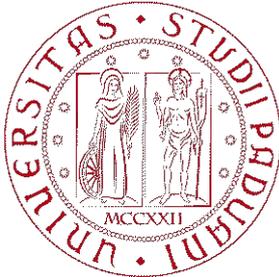


Università degli Studi di Padova
Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali
Corso di Laurea in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



OTTIMIZZAZIONE DI SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO PER BATTERIE ELETTRICHE

Relatore:

Prof. Ing. Mancin Simone

Laureandi:

Bortoli Alex

Caslli Arber

Dalla Bona Enrico

Mensah Ernesta Baaba

Sandri Paolo

INDICE:

1. INTRODUZIONE	pag. 4
2. VALIDAZIONE DEL MODELLO	pag. 6
2.1 Geometry	pag. 6
2.2 Analisi della mesh	pag. 7
2.3 Time step	pag. 7
2.4 Materiali	pag. 8
2.5 Determinazione del flusso termico	pag. 8
3. OTTIMIZZAZIONE DELLO SPESSORE DEL PCM	pag. 11
4. CONCLUSIONI	pag. 17

ABSTRACT:

Il presente progetto si propone di ottimizzare un sistema di controllo della temperatura di una batteria agli Ioni di Litio, facendo uso di materiali a cambiamento di fase (PCM).

Il lavoro di studio e ottimizzazione è stato svolto con l'ausilio del software CFD Ansys Fluent con il quale è stato possibile sviluppare in un modello numerico che è stato validato con i dati raccolti in laboratorio. Il modello così ottenuto è stato utilizzato per ottimizzare il sistema di raffreddamento, analizzando l'effetto dello spessore di PCM al fine di rispettare i prestabiliti parametri operativi.

PAROLE CHIAVE:

- Batterie
- Raffreddamento
- Scambio termico
- PCM
- Analisi numerica
- Analisi sperimentale
- Stampa additiva

1. INTRODUZIONE

L'utilizzo sempre più ampio di componentistiche elettriche e, in particolare, di batterie agli Ioni di Litio, soprattutto in ambito industriale, impone di dover far fronte a problematiche strettamente connesse al loro riscaldamento indesiderato durante l'esercizio che riduce la loro vita. Si rende quindi necessario implementare un sistema in grado di mantenere la temperatura delle apparecchiature al di sotto di un valore limite, che in questo caso studio è stato fissato a 45°C.

A seguito di diverse ricerche in questo campo, la tecnologia che meglio si adatta a garantire un efficace controllo della temperatura delle batterie si basa sull'utilizzo di materiali a cambiamento di fase (PCM). Essi hanno la proprietà di cambiare il proprio stato fisico, assorbendo calore latente di fusione e controllando in questo modo la temperatura del sistema.

Il seguente caso studio, atto quindi ad ottimizzare lo scambio termico di una batteria, prevede in primo luogo la creazione del modello 3D del *case* ospitante la batteria attraverso software di progettazione 3D che successivamente verrà realizzato mediante stampa additiva, in particolare con la tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*). Tale tecnologia prevede la fusione e l'estrusione di un filamento di polimero termoplastico attraverso un ugello mobile ed è in grado di riprodurre fedelmente il modello CAD.

In seguito, si conducono delle prove sperimentali per determinare, con l'ausilio di due termocoppie, le temperature rispettivamente alla parete della batteria e al centro del volume di PCM, durante un ciclo di carica e scarica della batteria. Tali dati vengono poi sfruttati per validare il modello al CFD (Ansys Fluent) permettendo in questo modo di ricavare i valori di flusso termico propri dei processi di carica e scarica della batteria in esame. In questo modo è possibile centrare l'obiettivo dell'esperienza, nonché simulare 10 cicli di carica e scarica ottimizzando lo spessore del PCM in maniera tale da mantenere la frazione liquida al di sotto di 1 (tutto liquido) e la temperatura massima al di sotto dei 45°C, in accordo con quanto specificato in precedenza.

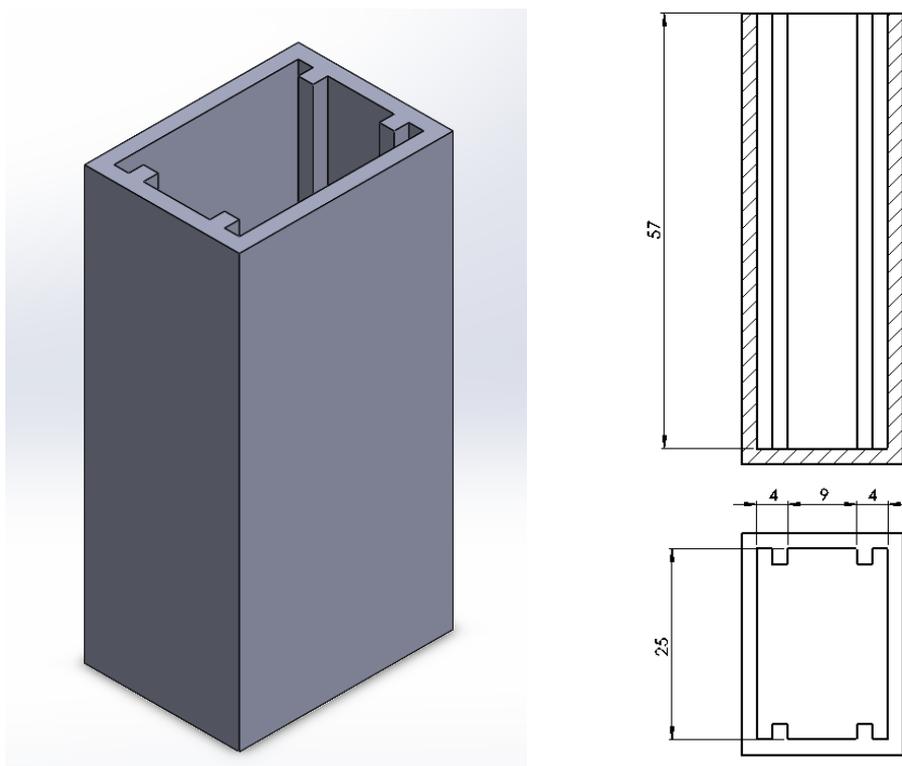


Figura 1 – Modello 3D del case ospitante la batteria e il PCM

2. MODELLO TEORICO - equazioni

3. Nel presente caso studio, il software elabora e risolve le equazioni differenziali relative alla conservazione di massa, della quantità di moto e dell'energia:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad \text{eq. (1)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad \text{eq. (2)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad \text{eq. (3)}$$

Il termine ρg in eq. (2) è calcolato grazie all'approssimazione di Boussinesq, dove la densità è funzione della differenza di temperatura:

$$\rho = \rho_0(1 - \beta \Delta T) \quad \text{eq. (4)}$$

Per le altre equazioni, la densità è assunta costante. Questa approssimazione è ragionevole per differenze limitate di temperatura (e densità), come nel caso in esame. Il termine S nell'equazione della quantità di moto - eq. (2) - è definito come:

$$\vec{S} = \frac{(1 - \gamma)^2}{(\gamma^3 + 0,001)} A_{mush} \vec{v} \quad \text{eq. (5)}$$

In eq. (5) compaiono due parametri importanti: la frazione liquida γ e la costante A_{mush} (relativa alla "mushy zone").

Il primo è definito dalla eq. (6) e il secondo è una costante correlata alla regione in cui coesistono fase solida e liquida, nonché la zona in cui γ varia tra 0 e 1.

Il parametro γ è fondamentale nell'approccio entalpia-porosità: tale metodo prevede che il dominio fluido sia assimilato a un mezzo poroso, nel quale la porosità corrisponde alla frazione liquida γ , al fine di assicurare che la velocità in corrispondenza delle regioni solide sia nulla.

