

# POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica**

**Tesi di Laurea Magistrale**

## **Modellazione termica di un modulo batteria per veicoli elettrici**



**Relatore**

Prof. Andrea Tonoli

**Tutor aziendale**

Fabrizio Impinna

**Studente**

Davide Vallorani

Anno Accademico 2019/2020



# Indice

<b>Introduzione</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Stato dell'arte</b> .....	<b>9</b>
1.1 Soluzioni di utilizzo di una batteria in campo automotive .....	9
1.1.1 Tecnologia HEV .....	10
1.1.2 Tecnologia EV .....	11
1.2 Batteria al litio polimero: struttura e funzionamento .....	12
1.3 Sistemi di raffreddamento di un pacco batteria .....	15
1.3.1 Raffreddamento ad aria .....	15
1.3.2 Raffreddamento a liquido .....	17
1.3.3 PCM (Phase Change Materials) .....	19
<b>2 Analisi del modello del modulo</b> .....	<b>22</b>
2.1 Modello elettrico del pacco batteria FLAG-ms .....	22
2.2 Modello termico del modulo .....	28
2.3 Ipotesi semplificative della simulazione .....	30
2.4 Ipotesi semplificative del modello geometrico .....	31
2.4.1 Geometria della cella .....	31
2.4.2 Geometria del modulo .....	34
2.5 Ipotesi semplificative della resistenza elettrica .....	36
<b>3 Condizioni iniziali e parametrizzazione dei modelli simulati</b> .....	<b>37</b>
3.1 Prove nei modelli ed elaborazione dei dati sperimentali .....	39
3.2 Proprietà termiche dei materiali degli elementi del modulo .....	40
3.2.1 Materiali della singola cella .....	40
3.2.2 Materiali del case del modulo .....	41
3.3 Condizioni al contorno della convezione .....	43
3.4 Condizioni iniziali di temperatura del modulo e potenza termica della cella .....	45
3.5 Fisica del cooling e condizioni iniziali di temperatura .....	48

<b>4</b>	<b>Simulazione del modulo FLAG-ms .....</b>	<b>52</b>
4.1	Metodo di rilevamento delle temperature.....	52
4.2	Risultati e validazione del modello .....	54
4.2.1	Risultati della prova 1C a temperatura iniziale di 25°C.....	54
4.2.2	Risultati della prova 2C a temperatura iniziale di 40°C.....	58
4.2.3	Risultati prova di scarica 3C a temperatura iniziale di 25°C.....	61
<b>5</b>	<b>Modelli alternativi di disposizione delle celle .....</b>	<b>65</b>
5.1	Modello alternativo del modulo batteria A .....	65
5.1.1	Risultati della prova 1C a temperatura iniziale di 25°C.....	67
5.1.2	Risultati della prova 2C a temperatura iniziale di 40°C.....	69
5.2	Modello alternativo B del modulo batteria .....	72
5.2.1	Risultati della prova 1C a temperatura iniziale di 25°C.....	74
5.2.2	Risultati della prova 2C a temperatura iniziale di 40°C.....	76
5.3	Analisi comparativa dei modelli.....	78
<b>6</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri .....</b>	<b>81</b>



## **Introduzione**

Lo scopo di questa tesi è quello di simulare un sistema multifisico, con l'ausilio del software COMSOL Multiphysics, realizzando l'analisi termica di un modulo batteria composto da celle litio-polimero, sulla base di profili di correnti sperimentali raccolti dai test condotti su un pacco batteria progettato dall'azienda FLAG-ms. I risultati delle simulazioni sono stati poi confrontati con le temperature sperimentali di uno dei nove moduli di cui è composto lo stesso pacco.

Nella seconda parte dello studio sono proposte due alternative al modulo originario che si diversificano da quest'ultimo nell'assemblamento strutturale delle celle all'interno del modulo. L'obiettivo è quello di sviluppare una miglior dissipazione del calore a parità di potenza termica generata dalle celle. Le condizioni iniziali, le ipotesi semplificative e le condizioni al contorno sono mantenute invariate rispetto al primo modello.

Per questo studio sono stati utilizzati il software Matlab per l'estrapolazione dei dati e il foglio di calcolo Microsoft Excel per l'elaborazione, mentre per la progettazione dei modelli 3D da simulare il software Solidworks.

Nel primo capitolo sono descritti gli impieghi più comuni nell'industria automotive di queste batterie al litio polimero, la composizione chimica, le reazioni elettrochimiche ed infine viene presentata una panoramica sui dispositivi di raffreddamento più usati su un pacco batteria.

Nel secondo capitolo viene trattata l'analisi del modello del modulo, a partire dalla sua configurazione elettrica, descrivendo poi le equazioni alla base dell'analisi termica della cella, e le ipotesi semplificative adottate nella simulazione rispetto al modulo considerato.

