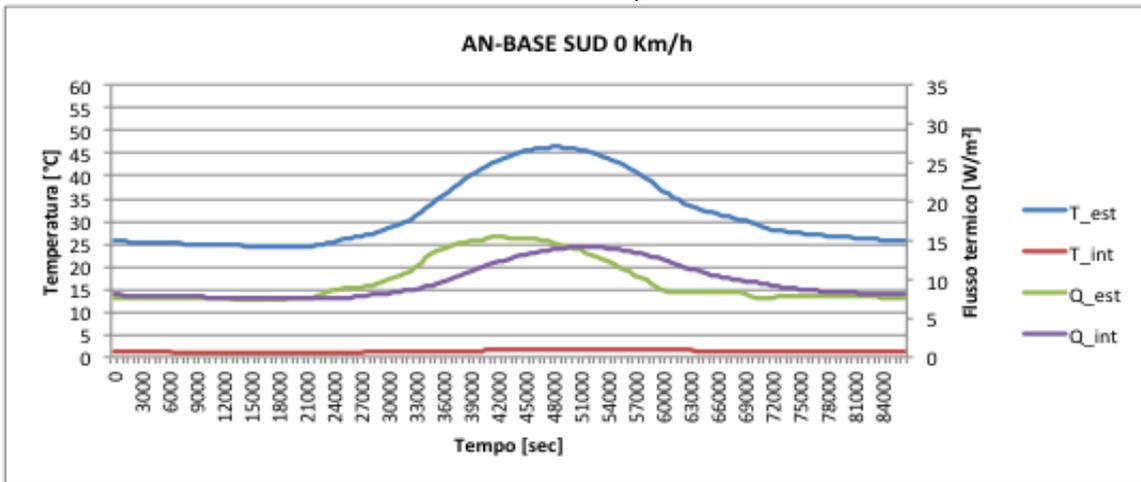


Modello c)

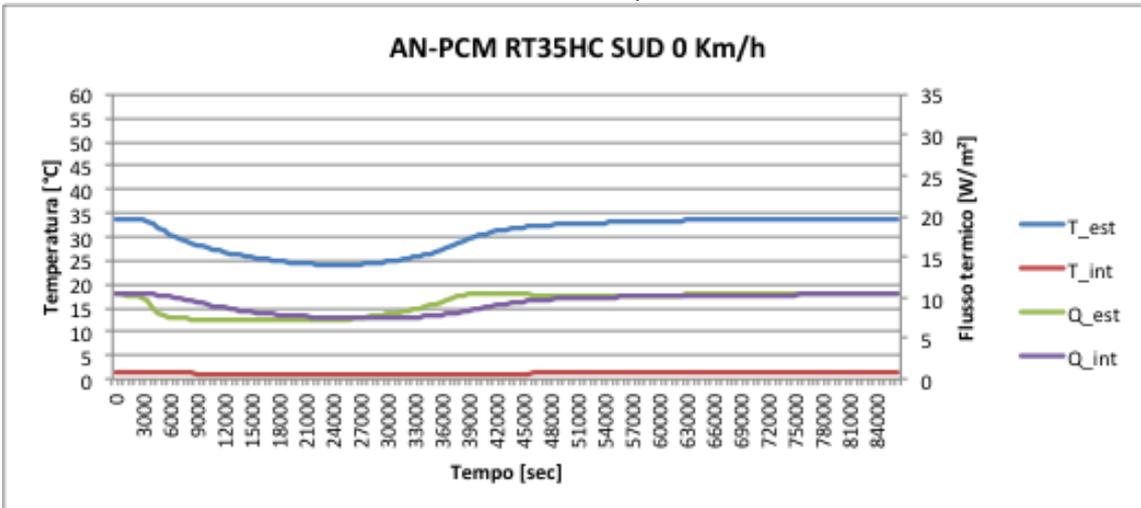


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, ANCONA, SUD

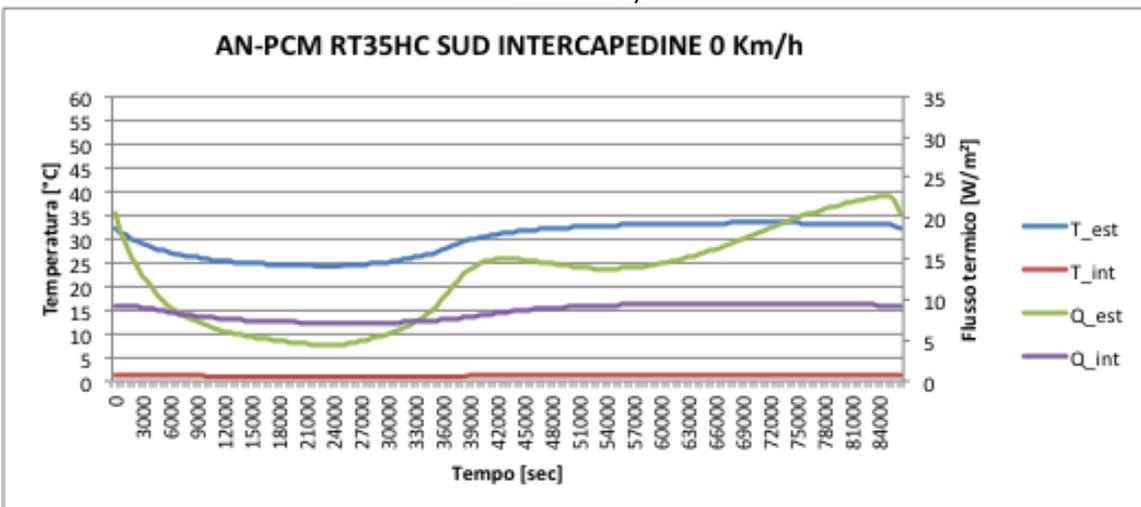
Modello a)



Modello b)

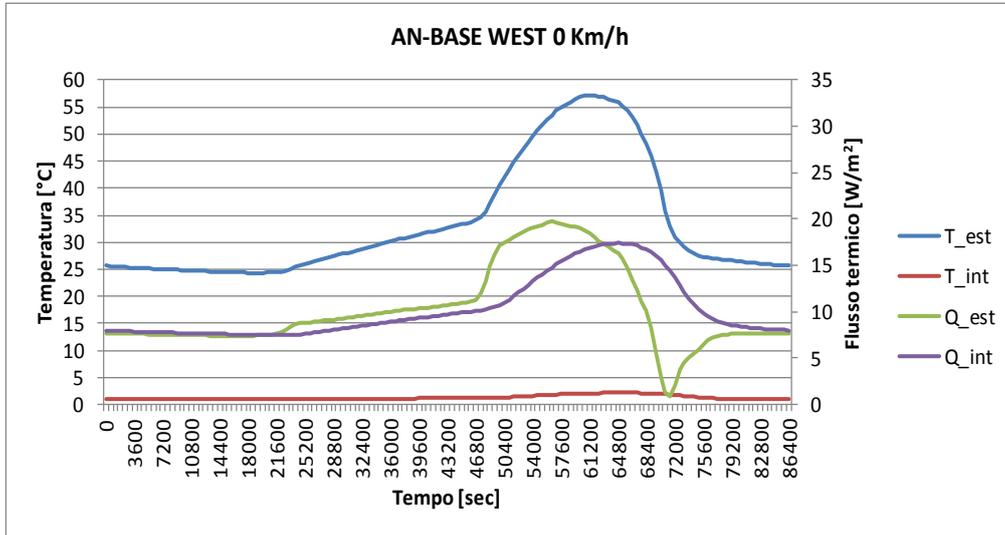


Modello c)