I valori di $T_{solidus}$ e $T_{liquidus}$ sono stati fissati pari agli estremi dell'intervallo di fusione del PCM (rispettivamente 28,5 °C e 29,5 °C).

$$\gamma = \begin{cases} 0 & T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & T_{solidus} < T < T_{liquidus} \\ 1 & T > T_{liquidus} \end{cases} \quad \text{eq. (6)}$$

L'entalpia H nell'equazione relativa all'energia - eq. (3) - è la somma di un termine sensibile e un termine latente:

$$H = \left(h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \right) + (\gamma L) \quad \text{eq. (7)}$$

4. VALIDAZIONE DEL MODELLO

Sperimentalmente si sono ricavati valori di temperatura, in funzione del tempo, alla batteria e al centro del PCM mediante l'uso di termocoppie di tipo T con un'incertezza di $\pm 0.05K$.

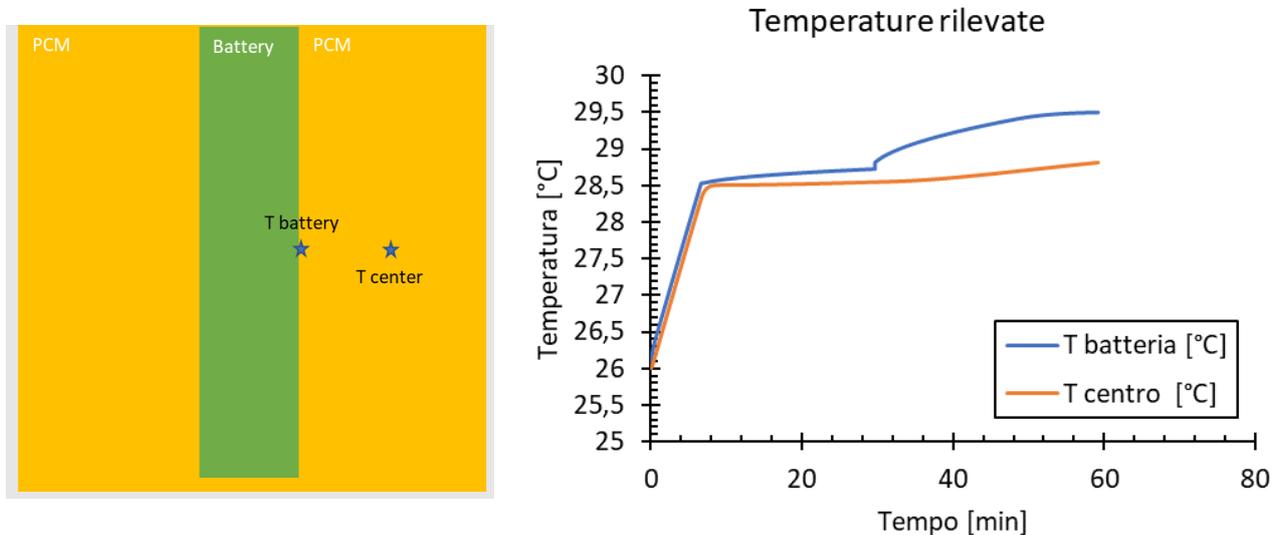


Figura 2 - Schema sperimentale e temperatura rilevata

Lo scopo è quello di determinare il valore del flusso termico generato dalla batteria, che permette di ottenere i valori sperimentali di temperatura sopra riportati. Per fare ciò si è inserito tale schema in Ansys Fluent e, attraverso un metodo iterativo, si sono potuti determinare i valori di flusso termico simulando l'intero ciclo di carica e scarica.

3.1 GEOMETRY

In prima battuta si è modellata, attraverso il software *Design Modeler*, la geometria che in questo caso risulta di semplice definizione in quanto è sufficiente creare un modello 2D che rappresenti lo spessore di PCM. Lo spessore del *case* non risulta essere rilevante e pertanto non è stato preso in considerazione in quanto il sistema è considerato adiabatico verso l'esterno, in accordo con le prove di laboratorio. La batteria è immersa nel PCM. Sfruttando inoltre la simmetria geometrica è sufficiente studiare solamente una porzione del sistema, snellendo così il processo di calcolo.

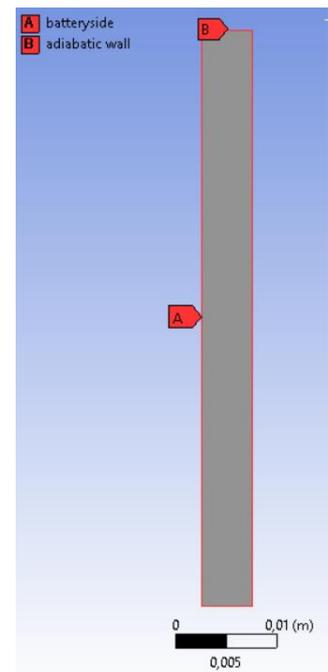


Figura 3 - Geometria di simulazione

3.2 ANALISI DELLA MESH

È stata condotta una analisi della *mesh* in modo tale da ottenere un risultato il più accurato possibile limitando la mole di calcolo: sono state svolte diverse simulazioni, mantenendo invariati i parametri (quali *time step size*, *number of time steps*, iterazioni per *time step*, *heat flux*...) ma aumentando di volta in volta il numero di nodi.

Si riporta quanto ottenuto nel seguente grafico:

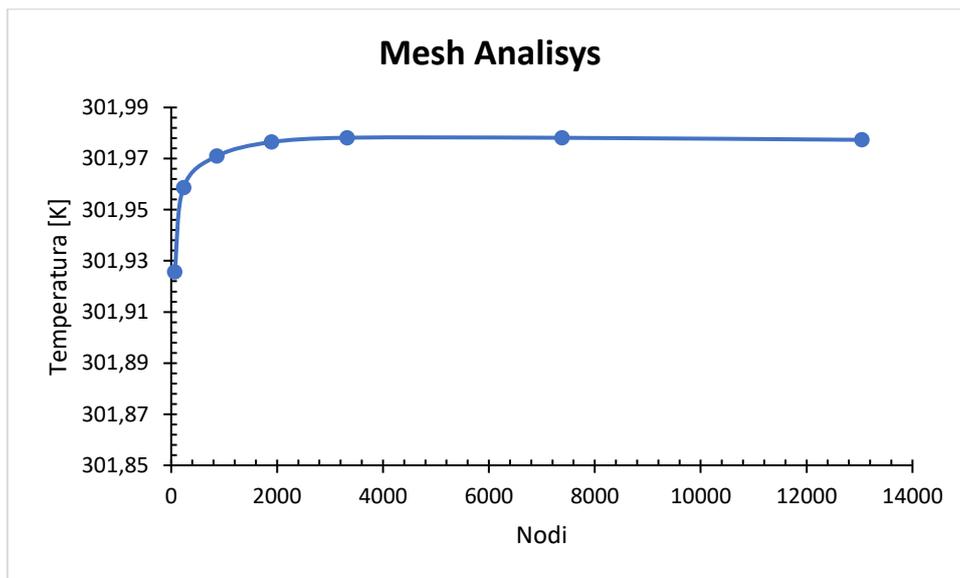


Figura 4

Si può evincere dunque che, per un numero di nodi superiore a 2000, i risultati del valore di temperatura (in questo caso valutata al centro del PCM) raggiungono un valore asintotico; si è quindi deciso di procedere con le successive simulazioni utilizzando una *mesh* di dimensioni 60x40, infittendo il numero di divisioni sull'asse orizzontale, direzione di maggiore interesse nello studio del caso.