Nel terzo capitolo sono descritte le condizioni iniziali delle prove condotte e una panoramica dei parametri impostati nella simulazione e delle condizioni al contorno del modello. Nell'ultimo paragrafo viene descritta la fisica e le ipotesi semplificative del cooling plate.

Nel quarto capitolo vengono mostrati i risultati della prova simulata del modulo e confrontati con le temperature rilevate sperimentalmente nelle diverse condizioni di prova a carica 1C,2C e scarica a 3C.

Nel quinto capitolo vengono descritti i due moduli alternativi e i risultati delle prove condotte a carica 1C e 2C. Nel dettaglio i due modelli sono analizzati nella nuova geometria e nelle varianti di assemblaggio delle celle. I risultati sono poi confrontati con le temperature simulate del modulo

FLAG-ms, in modo da analizzare il comportamento termico dei due moduli realizzati a seguito di design review.

Nell'ultimo capitolo sono redatte le conclusioni delle simulazioni dei tre modelli, con possibili sviluppi e miglioramenti futuri dello studio.



# Capitolo 1

## Stato dell'arte

In questo primo capitolo saranno descritti le alimentazioni HEV e EV nel campo automotive, la struttura, la composizione e l'elettrochimica della cella litio-polimero utilizzate nel modulo batteria studiato e i metodi di raffreddamento delle batterie più utilizzati.

### 1.1 Soluzioni di utilizzo di una batteria in campo automotive

L'intento di questa tesi, come redatto nell'introduzione, è quello di svolgere l'analisi termica di un modulo di un pacco batteria in ambito automotive.

Oggi i veicoli elettrici vengono utilizzati come alternativa sempre più diffusa a quelli con motore a combustione, con vantaggi evidenti in termini di durata e affidabilità, sia per uso urbano che extraurbano. Le numerose novità introdotte negli anni, ad esempio la frenata rigenerativa e i sistemi di stop and start, hanno permesso un costante miglioramento delle prestazioni. I vantaggi dei motori elettrici sono molteplici: dalla riduzione dell'inquinamento atmosferico al ritorno economico a livello di consumi.

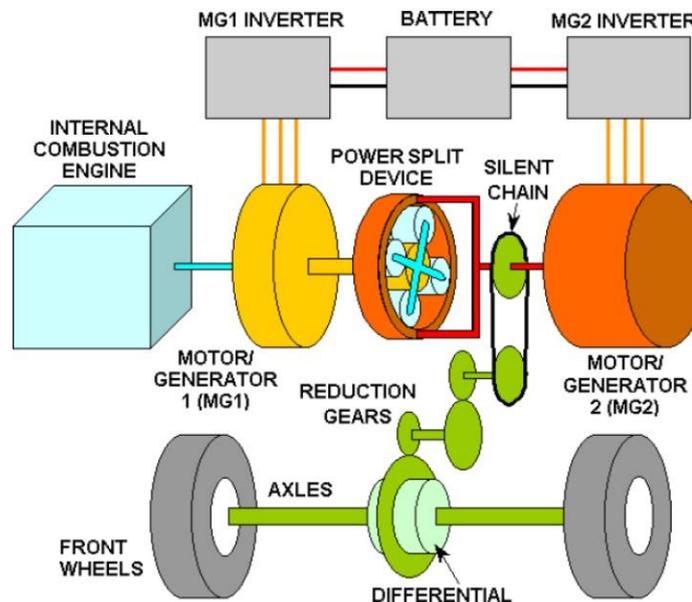
In questo paragrafo faremo una breve panoramica degli utilizzi di una batteria in campo automotive. L'impiego di un pacco batteria può essere sintetizzato in 4 macro-utilizzi: i primi 3 in funzione di supporto all'alimentazione a combustione e, nel caso del full electric, come fonte di energia primaria.

#### 1.1.1 Tecnologia HEV

Nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi tipi di soluzione in termini di propulsione ibrida riassumibili in 3 configurazioni: ibrido serie, ibrido parallelo, ibrido misto o complesso.

- **Ibrido serie:** Nell'ibrido serie il rapporto tra motore a combustione e motore elettrico permette al primo di alimentare il secondo mediante la generazione di corrente, immagazzinando energia in eccesso nella batteria. Nei momenti di maggior necessità, il motore elettrico potrà attingere potenza sia dalla batteria sia dal motore termico.
- **Ibrido parallelo:** è la configurazione grazie alla quale il veicolo può sfruttare in moto alternativo sia l'apporto del motore termico sia quello del motore elettrico, a seconda dell'utilizzo e della richiesta del veicolo.

- **L'ibrido misto o complesso** è composto da un motore termico e due motori/generatori elettrici, ma non può essere associato né a un sistema serie o parallelo.