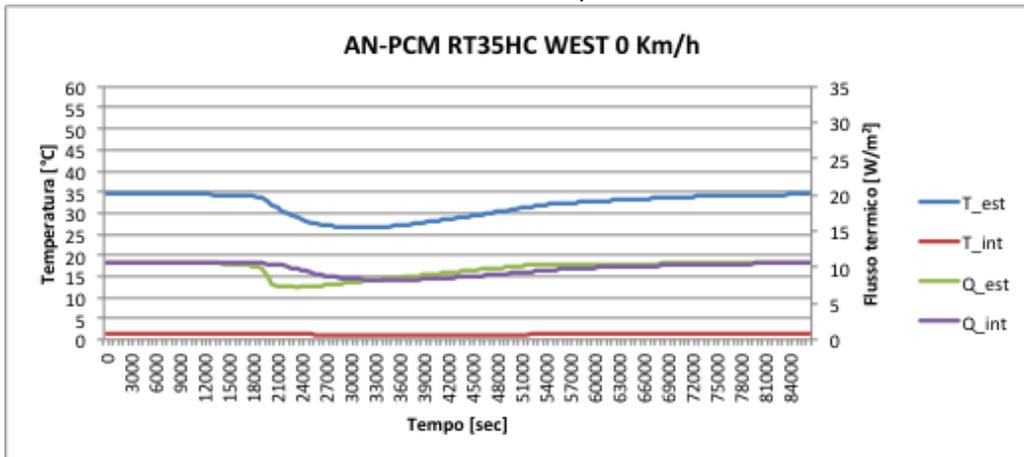


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, ANCONA, OVEST

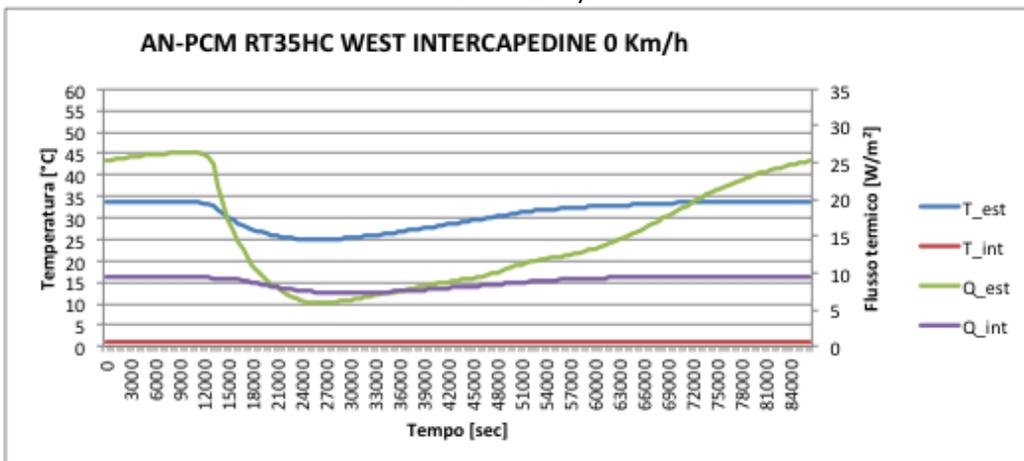
Modello a)



Modello b)

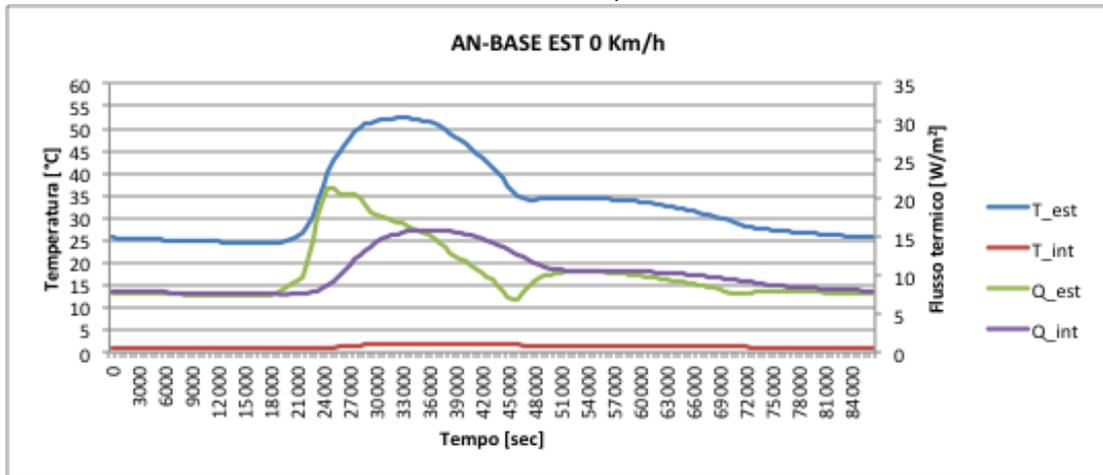


Modello c)

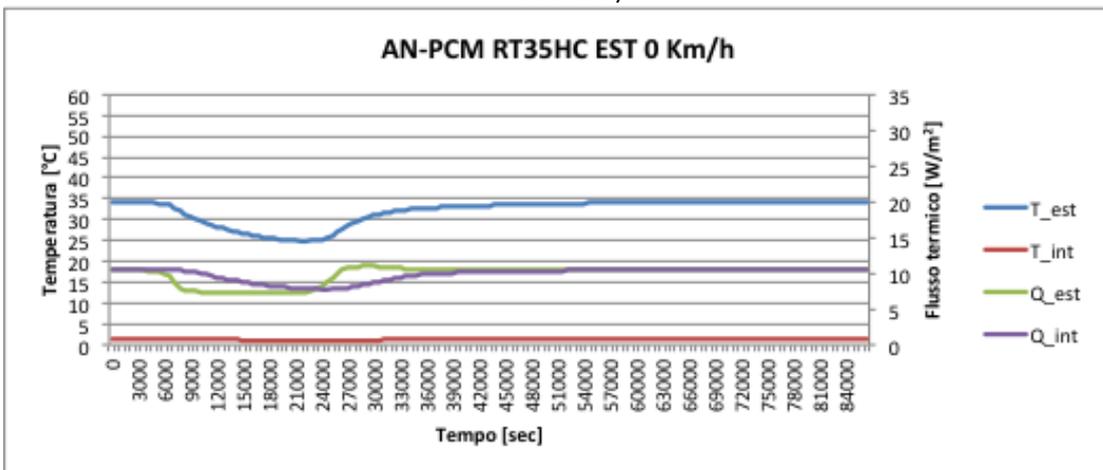


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, ANCONA, EST

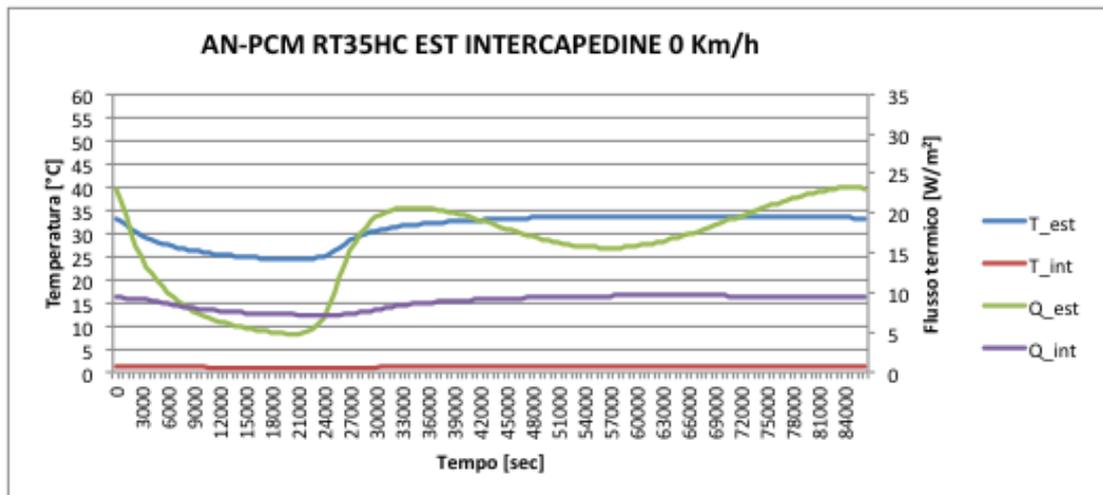
Modello a)



Modello b)

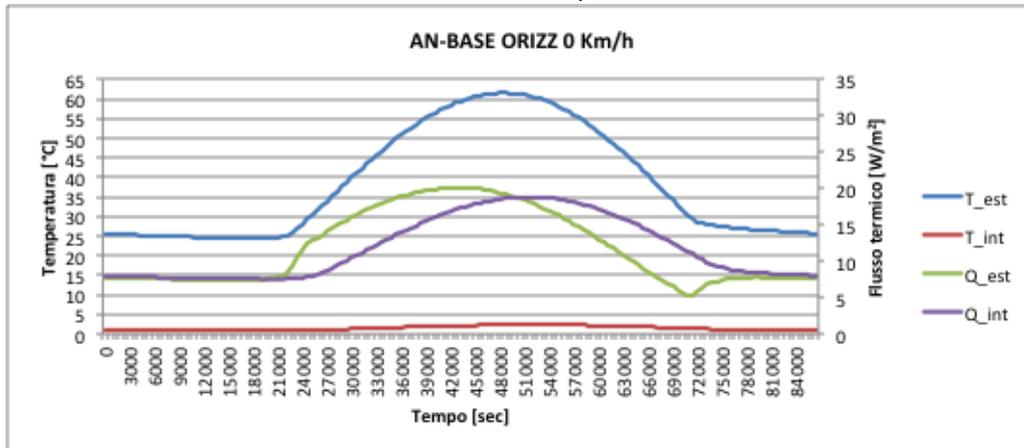


Modello c)