3.3 TIME STEP

Altre importanti considerazioni sono state effettuate riguardo la scelta dei parametri di calcolo, visti i lunghi tempi di simulazione che sono trattati in seguito (10 ore totali). Si sono dunque confrontati diversi valori di *time step*, chiaramente a parità di *mesh*, oltre che di iterazioni per *time step*, su un singolo ciclo di carica e scarica. I risultati ottenuti sono riassunti in un grafico che esprime l'evoluzione nel tempo della temperatura al centro del PCM durante un ciclo di carica e scarica: esso dimostra come, per via della ridotta complessità del caso, anche all'aumentare del *time step size*, i valori di temperatura ricavati dalle simulazioni comunque coincidono. Ciò quindi rende lecito utilizzare un valore di *time step size* di 2 secondi.

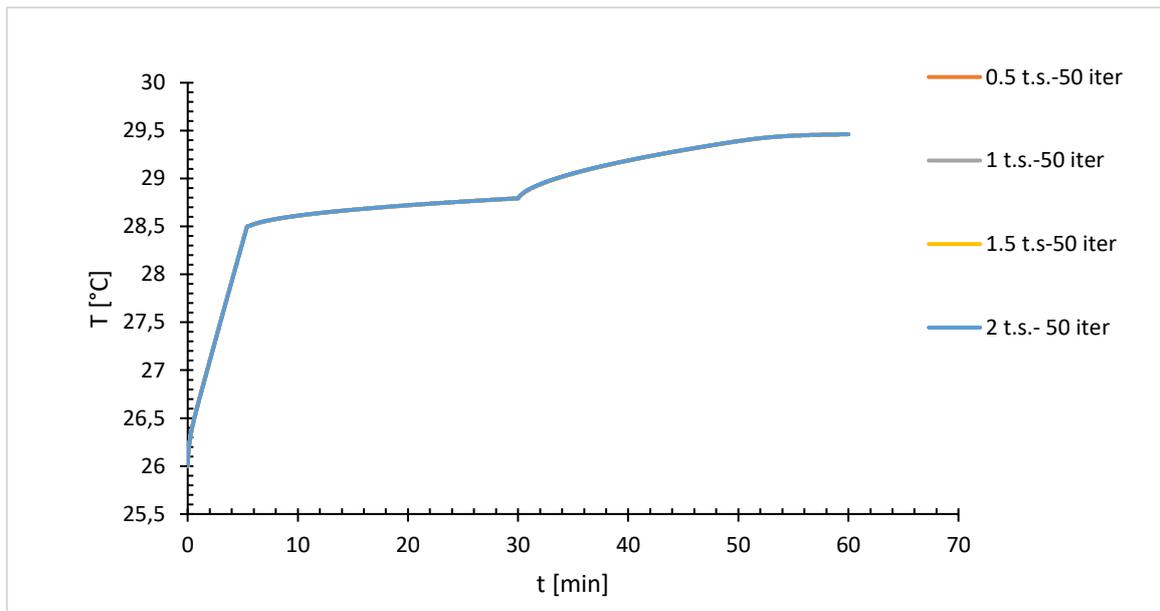


Figura 5

Anche per il numero di iterazioni per *time step* si è proceduto in modo analogo a quanto fatto in precedenza, confrontando i risultati ottenuti nelle diverse simulazioni andando a variare questo parametro e in particolare assegnando valori pari a 50, 30, 10, 1 iterazioni per *time step*. Il miglior compromesso tra snellezza di calcolo e accuratezza dei risultati si è ottenuto utilizzando 10 iterazioni per *time step*, valore che permette inoltre di raggiungere la convergenza dei risultati.

3.4 MATERIALI

Il PCM scelto per l'esperienza è il CR29, avente le seguenti proprietà:

Melting range [°C]	28.5	29.5
r [J/kg]	233800	
β [1/K]	0,003311	
	Solido	Liquido
ρ [kg/m ³]	856	772
c_p [J/kg K]	2250	2483
λ [W/m K]	0,402	
μ [kg/m s]		0,003747

Tabella 1 - Proprietà CR29

3.5 VALIDAZIONE DEL MODELLO

A questo punto si procede con il determinare il flusso termico generato dalla batteria durante il ciclo di carica e scarica. Per fare ciò si utilizza uno schema iterativo che prevede di effettuare più simulazioni successive imponendo dapprima un valore di primo obiettivo, per poi aggiustare tale valore in modo da avvicinarsi il più possibile ai risultati sperimentali.

Nel Setup della simulazione, in *Method* si è utilizzato l'algoritmo SIMPLE alla voce "pressure-velocity", alla voce "pressure" si è utilizzata l'opzione PRESTO (*Pressure Staggering Option*) mentre per le successive voci si è impostato *second order*.

La simulazione è stata inizializzata con una temperatura di 26°C, in accordo con le condizioni dell'ambiente in cui si sono svolte le prove di laboratorio.

Come si può osservare nel grafico ottenuto sperimentalmente, i valori del flusso termico nelle fasi di carica e scarica risultano differenti nei due casi: si è pertanto deciso di assegnare due valori distinti al flusso termico, i quali in primo luogo sono stati assunti pari a $q=150 \text{ W/m}^2$ per la carica e $q=300 \text{ W/m}^2$ per la scarica, ottenendo però scostamenti troppo elevati rispetto ai dati sperimentali. Si riporta quanto ottenuto:

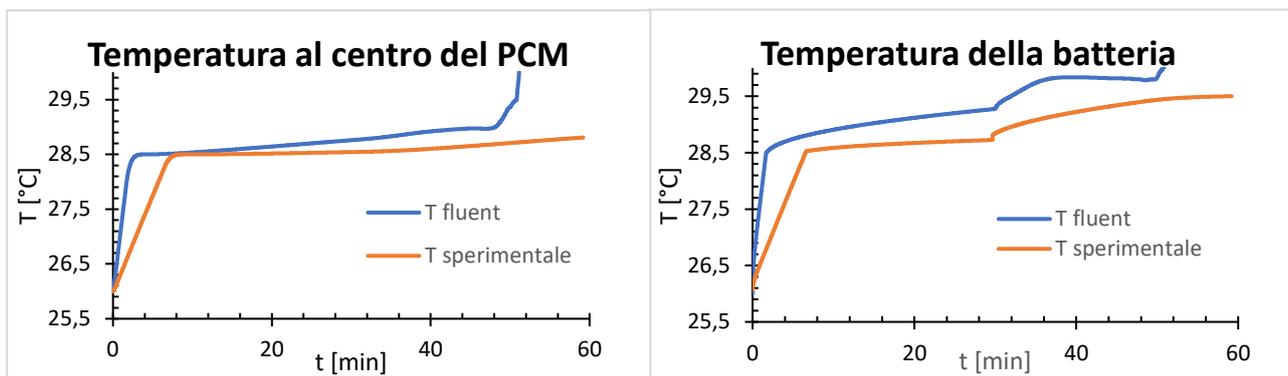


Figura 6

$\Delta \% T_{\text{batteria}}$	35,53
$\Delta \% T_{\text{PCM}}$	36,52

Tabella 2 - Scostamenti % massimi

Si è quindi deciso di utilizzare valori più bassi, ovvero $q=65 \text{ W/m}^2$ per la carica e $q=180 \text{ W/m}^2$ per la scarica, ottenendo:

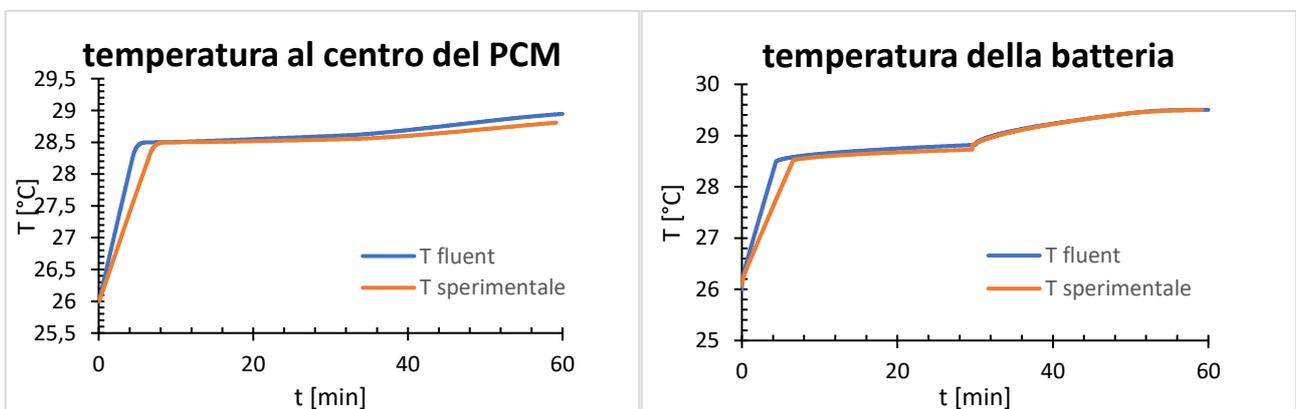


Figura 7

$\Delta \% T_{\text{batteria}}$	2,61
$\Delta \% T_{\text{PCM}}$	2,61

Tabella 3 - Scostamenti % massimi

Si è poi proceduto in modo analogo, aggiustando di volta in volta i valori del flusso termico. Si riportano i risultati ottenuti:

$q=55 \text{ W/m}^2$, $q=180 \text{ W/m}^2$:

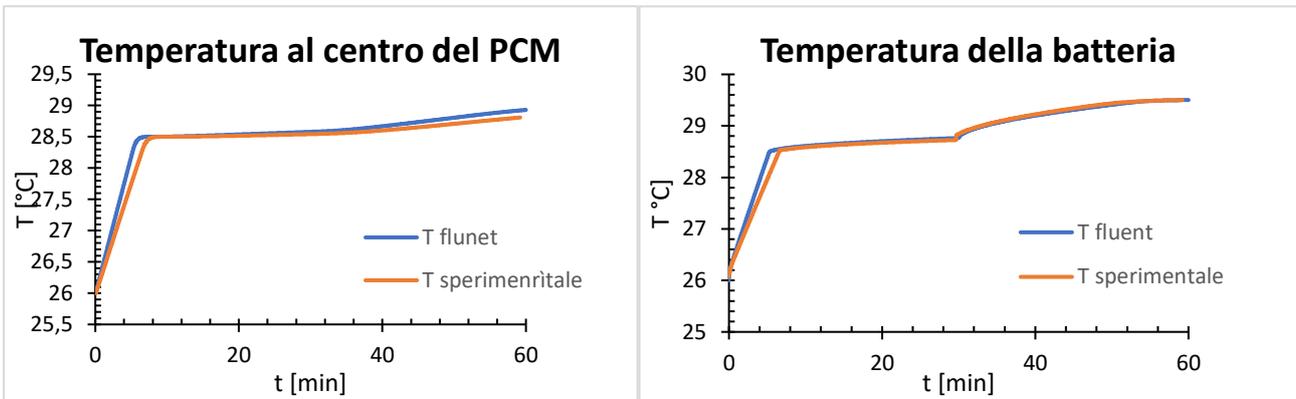


Figura 8

$\Delta \% T_{\text{batteria}}$	1,54
$\Delta \% T_{\text{PCM}}$	1,63

Tabella 4 - Scostamenti % massimi

$q=50 \text{ W/m}^2$, $q=175 \text{ W/m}^2$:

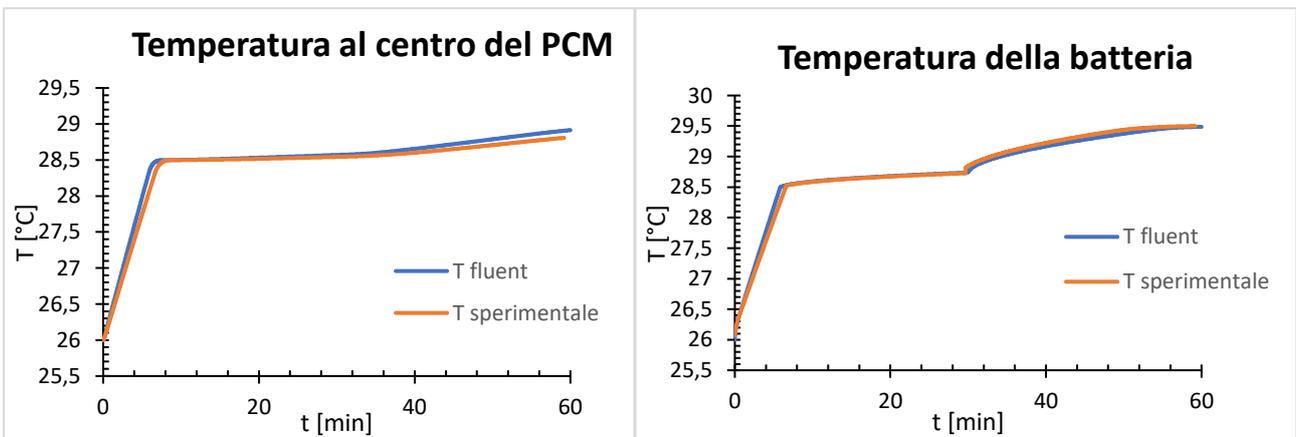


Figura 9

$\Delta \% T_{\text{batteria}}$	0,85
$\Delta \% T_{\text{PCM}}$	0,98

Tabella 3- Scostamenti % massimi

Visti i ridotti scostamenti massimi si è deciso di adottare questi ultimi valori del flusso termico per i calcoli che seguiranno, i quali approssimano al meglio le condizioni sperimentali.

5. OTTIMIZZAZIONE DELLO SPESSORE DEL PCM

Dopo aver validato il modello CFD, si procede all'analisi del caso studio:

- 10 cicli di carica e scarica della batteria;
- Temperatura massima < 45°C;
- Frazione liquida < 1.

Anche in questo caso si procede con un metodo iterativo: assegnato un determinato valore allo spessore del PCM, si rilevano di volta in volta i valori delle grandezze di interesse.

Un valore di primo tentativo è stato scelto pari a 10mm, che tuttavia comporta la completa fusione del PCM dopo meno di 6 cicli. Si è pertanto deciso di aumentare significativamente lo spessore del PCM, fino a 23mm, per poi scendere a 18mm, aggiustare il tiro a 20mm e successivamente in modo definitivo a 21mm.