**Figura 1.1.** Powertrain del sistema ibrido complesso di una Toyota Prius[10]

In figura 1.1 si possono notare i motori/generatori 1 e 2, con il primo predisposto alla funzione start e stop del motore a combustione e alla conversione di energia elettrica, mentre il secondo fornisce energia di trazione coadiuvata se necessario dal motore termico[10].

Alla partenza del veicolo, è la batteria a fornire la potenza al motore elettrico 2, mentre il motore termico resta spento. Al contrario in fase di normale trazione il motore termico alimenta sia le ruote in maniera diretta che il motore elettrico 1, che a sua volta trasferisce energia al motore elettrico 2, che infine fornisce potenza aggiuntiva a quella del motore termico.

In fase di frenata rigenerativa la batteria viene ricaricata dall'energia proveniente dalle ruote e fornita dal motore elettrico 2, ora in funzione di generatore.

Il sistema ibrido complesso resta ad oggi uno dei sistemi più utilizzati in alternativa al solo motore a combustione, caratterizzati da un'ottima affidabilità e versatilità.

### 1.1.2 Tecnologia EV

L'impiego di pacchi batteria in veicoli full electric sfrutta l'energia accumulata nella batteria a seguito della carica da rete elettrica, ed è caratterizzato da un processo di scarica conseguente al suo impiego. Entrambe le fasi di carica e scarica sono gestite da un sistema chiamato BMS (Battery

Management System) che ha il compito di monitorare, in entrambe le fasi, le specifiche relative a temperatura, corrente e tensione. [19]



**Figura 1.1.** Schema powertrain di un veicolo elettrico [20]

Il sistema powertrain di un veicolo elettrico si compone di un motore elettrico, alimentato dalla batteria, e di un convertitore di tensione (inverter) che converte la corrente continua della batteria in alternata, in ingresso al motore. Le peculiarità di un veicolo EV sono le emissioni zero, il recupero di energia mediante l'utilizzo di sistemi quali il KERS e l'ERS, e l'affidabilità derivante dalla componentistica elettrica ed elettronica.

L'autonomia di una batteria può variare in funzione dell'impiego, ciclo urbano o extraurbano, e in funzione delle condizioni ambientali esterne.

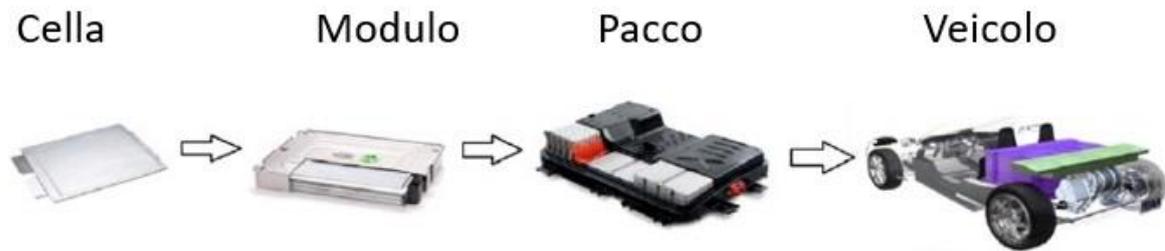
Temperatura ambientale	Riduzione dell'autonomia rispetto a 25°C
Temperatura ambientale -6.6°C	12%
Temperatura ambientale 35°C	4%

**Tabella 1.1.** Variazione dell'autonomia in funzione delle temperature[21]

Naturalmente questi dati non sono assoluti ma relazionati alle tipologie e alla chimica delle celle che vanno a comporre il pacco batteria. Nel seguente paragrafo sarà descritta la tipologia e il funzionamento della cella analizzata nel modulo batteria oggetto di questo lavoro di tesi.

## 1.2 Batteria al litio polimero: struttura e funzionamento

La batteria è un dispositivo in grado di immagazzinare energia elettrochimica che rilascia nel momento in cui deve generare una corrente di alimentazione. Un pacco batteria, utilizzato nell'industria automotive, non è altro che l'unione di entità base, le celle, tramite collegamenti dettati dalla configurazione elettrica scelta.



**Figura 1.2.** Linea di struttura di un pacco batteria[22]

Le celle utilizzate dall'azienda FLAG-ms per progettare il pacco batteria sono dette pouch o a sacchetto, e si sono impostate sul mercato verso la fine degli anni '90. Questa nuova tipologia di celle rappresentava una grande novità se confrontato con le altre, quali le cilindriche a bottone e le prismatiche. [23]



**Figura 1.3.** Pouch cell Kokam [24]

Le celle pouch si caratterizzano per avere una buona risposta in termini di affidabilità per alte correnti di scarica e un comportamento migliore quando sono sottoposte ad una carica minore.