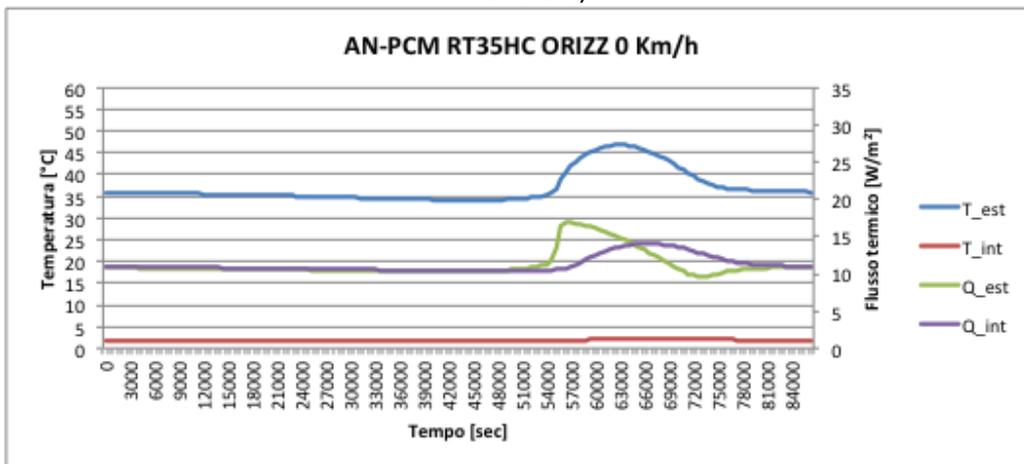


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, ANCONA, ORIZZ

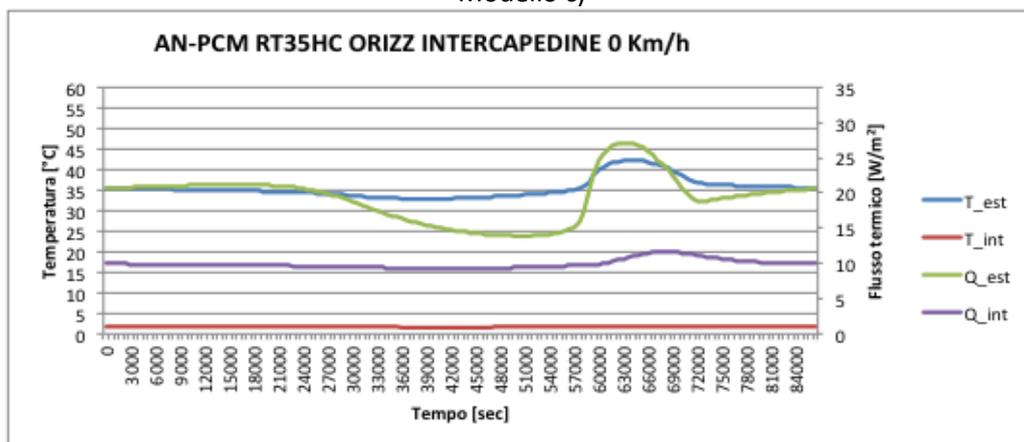
Modello a)



Modello b)

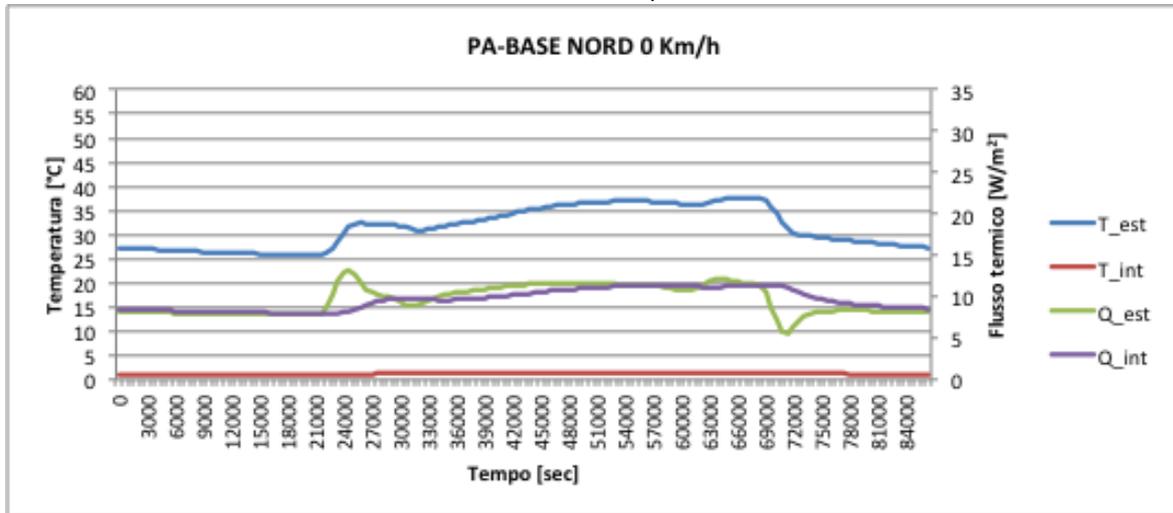


Modello c)

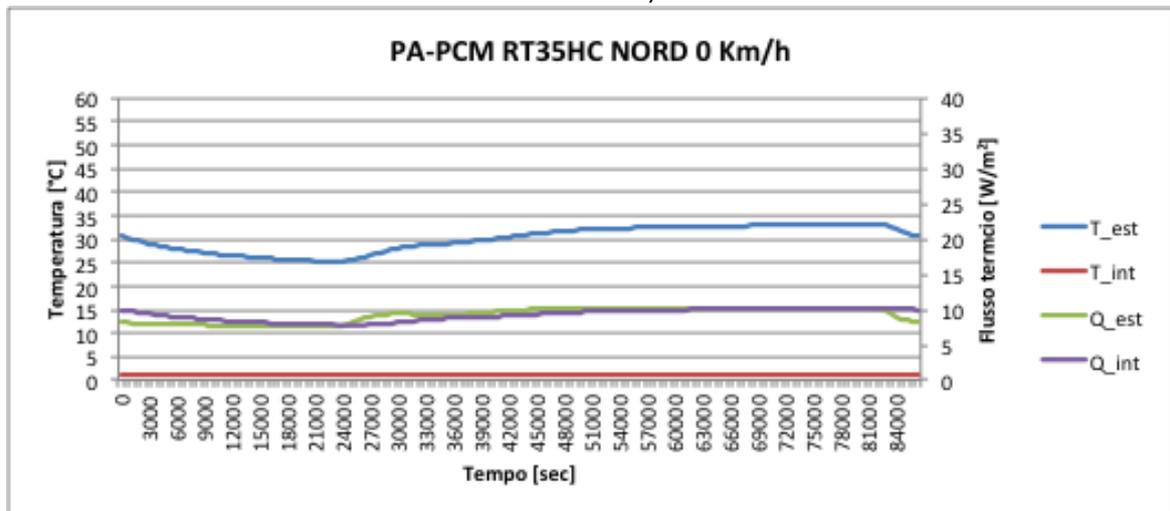


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, PALERMO, NORD

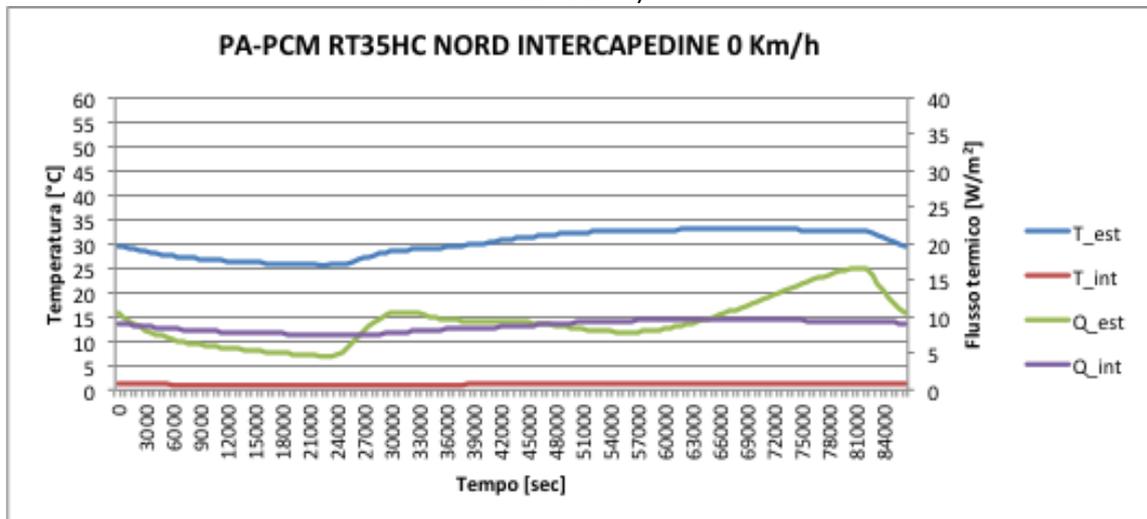
Modello a)



Modello b)

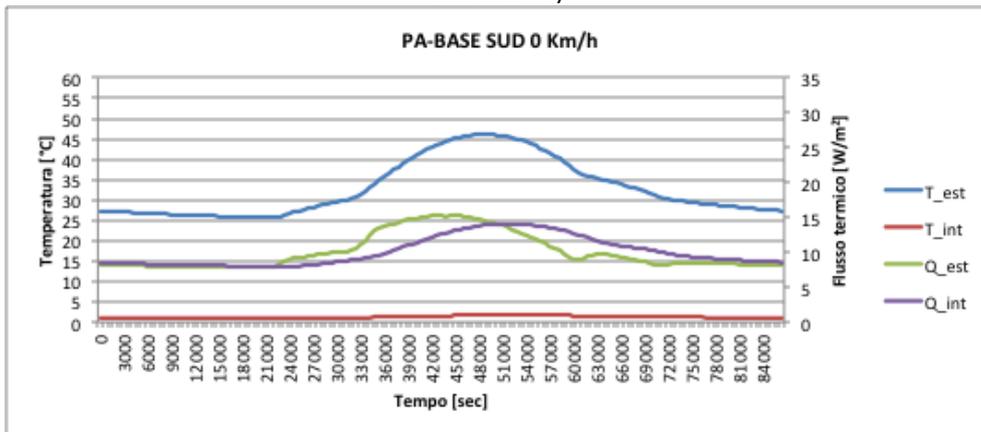


Modello c)