I risultati ottenuti sono riportati in seguito:

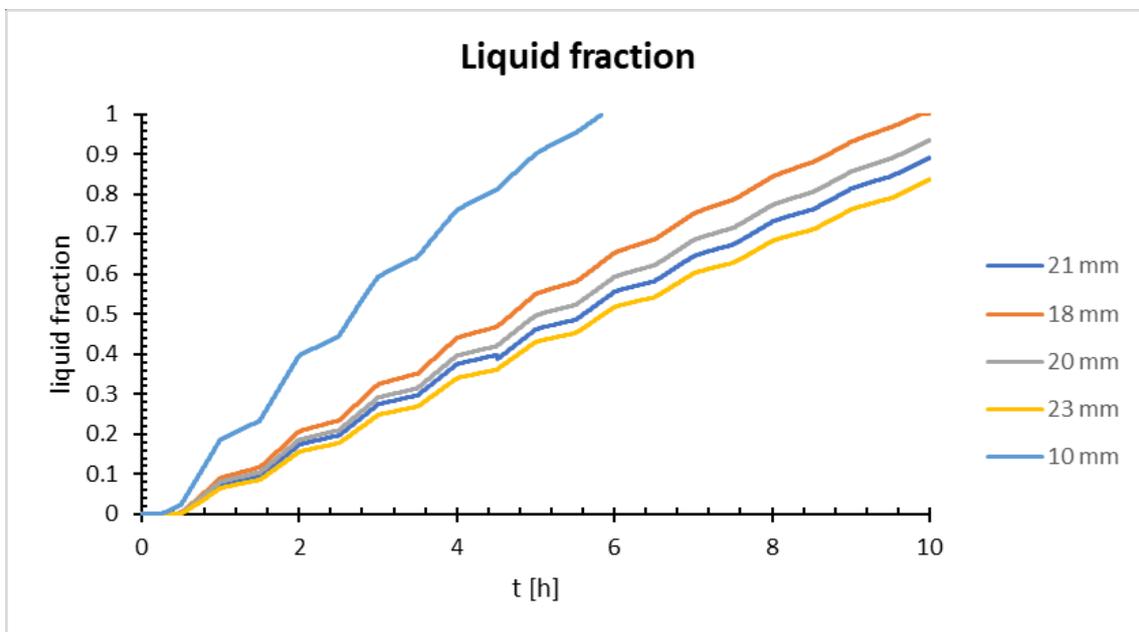


Figura 10 – Evoluzione della Liquid Fraction per i diversi spessori di PCM

spessore [mm]	liquid fraction [/]
10	1
18	1
20	0,936
21	0,892
23	0,837

Tabella 4 - Valori finali della Liquid Fraction relativi ai diversi spessori di PCM

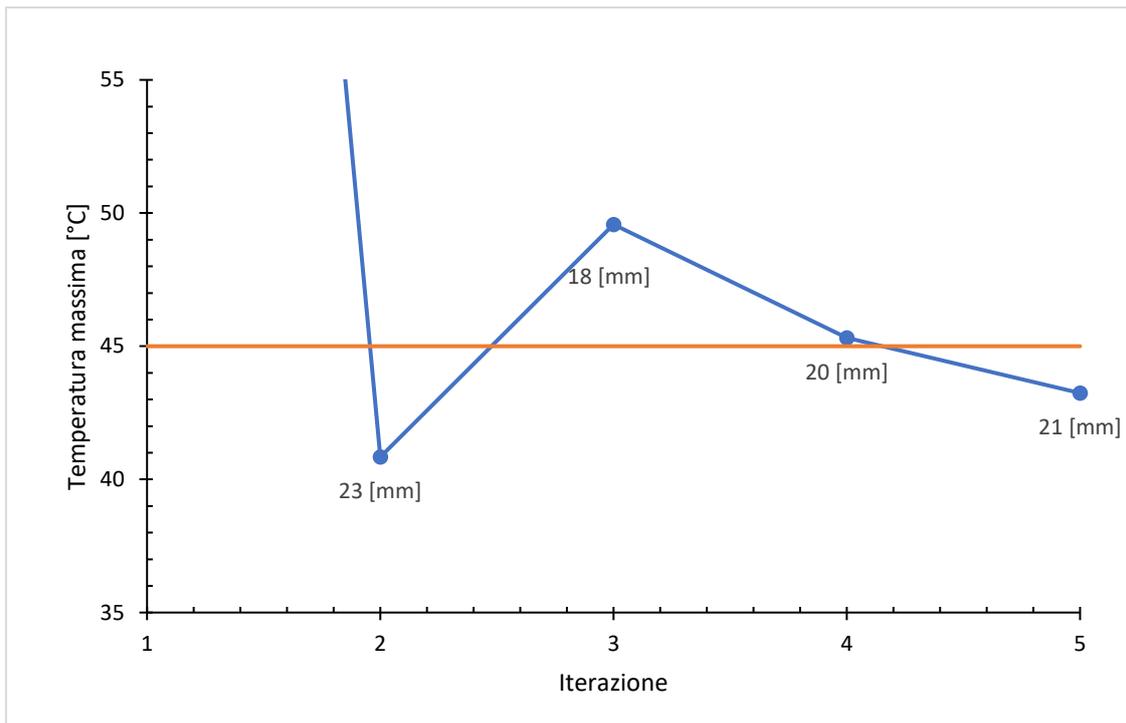


Figura 11

iterazione	spessore	Tmax
[/]	[mm]	[°C]
1	10	135.08
2	23	40.839
3	18	49.567
4	20	45.312
5	21	43.237

Tabella 5 - Temperature massime relative ai vari spessori testati

Le temperature massime sono state determinate nel *post-processor* attraverso la creazione di una apposita *expression*: "**maxVal**(Temperature)**@batterywall**".

Dai risultati evidenziati nel diagramma, lo spessore target ottenuto risulta pari a 21 mm, il quale permette di centrare gli obiettivi di progetto.

Per quest'ultimo, si sono ricavati gli andamenti della temperatura media del PCM e della temperatura al centro dell'interfaccia tra batteria e PCM, visibili nei grafici che seguono.

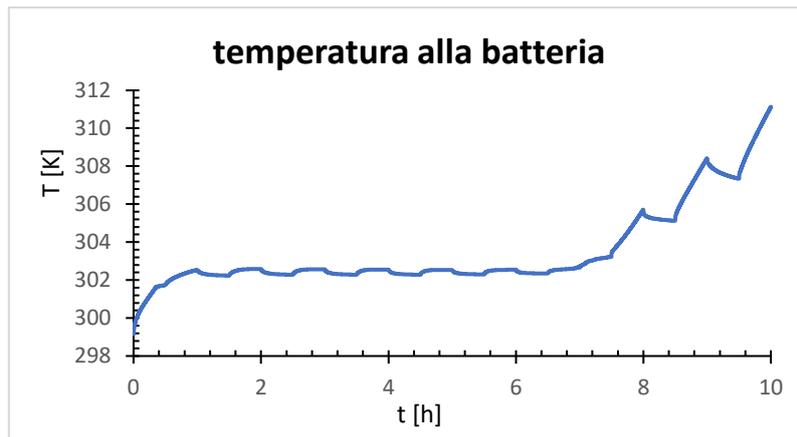


Figura 12

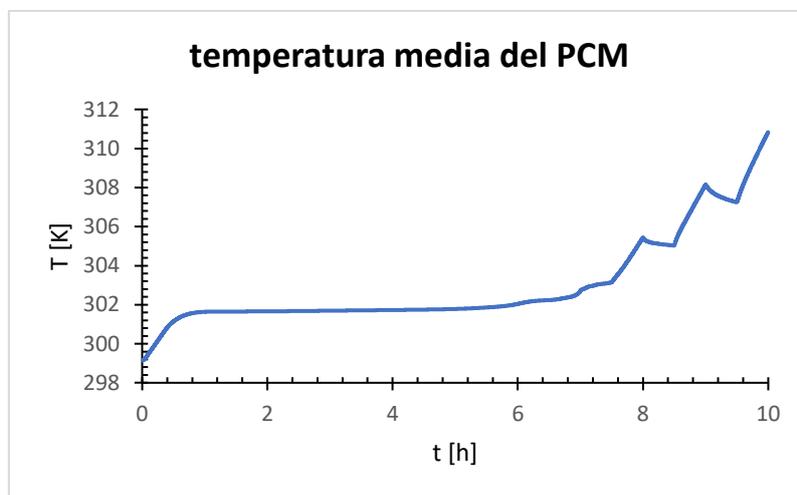


Figura 13

L'andamento di entrambe le temperature, oltre un certo numero di cicli, risulta aumentare significativamente: ciò dimostra come la progressiva fusione del PCM renda meno efficace il controllo della temperatura al protrarsi del tempo di funzionamento della batteria. Infatti, con la progressiva diminuzione della frazione solida si riduce il volume in grado di assorbire calore latente di fusione, perciò la temperatura del sistema andrà gradualmente aumentando. La segmentazione dell'andamento della curva, inoltre, è imputabile ai diversi valori del flusso termico assegnati ai cicli di carica e scarica.