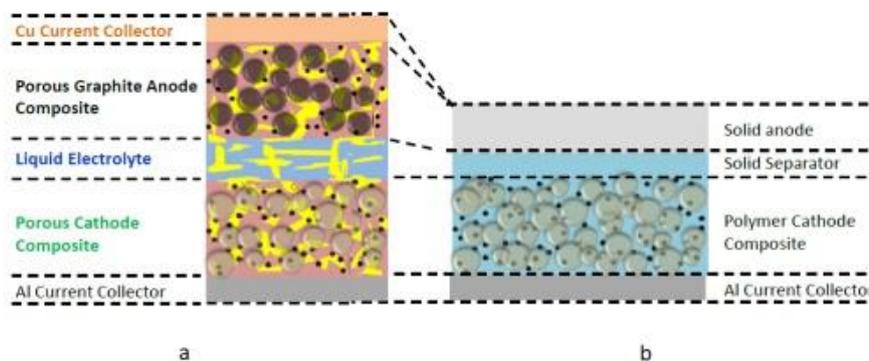
Il loro maggior pregio sta nell'efficienza di utilizzo dello spazio poiché, tra le diverse celle precedentemente menzionate, la cella pouch limita gli spazi di assemblamento all'interno del modulo.[5]

Tuttavia, le maggiori problematiche si riscontrano nell'affidabilità in seguito a numerosi cicli di carica/scarica, che causano la formazione di gas all'interno della cella, definendo quindi una criticità dal punto di vista meccanico. Questo problema viene risolto dai progettisti nel momento in cui si passa alla fase di "impacchettamento" delle celle, ovvero nel momento in cui si va ad accorpare più unità all'interno del modulo. Ad esempio, nel modulo studiato, vedremo come tra una cella e l'altra venga inserito un sottile foglio di poron, un materiale elastomerico capace di assorbire l'espansione gassosa delle celle.

Dopo aver effettuato un'analisi strutturale della pouch cell, andiamo a studiare la composizione interna e la chimica di un accumulatore litio polimero o, nel suo nome abbreviato, Li-Poly.

La differenza principale con le maggiormente diffuse batterie in litio sta nel fatto che nelle litio-ione-polimero l'elettrolita in sale di litio si trova all'interno di un polimero solido e non all'interno di un solvente organico. Questa caratteristica risulta importante ai fini del funzionamento: questo tipo di batterie hanno un alto rischio di infiammabilità rispetto a quelle a ioni di litio, poiché composte da materiale polimerico.

Per quanto concerne la struttura con cui è progettata, la Li-Poly si differenzia dalle batterie a ioni di litio perché composta da una struttura di laminati polimerici. La cella ha una struttura interna di elettrodi in alternanza separati da fogli dielettrici, che mostrano un buon funzionamento senza il bisogno di essere pressati perché inglobati l'uno nell'altro.



**Figura 1.4.** Confronto tra cella a ioni di litio(a) e cella litio-ioni-polimero[5]

È proprio questa peculiarità nella composizione che permette di avere un risparmio di ingombri e peso per quello che riguarda l'alloggiamento delle celle. La capacità con cui riescono a sopperire alla

manca di pressione, avendo già contatto interno tra le varie componenti, consente di non utilizzare sistemi di metallo con la funzione di precarico sulle celle.

Nei primi anni di sviluppo queste celle si caratterizzavano per tempi di carica leggermente superiori a quelli delle celle agli ioni di litio; con il tempo però sono stati migliorati e allineati ai parametri di quest'ultima.

Una problematica, invece, riguarda la fase di corto circuitazione della batteria che, mostrando una resistenza molto bassa (nell'ordine del  $m\Omega$ ), può provocare una corrente impulsiva talmente alta da far esplodere il componente. [6]

Tuttavia, il polimero solido risulta più stabile nel corso dei cicli di carica/scarica della cella, con il risultato di un ciclo vita più lungo della batteria stessa. Grazie a queste caratteristiche, dopo un primo impiego negli anni '90 in ambito militare, sono oggi le più usate in ambito automotive e nella mobilità elettrica in generale.

### 1.3 Sistemi di raffreddamento di un pacco batteria

Dopo aver esaminato la cella in questo capitolo verranno illustrati i metodi di raffreddamento utilizzati nell'automotive, e non solo, per gestire al meglio la temperatura all'interno del pacco, al fine di permettere cicli di carica/scarica della batteria senza perdita di prestazioni.

Il sistema di raffreddamento ha il ruolo di raffreddare il pacco durante i cicli della batteria, ed è progettato e studiato in funzione della tipologia di celle impiegate e della forma del pacco batteria.

Le varie soluzioni proposte negli anni si sono evolute di pari passo con la tecnologia legata alle batterie così da soddisfarne le richieste in termini di dissipazione termica.