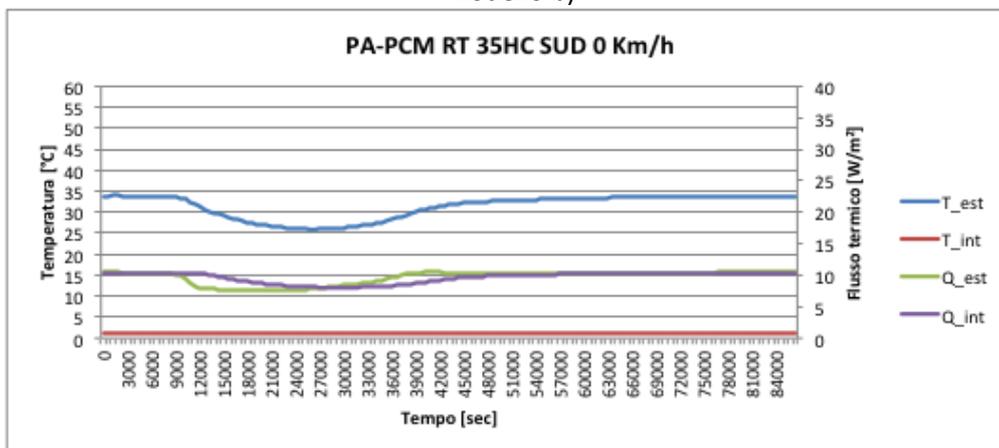


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, PALERMO, SUD

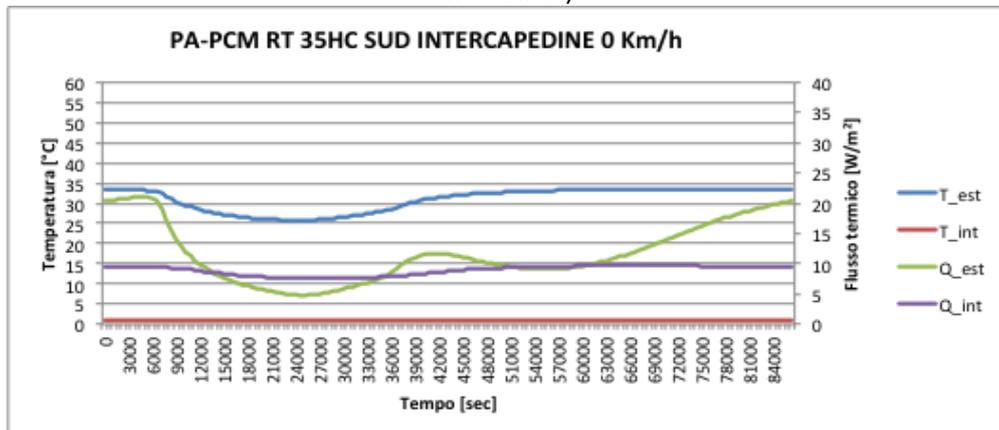
Modello a)



Modello b)

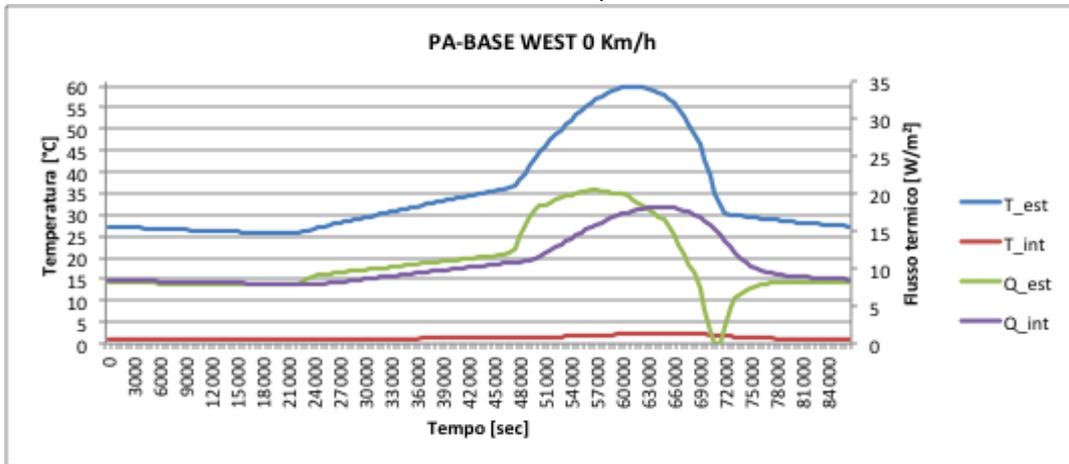


Modello c)

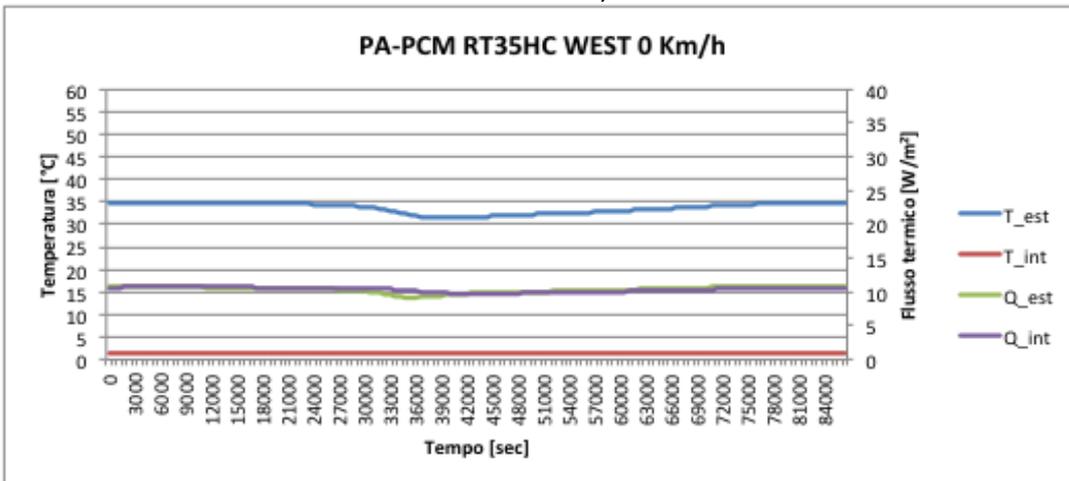


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, PALERMO, OVEST

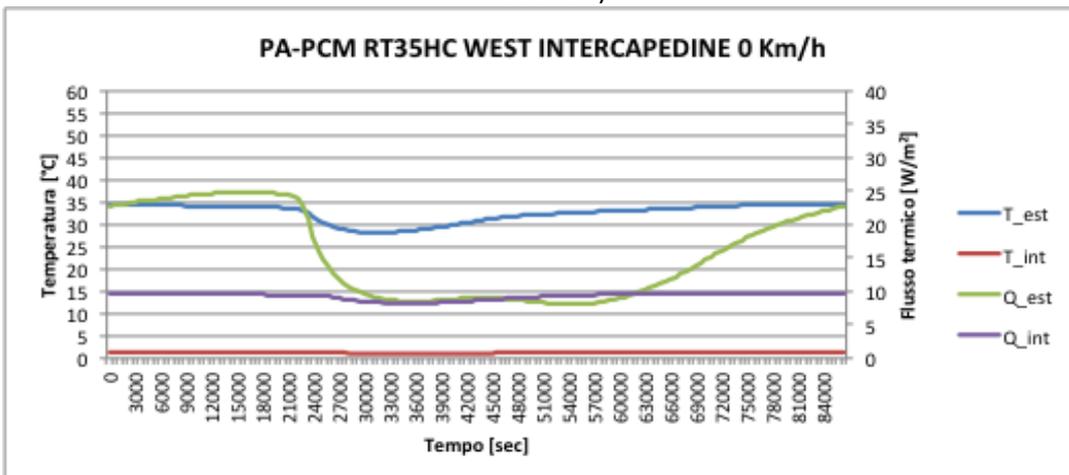
Modello a)



Modello b)