Le evoluzioni nel tempo della frazione liquida e della temperatura del PCM vengono visualizzate nei *contours* seguenti:

contours s=21mm PCM:

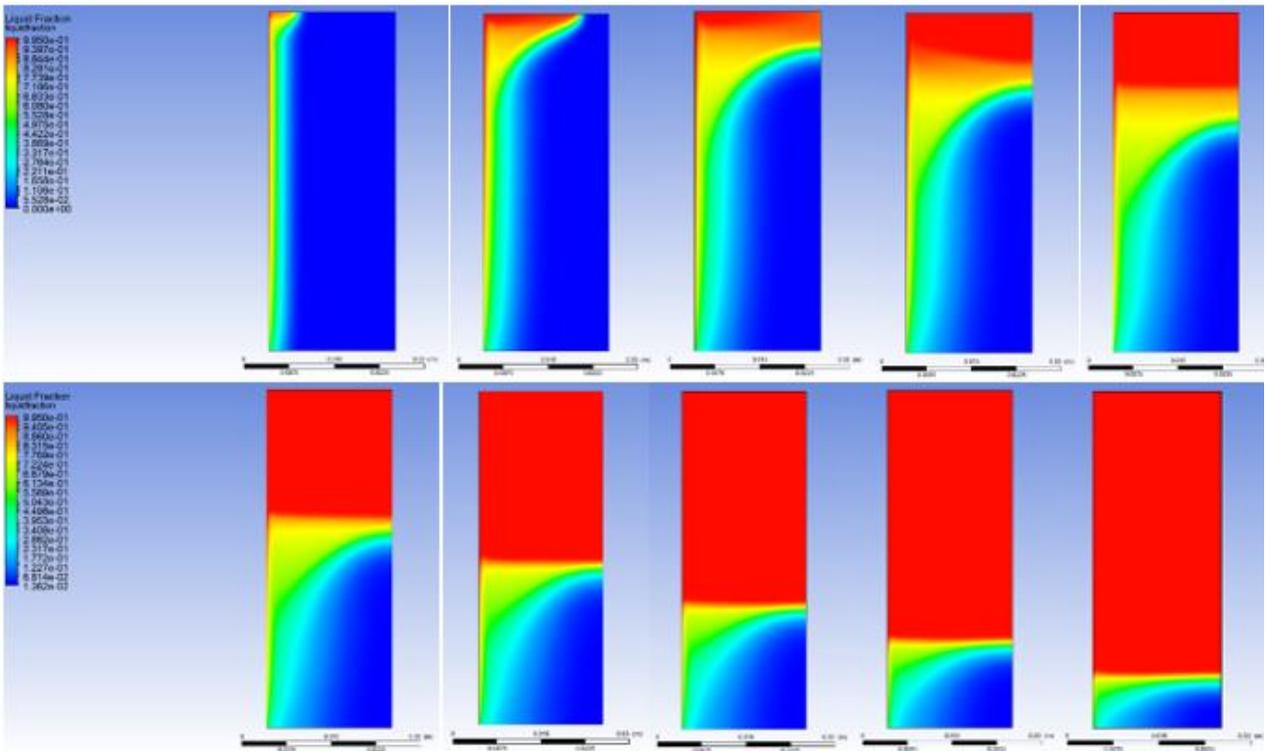


Figura 14 - Evoluzione della frazione liquida

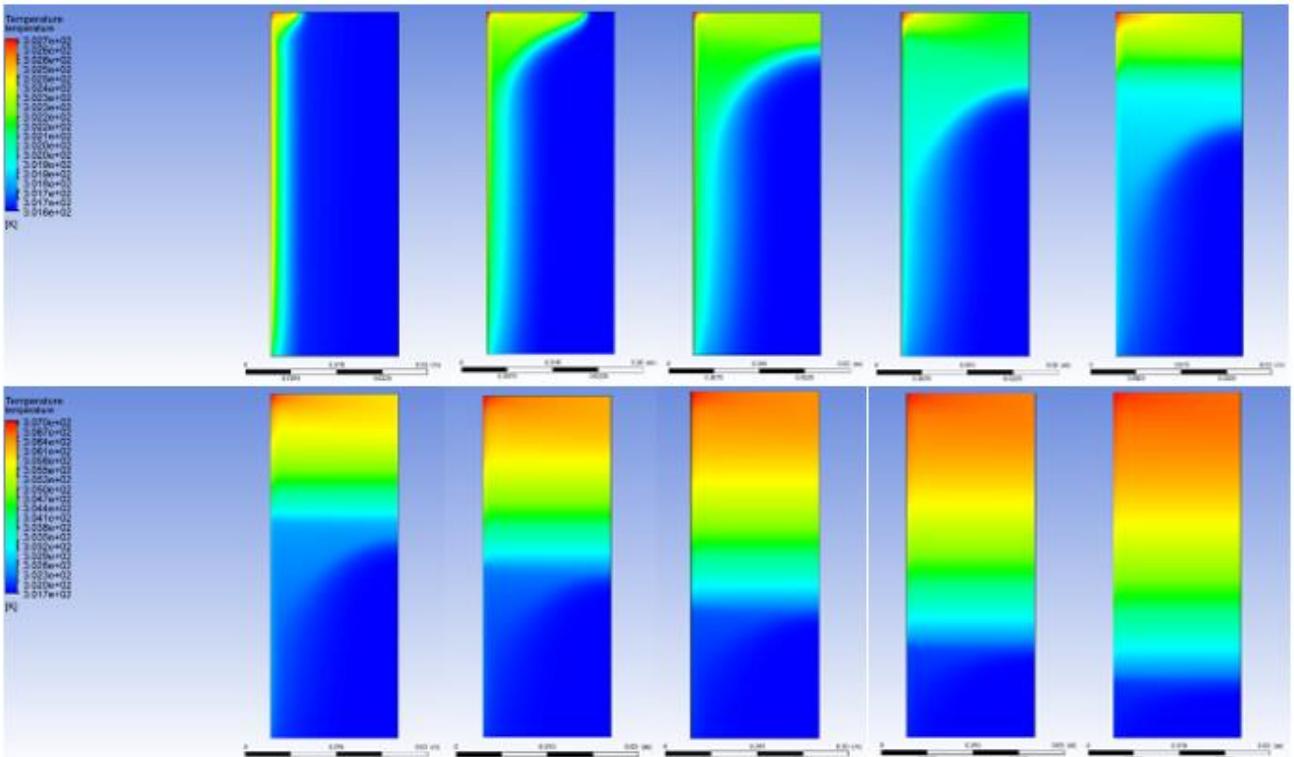


Figura 15 - Evoluzione della temperatura

La differenza di densità tra solido e frazione liquida fa sì che quest'ultima si concentri nella parte superiore del volume di PCM e di conseguenza anche le temperature più elevate si rilevino nella medesima zona.