Per controllare le temperature del pacco è necessario avere un sistema di raffreddamento adeguato, così da limitarne l'innalzamento. I metodi di raffreddamento esaminati in questo paragrafo sono:

- Raffreddamento ad aria
- Raffreddamento a liquido
- PCM

#### 1.3.1 Raffreddamento ad aria

Il raffreddamento ad aria è, tra quelli elencati, il più vantaggioso per la sua semplicità di progettazione e di componenti; di conseguenza risulta preferibile anche dal punto di vista economico. [3]

Questa tipologia di raffreddamento può avvenire in maniera forzata o naturale, a seconda della necessità della batteria, premettendo che il primo caso avrà maggiore effetto rispetto al secondo.[25]

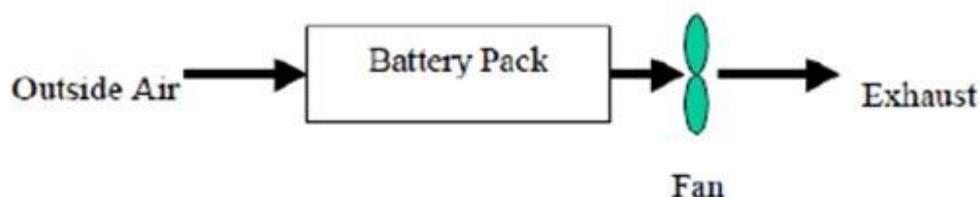
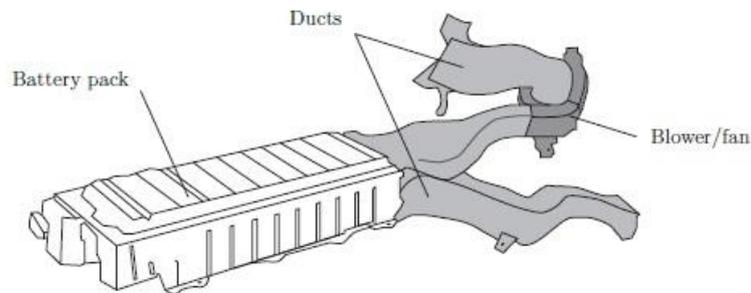


Figura 1.5. Cooling passivo con ventilazione esterna[3]

L'aria ventilata proveniente dall'esterno va ad impattare sulle pareti del modulo imponendo un delta termico che andrà a raffreddare l'intero pacco batteria. Come è facilmente intuibile, l'aria in ingresso

sarà a temperatura ambiente ma, avanzando tra i moduli, ci sarà un aumento della temperatura, mentre l'efficienza del raffreddamento tenderà a scendere.

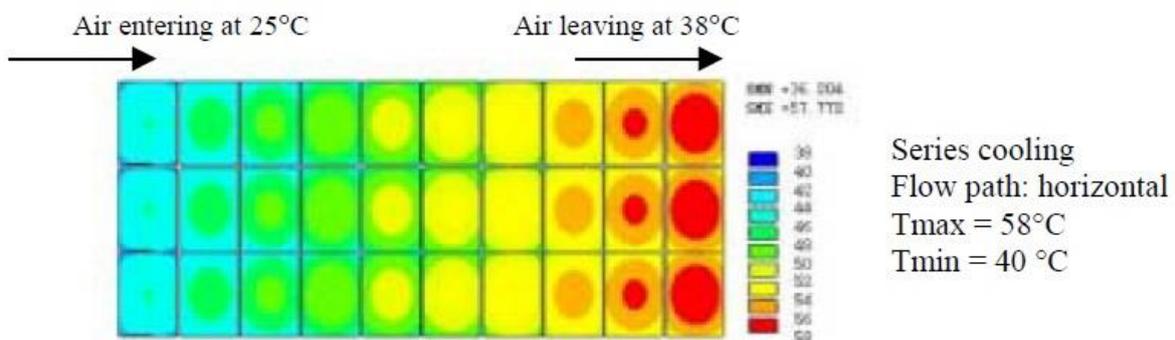


**Figura 1.6.** Sistema di raffreddamento ad aria Toyota Prius [30]

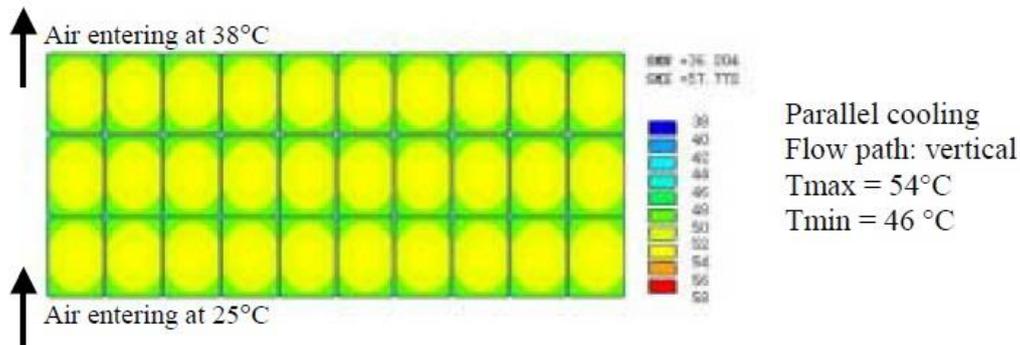
Il raffreddamento ad aria, sia esso forzato o naturale, può essere progettato in due configurazioni:

- Raffreddamento serie
- Raffreddamento parallelo

Nel primo caso abbiamo una ventilazione proveniente da uno dei lati del pacco che investe i primi moduli di aria fresca ma che, proseguendo verso il lato opposto, provoca un aumento progressivo della temperatura, a causa del passaggio tra i moduli con temperatura crescente. Avremo perciò un ottimo raffreddamento per i primi moduli ma meno prestazionale per quelli sul lato opposto, come è evidente nella figura 1.7(a).



**Figura 1.7(a).** Raffreddamento ad aria in configurazione serie[26]



**Figura 1.7(b).** Raffreddamento ad aria in configurazione parallelo [26]

Nella seconda configurazione il sistema di raffreddamento parallelo prevede il passaggio dell'aria nella direzione indicata in figura 1.7(b), tale per cui il flusso viene equamente diviso le singole serie di moduli. Questa tipologia assicura una distribuzione migliore dell'aria tra i moduli e un raffreddamento uniforme, sebbene tenda ad essere meno efficiente della precedente, che al contrario, riesce a raggiungere una stazionarietà delle temperature in minor tempo rispetto alla soluzione parallela.

In generale, il raffreddamento a liquido, seppur di più facile progettazione, risulta inefficace se si raggiungono temperature maggiori ai 35°C, dove il sistema necessita di una convezione forzata. [3]

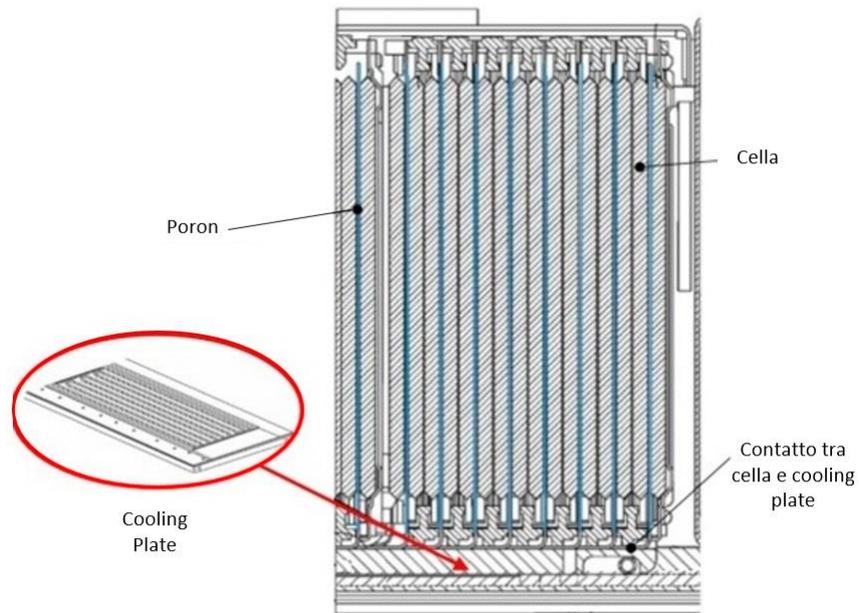
### 1.3.2 Raffreddamento a liquido

Dopo aver esaminato il raffreddamento ad aria analizziamo quello che, per prestazioni e costi, è oggi il metodo più usato per gestire il riscaldamento di una batteria, il raffreddamento a liquido.

Negli anni le case automobilistiche all'avanguardia nello sviluppo di motorizzazioni elettriche hanno adottato diverse soluzioni innovative per adattare il raffreddamento a liquido alle esigenze dei propri veicoli. Tra queste, la FLAG-ms ha optato per l'utilizzo del cooling plate.