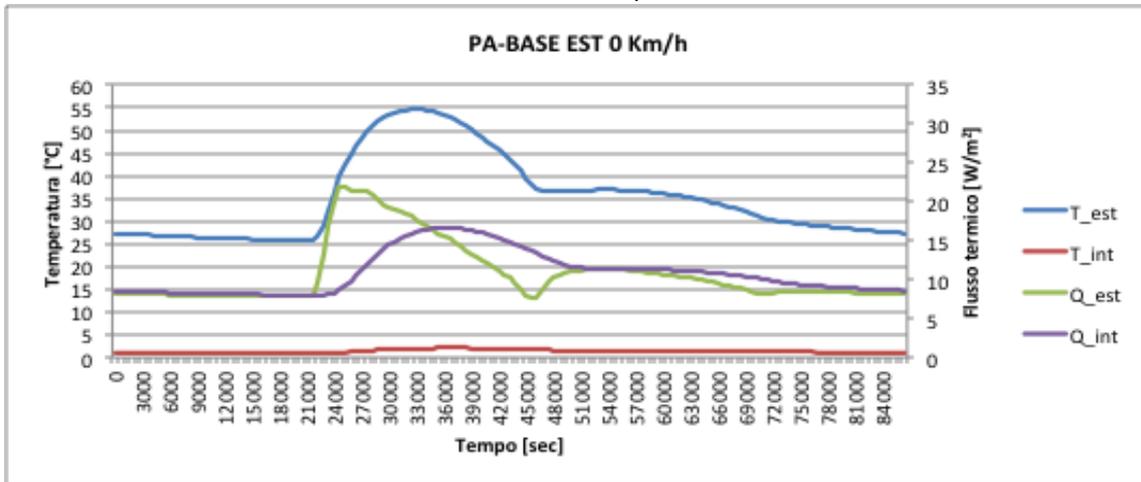


Modello c)

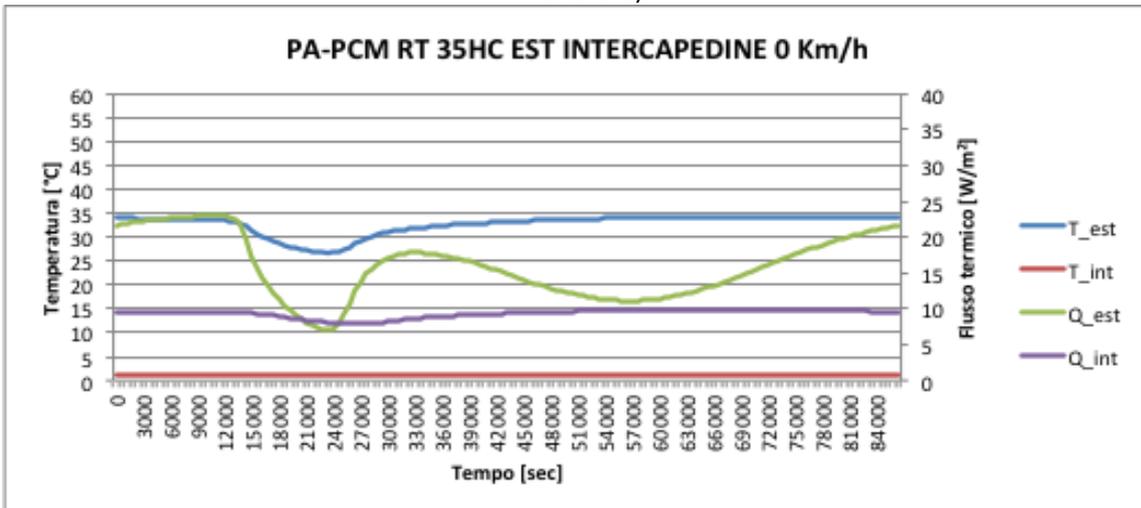


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, PALERMO, EST

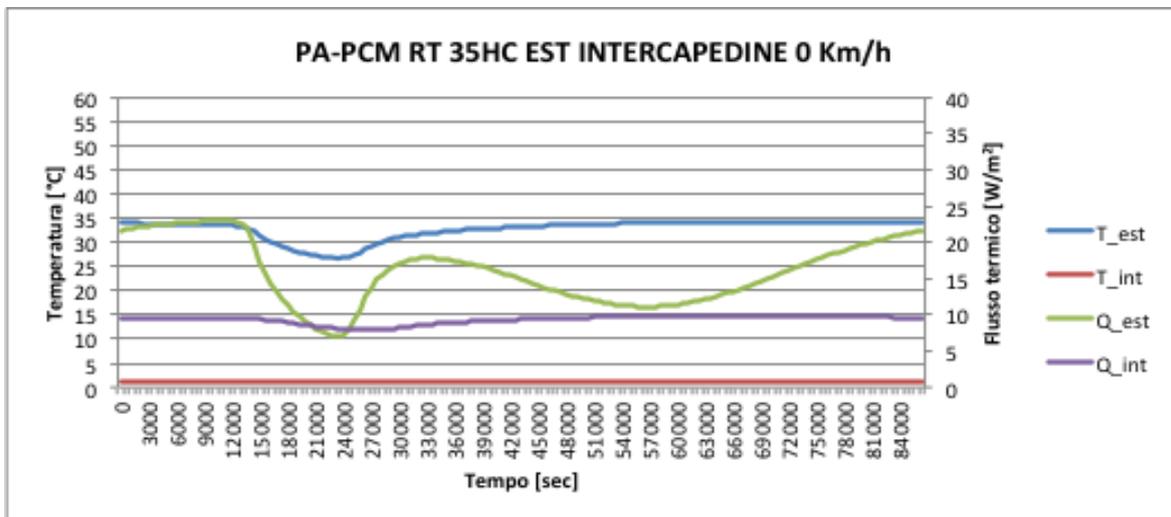
Modello a)



Modello b)

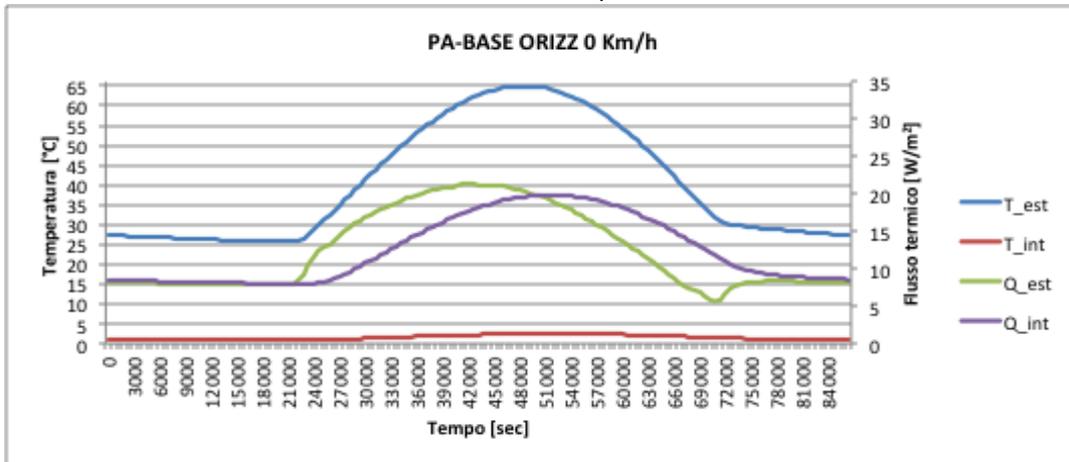


Modello c)

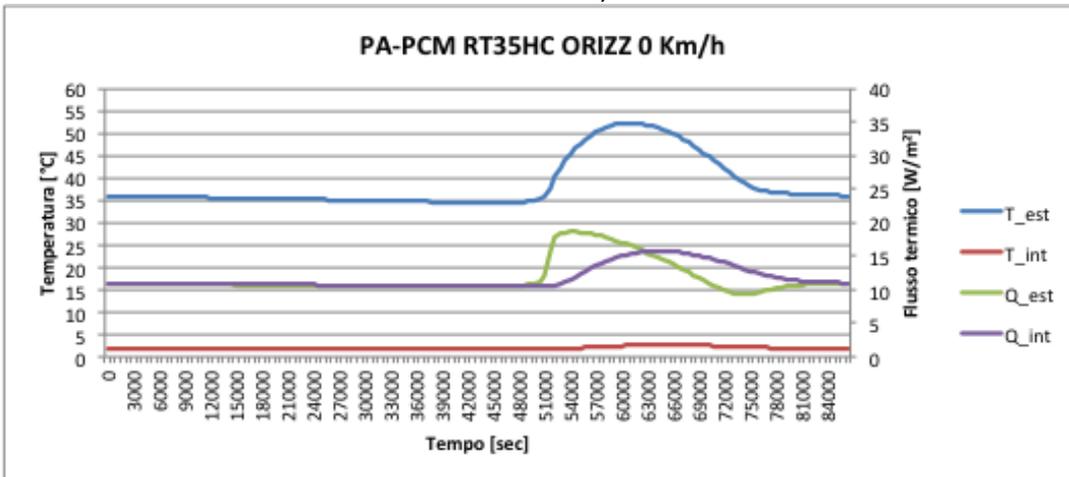


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, PALERMO, ORIZZ

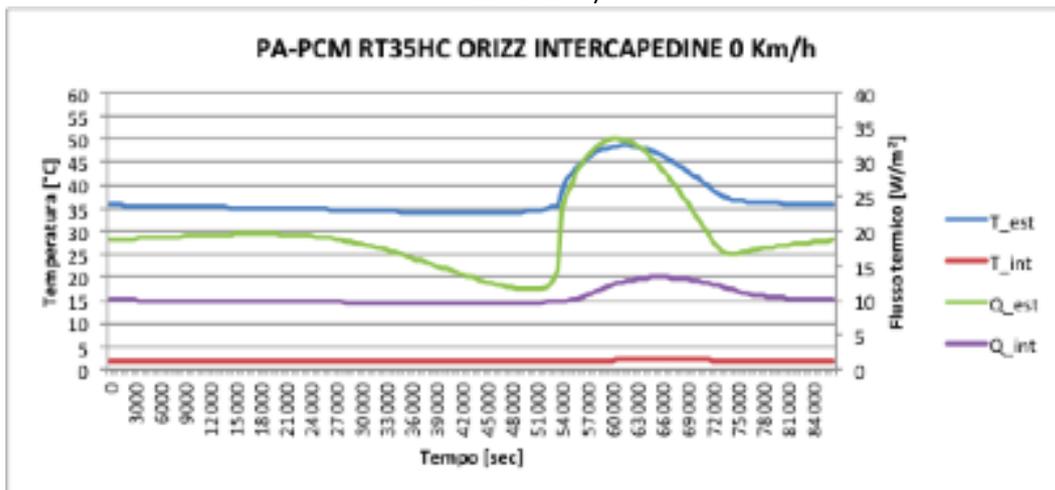
Modello a)