In accordo con i dati ottenuti in *Tabella 6*, si rappresentano inoltre le evoluzioni delle frazioni liquide relative ai vari spessori di PCM analizzati.

contours s=10mm PCM:

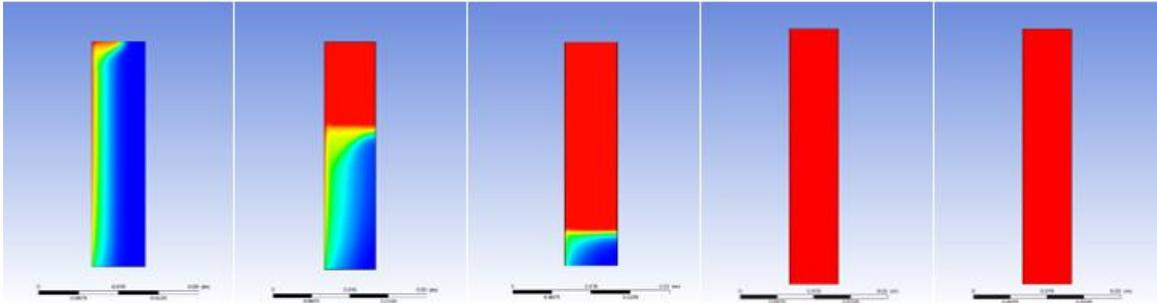


Figura 16 - Spessore 10 mm, ciclo: 1,3,5,7,9.

contours s=18mm PCM:

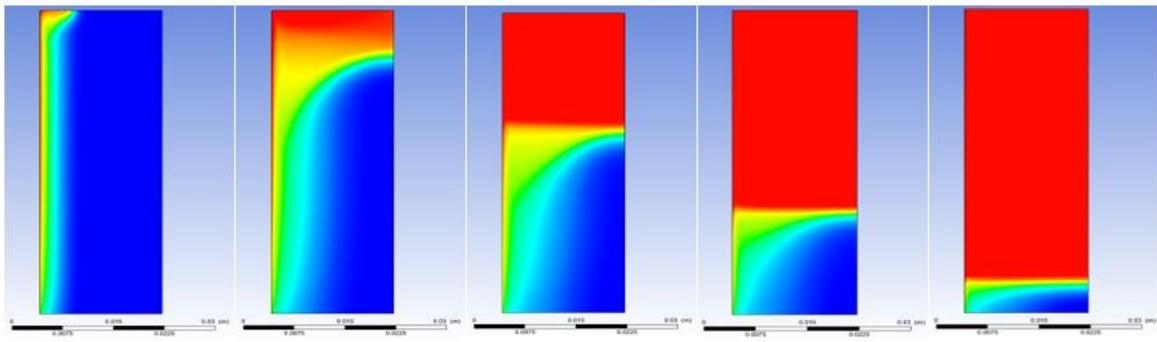


Figura 17 - Spessore 18 mm, ciclo: 1,3,5,7,9

contours s=20mm PCM:

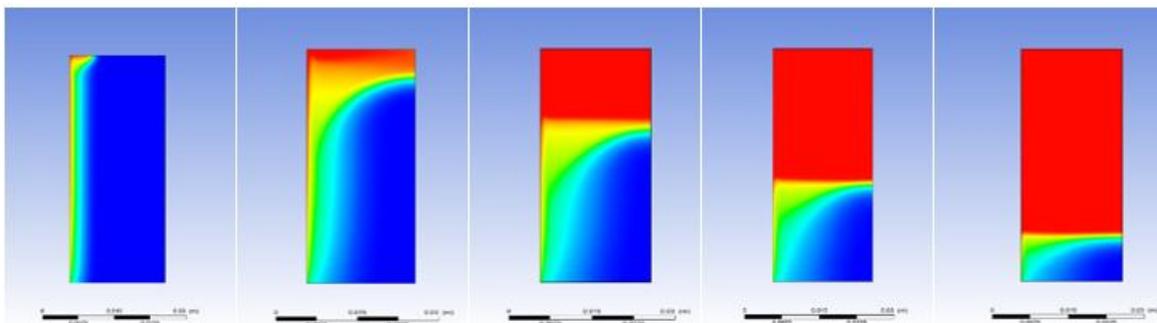


Figura 18 - Spessore 20 mm, ciclo: 1,3,5,7,9

contours s=23mm PCM:

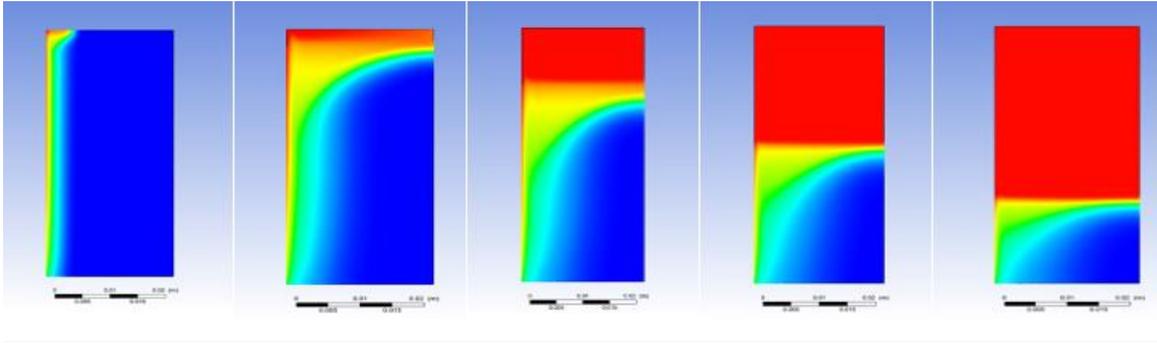


Figura 19 - Spessore 23 mm, ciclo: 1,3,5,7,9

Transient Table

Al fine di automatizzare la procedura di calcolo del modello che, di fatto, presenta delle condizioni al contorno tempo varianti (e cioè un flusso termico pari a $50 \text{ [W/m}^2\text{]}$ che agisce per trenta minuti, seguito da un secondo flusso termico di $175 \text{ [W/m}^2\text{]}$ agente per i restanti trenta minuti) con l'obiettivo di simulare lo scambio termico di carica e di scarica, è stato fatto ricorso alla *Transient Table*, un semplice file di testo letto dal software Fluent, che permette di variare le condizioni al contorno al variare del tempo.

Tale strumento, la cui utilità non è quindi relegata alla prova in esame, ha permesso di semplificare l'input di calcolo, evitando la necessità di rilanciare la simulazione una volta terminati i trenta minuti.

```
flusso 2 36000 1
time heat
1      50
2      50
3      50
4      50
5      50
6      50
7      50
8      50
9      50
10     50
11     50
12     50
```

Figura 20 - Esempio utilizzo della Transient Table

Come è possibile osservare in *Figura 12*, la prima riga della *Transient Table* indica il numero di variabili di interesse (temperatura e flusso termico), il tempo totale di simulazione (10 cicli di carica-scarica), e periodicità (1) o non periodicità (0) dei valori riportati.

La seconda riga è costituita dalla denominazione della condizione al contorno e dalla variabile temporale di riferimento (espresso in secondi), seguono le colonne contenenti i relativi dati.

6. CONCLUSIONI

In primo luogo è stato determinato il flusso termico caratteristico della batteria in esame in fase di carica e scarica, in accordo con i risultati ottenuti in via sperimentale.

I dati di laboratorio fanno riferimento ad una geometria costituita da un parallelepipedo avente spessore di 4 mm, ove la batteria era a diretto contatto con il PCM.

L'obiettivo del caso studio è stato quello di mantenere al di sotto dei 45 °C la temperatura massima della batteria per una durata di 10 ore ed evitare la completa fusione del materiale a cambiamento di fase.

Per fare ciò si è ricorso ad un procedimento iterativo, dal quale simulando vari spessori di PCM si è ottenuto come risultato una geometria di 21 mm di larghezza.

Le condizioni al contorno imposte corrispondono ad una situazione di esercizio alquanto gravosa, infatti le pareti del *case* risultano adiabatiche verso l'esterno.

Le elevate differenze di temperatura del PCM lungo l'altezza del *case* (sino a circa dieci gradi Celsius) dovute alla variazione di densità in fase di riscaldamento ed evidenziati dai *contours* di temperatura precedenti potrebbero ad analizzare soluzioni alternative circa la geometria, prevedendo un maggiore quantitativo di PCM nell'intorno delle zone soggette alle temperature più elevate.