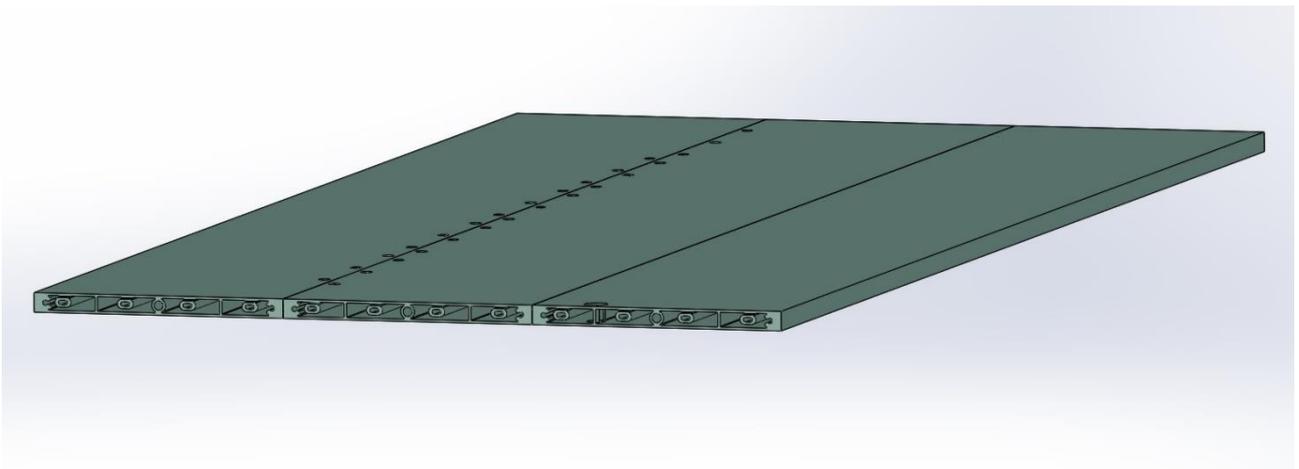
Il cooling plate è una piastra costituita da canali interni, dalle dimensioni dell'area di poche decine di millimetri quadrati, in cui scorre liquido refrigerante (generalmente acqua, acqua e glicole o R134a). Sul piano del cooling poggia l'intero pacco batteria ed e il case che contiene tutti i moduli del pacco, per cui non c'è contatto diretto tra celle e liquido. [1]

Il raffreddamento liquido è decisamente meno ingombrante in termini di volume rispetto a quello ad aria, anche se più costoso, ed è in grado di dissipare calore anche quando il pacco raggiunge temperature molto elevate.



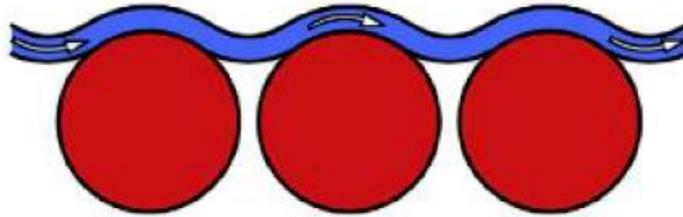
**Figura 1.8.** Vista in sezione di un modulo raffreddato con sistema cooling plate[1]

Il cooling plate di raffreddamento del modulo oggetto di studio di questa tesi è visibile in figura 1.9, ed è stato realizzato per mezzo di un processo di estrusione. Nei canali interni scorre dell'acqua che scambia calore con i moduli appoggiati su di esso. La forma dei canali non è circolare, ma ovalizzata, per ottenere un maggiore scambio termico .



**Figura 1.10.** Piastra di raffreddamento FLAG-ms [28]

Restando nell'ambito dei pacchi batteria per veicoli full electric, varianti del cooling plate appena visto sono, ad esempio, quelle impiegate da Tesla, nelle quali le singole celle cilindriche vengono avvolte da un canale a forma d'onda a diretto contatto con le celle, minimizzando gli spazi e massimizzando il trasferimento di calore all'esterno della cella. [2]



**Figura 1.8.** Celle cilindriche raffreddate da canali a forma d'onda[2]

Seppur simile ad un sistema di raffreddamento diretto, cioè con contatto tra liquido refrigerante e cella su tutta la sua superficie, non è possibile considerarlo tale, poiché solo una parte della cella è a contatto con il canale.

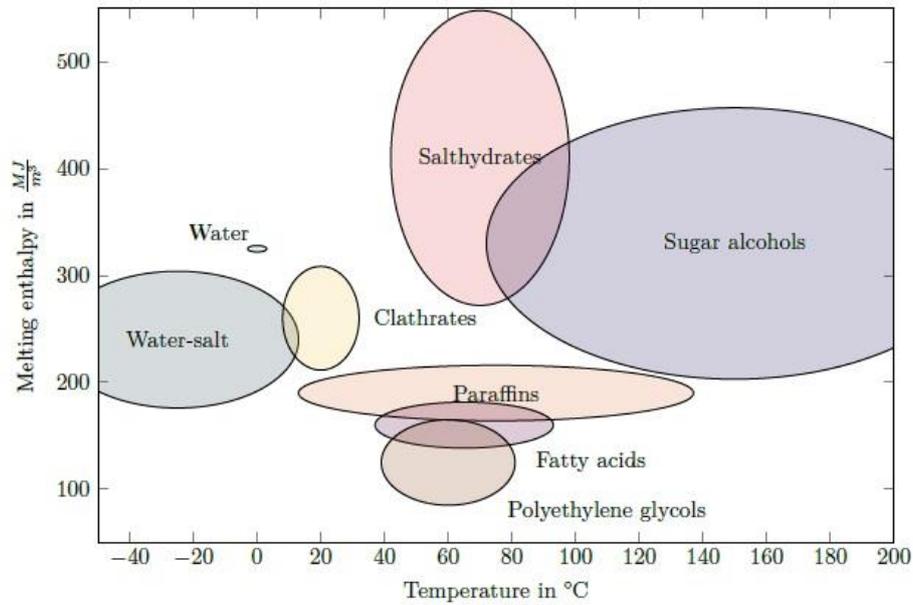
### **1.3.2 PCM (Phase Change Materials)**