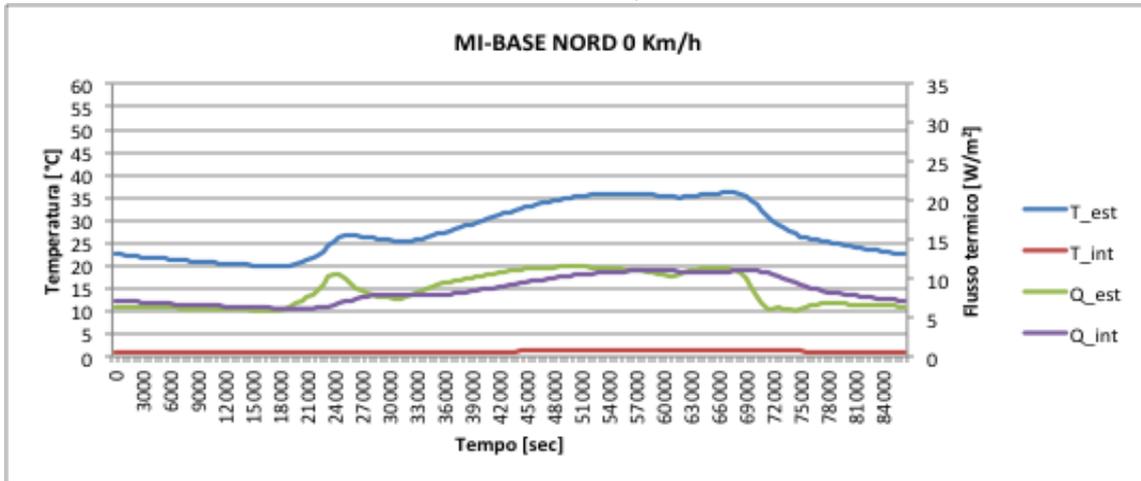
Modello b)



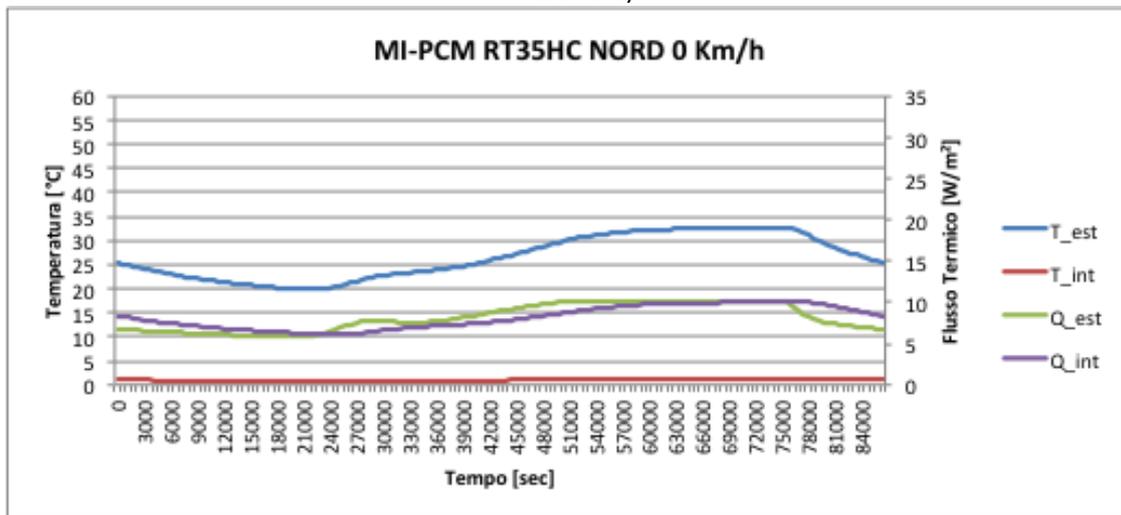
Modello c)



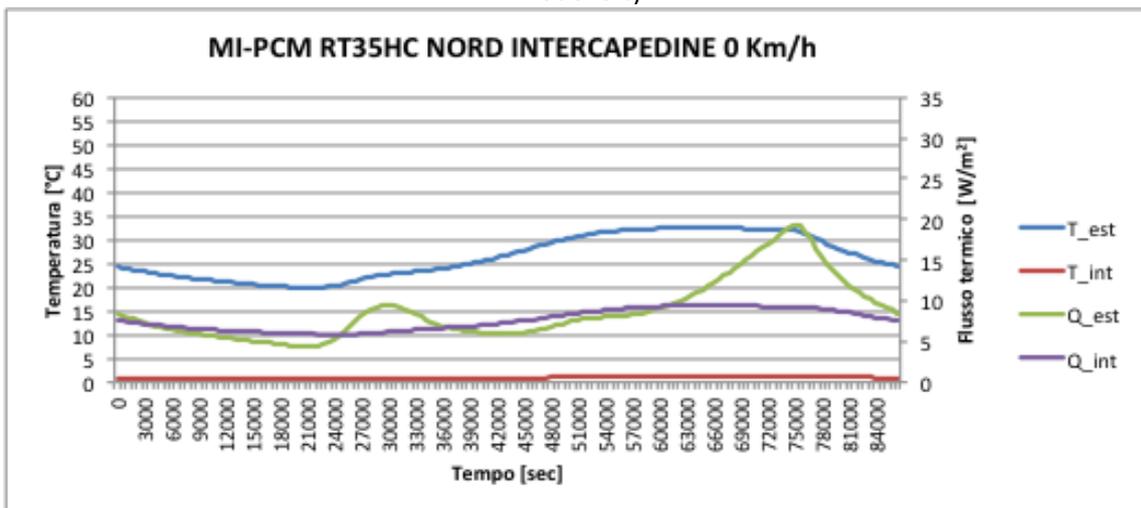
SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, MILANO, NORD  
Modello a)



Modello b)

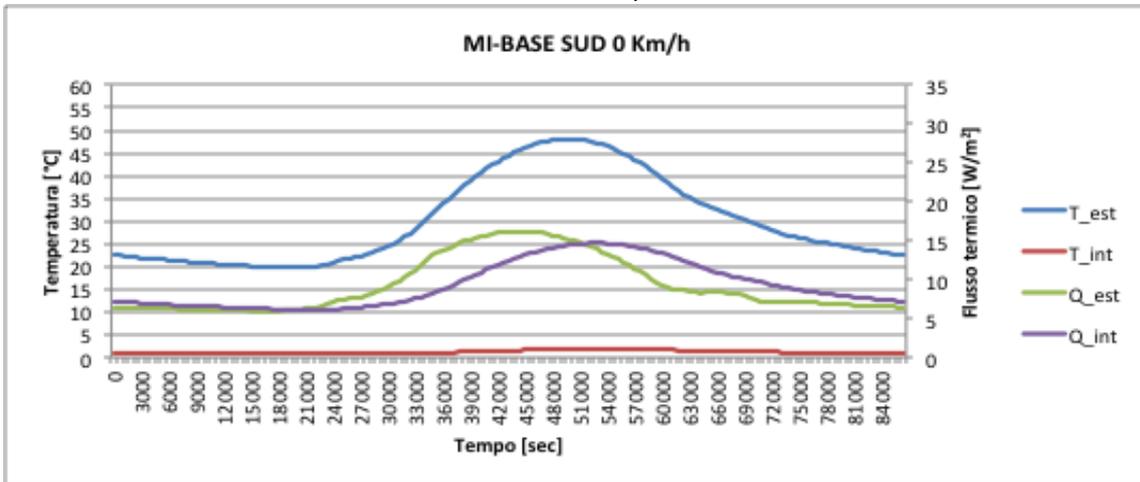


Modello c)