In particolare, si è svolto un confronto diretto tra la geometria rettangolare iniziale (di spessore efficace individuato precedentemente e pari a 21 millimetri) ed una geometria trapezoidale avente un volume di PCM equivalente alla prima.

Si noti dalla *Figura 13*, che rappresenta schematicamente la geometria alternativa testata, lo sviluppo del materiale verso la zona soggetta ad un più rapido riscaldamento.

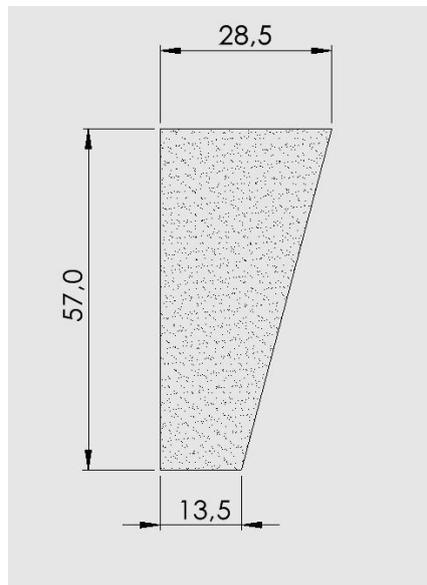


Figura 13 - Geometria alternativa con dimensioni espresse in mm

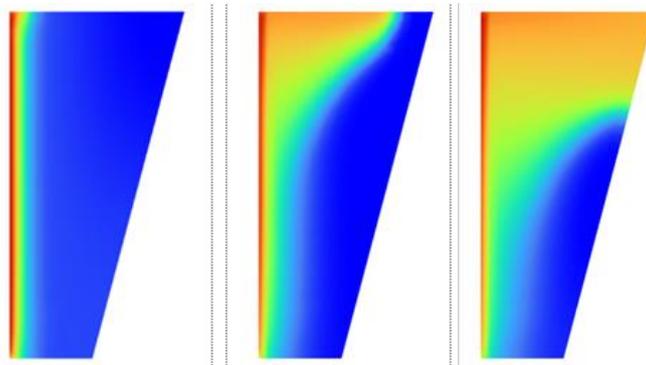


Figura 14 - Contour di temperatura geometria alternativa ciclo: 1, 3, 5

Si osservi, come dimostrato dai *contours* in *Figura 14*, l'aumento della temperatura maggiormente critico nella parte superiore del *case*.

Di seguito, in *Figura 15*, vengono riportati gli andamenti risultanti dalla simulazione.

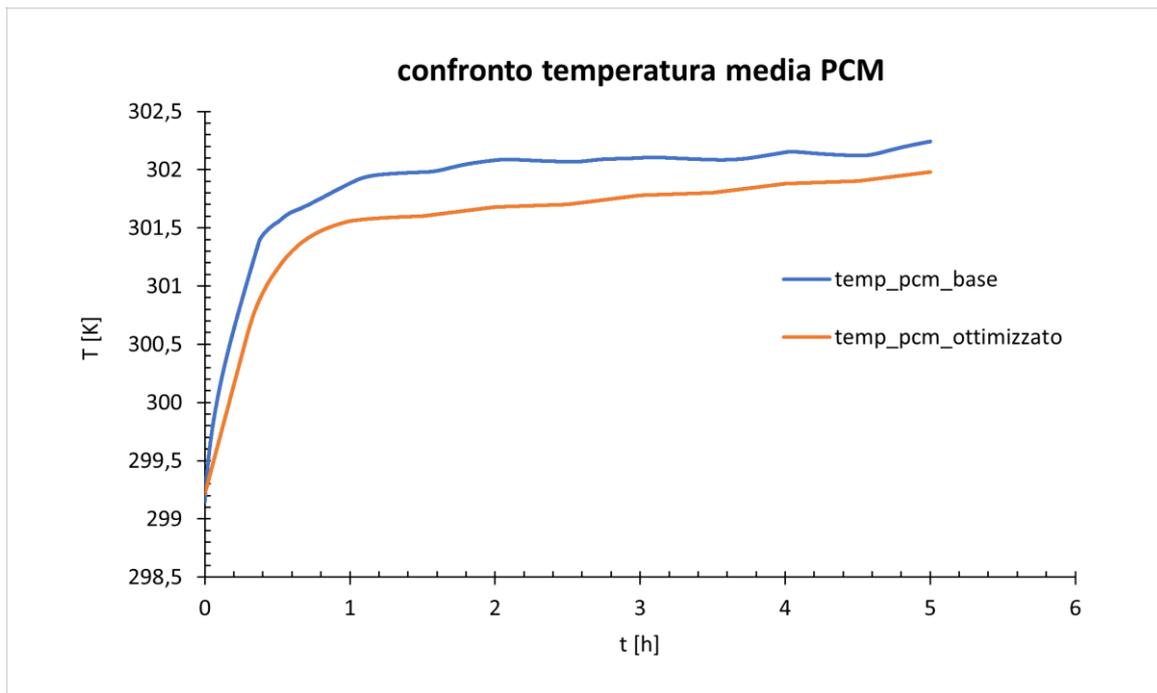


Figura 15 - Grafico di confronto tra temperature

Si noti come la curva di temperatura media del PCM corrispondente alla geometria base si discosta da quelle della geometria alternativa, evidenziando una migliore efficacia di quest'ultima nel controllo della temperatura del sistema per un tempo superiore.

La flessibilità che caratterizza la stampa additiva rende possibile l'adozione di tale geometria ottimizzata, la quale garantisce un marginale miglioramento delle prestazioni di controllo sulle variabili termiche, mantenendo inalterata la complessità costruttiva del *case* rispetto a quello iniziale.

7. NOMENCLATURA

A_{mush} costante relativa alla mushy zone ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$)
c_p specific heat ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
g accelerazione gravitazionale (m s^{-2})
H entalpia (J kg^{-1})
h_{ref} entalpia di riferimento (J kg^{-1})
β coefficiente di espansione termica (K^{-1})
γ liquid fraction (-)
ρ densità (kg m^{-3})
ρ₀ costante di densità (kg m^{-3})
T temperatura (K)

T_{liquidus} temperatura del liquidus (K)
T_{ref} temperature di riferimento (K)
T_{solidus} temperatura del solidus (K)
V velocità (m s^{-1})
k conducibilità termica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
L calore latente di fusione (J kg^{-1})
p pressione (kPa)
S source term ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-2}$)
τ tensore delle tensioni (Pa)

8. BIBLIOGRAFIA

Dario GUARDA, Michele CALATI, William DELGADO, Stefano LANDINI, Remo WASE, Anastasia STAMATIOU, Tadhg, , O' Donovan, Simone MANCIN - Numerical study of PCM based TMS for Li-Ion cells (PAPER ID: 2116 DOI: 10.18462/iir.PCM.2021.2116).

S. Landini , W. Delgado-Diaz , R. Ravotti , R. Waser, A. Stamatiou, J. Worlitschek , T. S. O'Donovan - Effect of geometry and thermal mass of Direct-Metal-Laser-Sintered aluminium Heat Exchangers filled with phase change materials on Lithium-Ion cells' passive cooling

S. Landini, R. Waser, A. Stamatiou, R. Ravotti, J. Worlitschek, T.S. O'Donovan - Passive cooling of Li-Ion cells with direct-metal-laser-sintered aluminium heat exchangers filled with phase change materials

S. Landini, J. Leworthy, T.S. O'Donovan - A Review of Phase Change Materials for the Thermal Management and Isothermalisation of Lithium-Ion Cell

Images used courtesy of ANSYS, Inc.