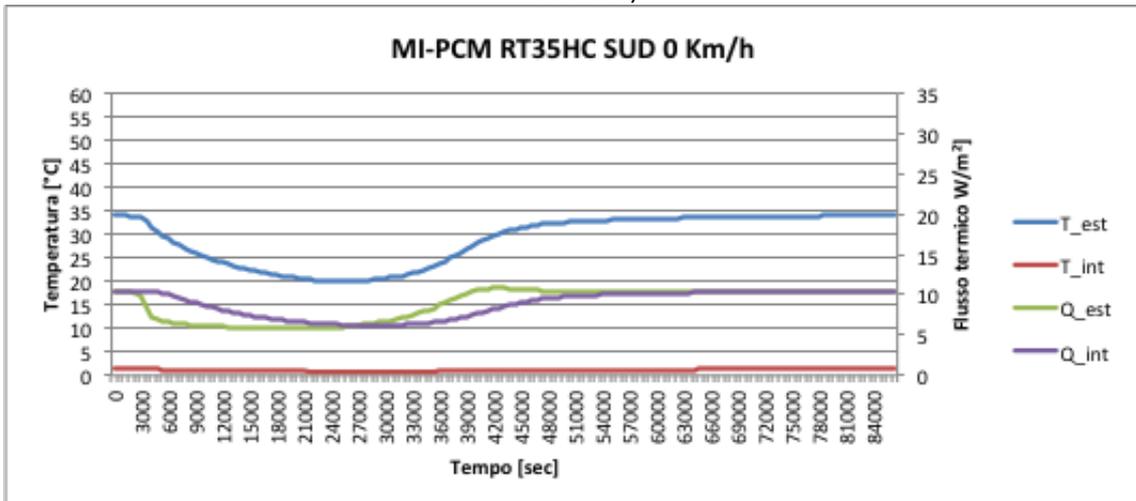


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, MILANO, SUD

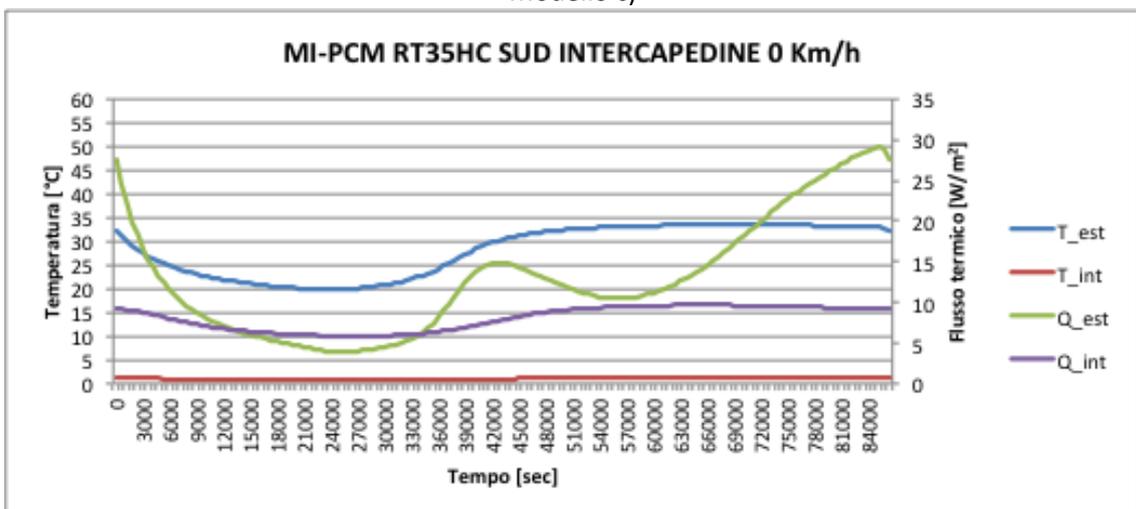
Modello a)



Modello b)

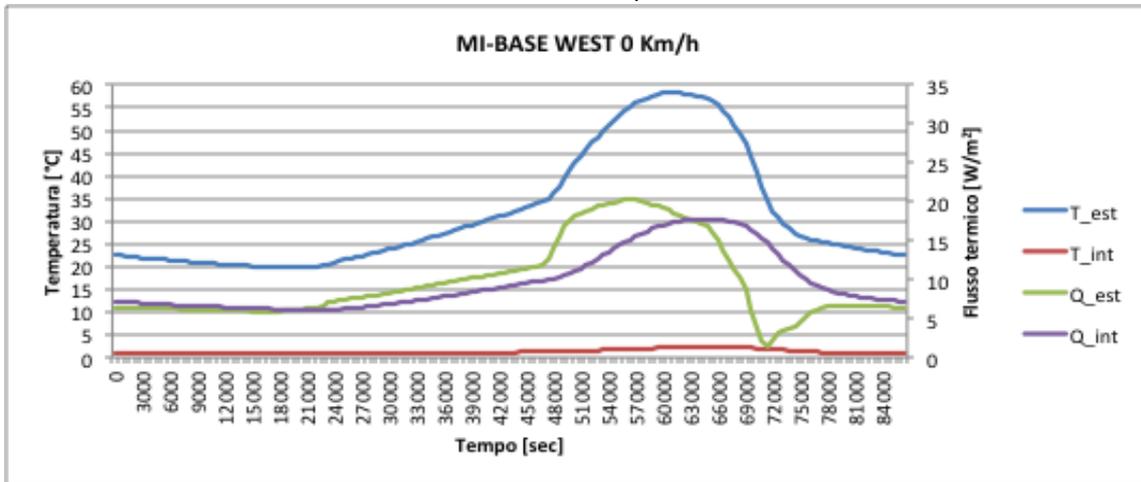


Modello c)

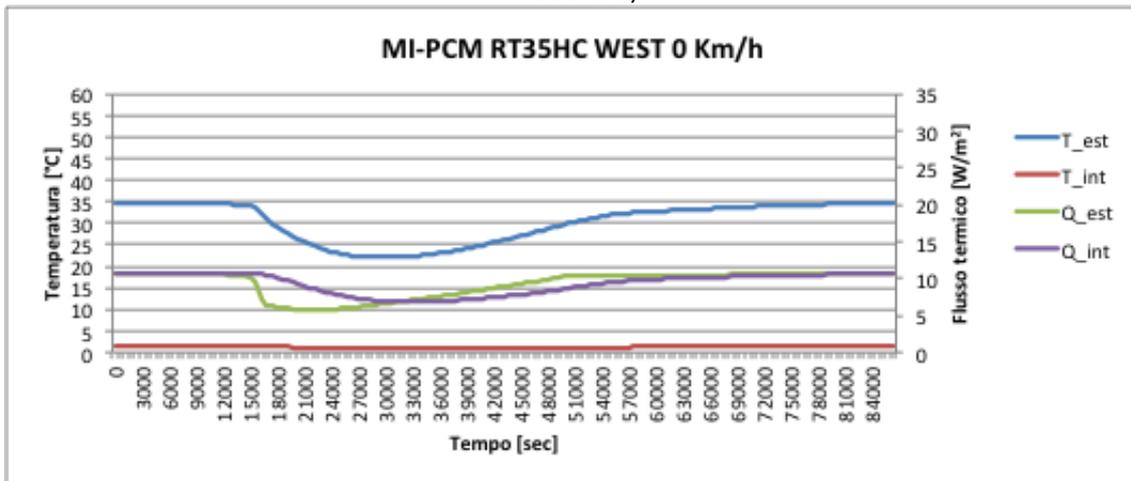


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, MILANO, OVEST

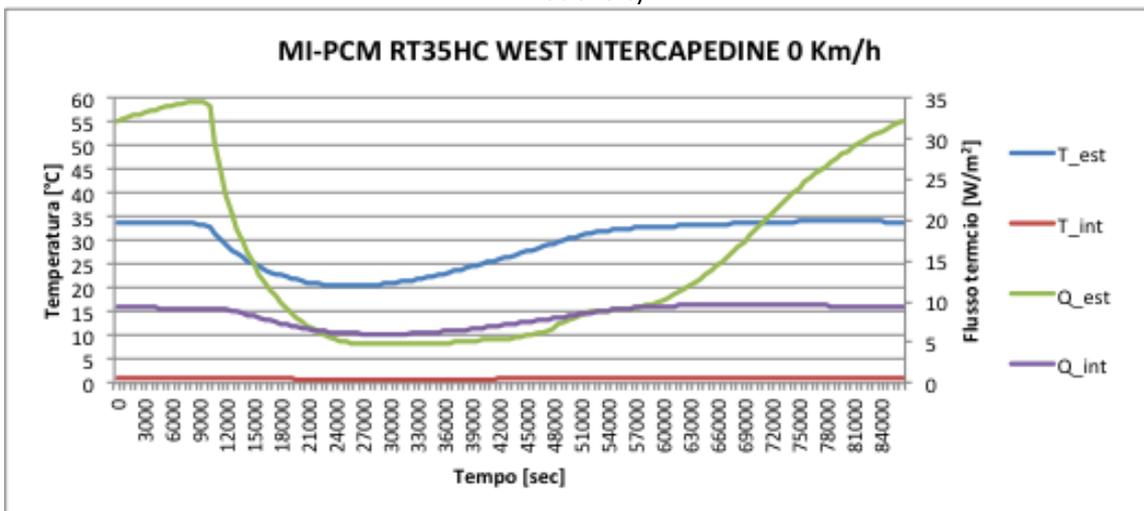
Modello a)



Modello b)

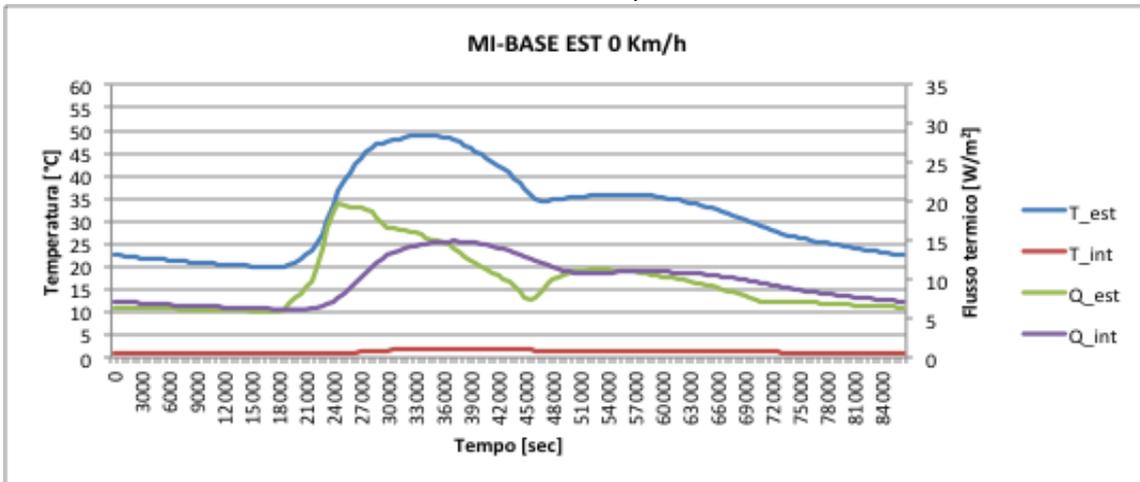


Modello c)

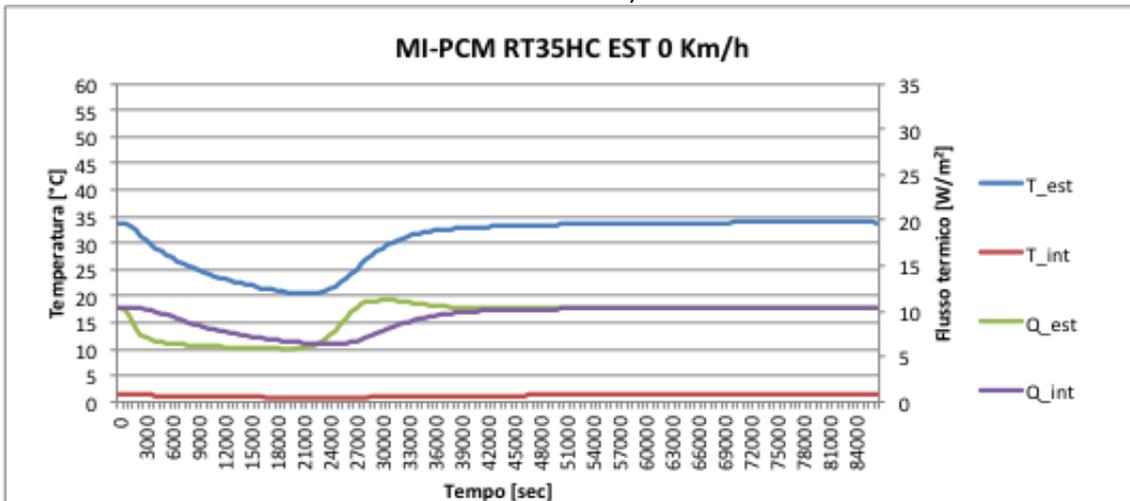


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, MILANO, EST

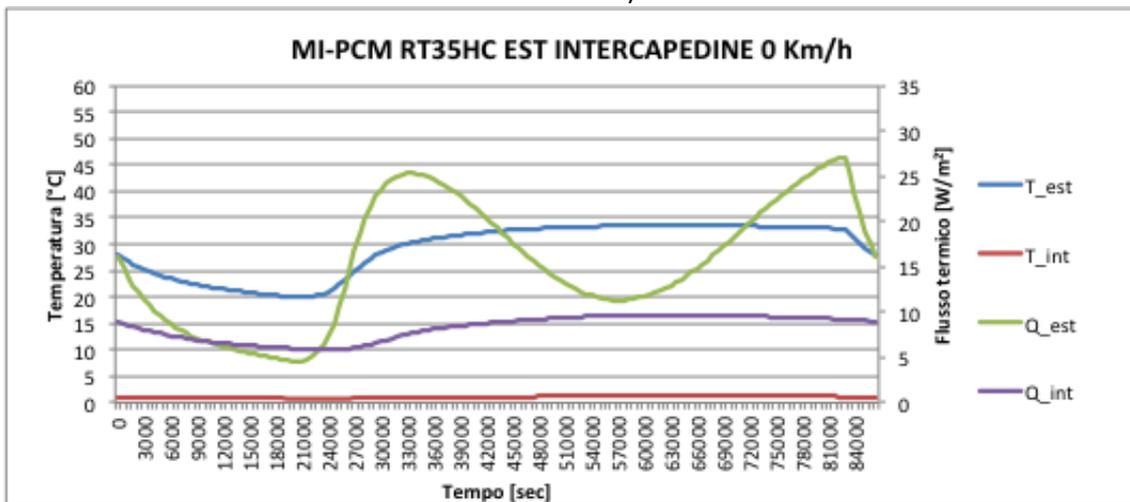
Modello a)



Modello b)

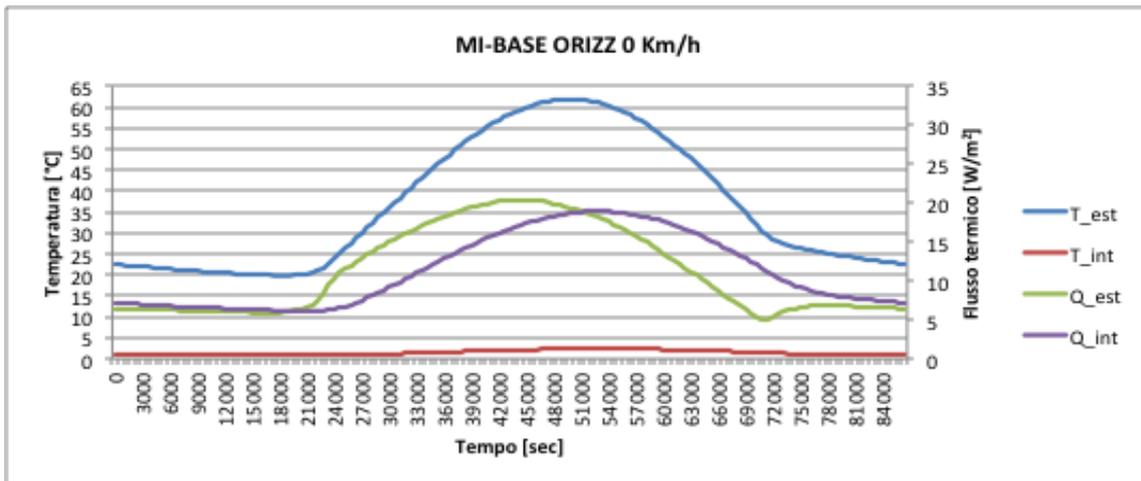


Modello c)

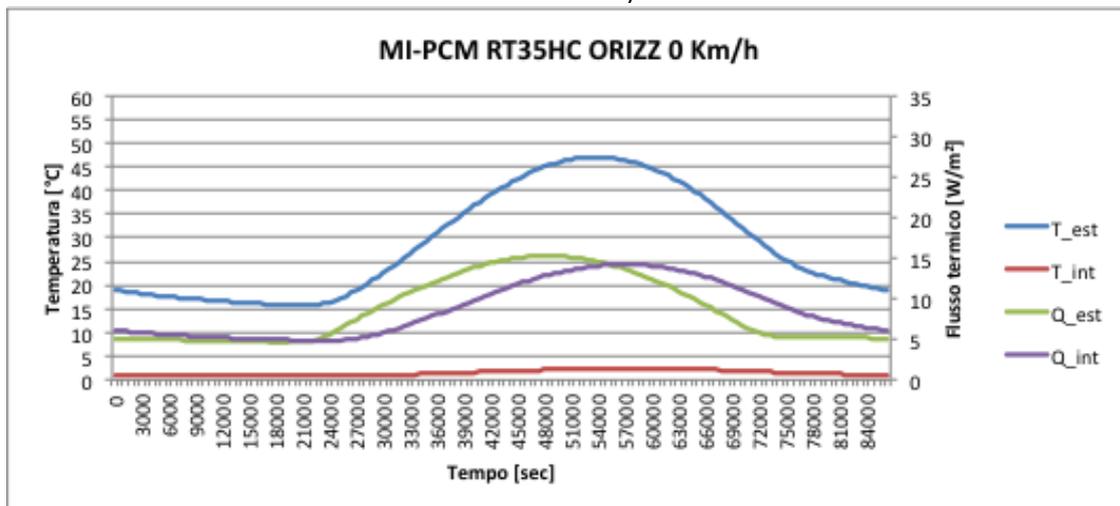


SIMULAZIONI VELOCITA' 0 Km/h, MILANO, ORIZZ

Modello a)



Modello b)



Modello c)