I PCM o phase change materials sono materiali che realizzano un raffreddamento passivo sfruttando, come suggerisce il loro nome, un cambiamento di fase per accumulare calore latente e mantenendo costante la loro temperatura. Quando una cella aumenta la sua temperatura durante la ricarica o durante una richiesta di energia, trasferisce il calore generato al materiale PCM interposto tra una cella e l'altra, così da favorire il suo passaggio da solido a liquido. In questo stato finale, il PCM dovrà poi raffreddarsi per tornare al proprio stato solido, quindi viene posto in contatto direttamente con il cooling plate oppure con le pareti del case esterno.

Il cambiamento di fase dei PCM deve attivarsi quando la cella raggiunge una determinata temperatura, per questo motivo è necessario scegliere in maniera oculata il materiale da impiegare per questa tipologia di raffreddamento. I materiali possono essere suddivisi in due categorie: inorganici e organici. [30]

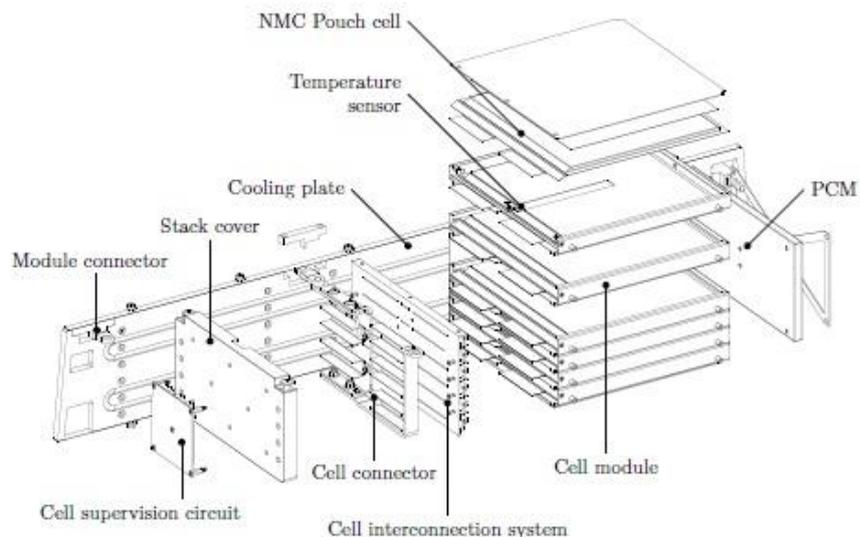
Gli inorganici sono principalmente sali, sali idrati e metalli. Hanno la capacità di immagazzinare un alto quantitativo di calore latente, ma solo ad alte temperature, e sono perciò impiegati in ambito fotovoltaico.

Gli organici sono materiali a base di acidi saturi, cere, glicoli e paraffine. Al contrario dei precedenti, questi riescono a coprire un range di temperature comprese tra i 15°C e i 130°C, permettendo quindi un largo utilizzo nel campo dell'elettrico. [30]. In particolare, le paraffine, per le loro proprietà anticorrosive ed essendo riciclabili, risultano essere il più impiegato tra i materiali organici, considerato anche il loro alto livello di calore latente.



**Figura 1.11.** Range di impiego dei principali PCM in commercio[30]

La paraffina è composta da catene di idrocarburi e presenta un punto di fusione tra i  $44^{\circ}C$  e i  $66^{\circ}C$ , ideale per le temperature raggiunte all'interno di un pacco batteria [31]. Inoltre è di grande rilievo un'altra sua caratteristica, la densità, che si aggira intorno ai  $900Kg/m^3$  a temperatura ambiente, valore che la rende di fatto molto più leggera dell'alluminio, il materiale del cooling plate [32]. La combinazione dei due metodi di raffreddamento determina quindi un'alta efficienza dissipativa del calore in rapporto ad un contenuto aumento del peso all'interno della batteria.



**Figura 1.12.** Modello di raffreddamento cooling plate e PCM[30]

In figura 1.12 è possibile notare come il PCM sia a diretto contatto con un lato delle celle, mentre il secondo lato è appoggiato direttamente su un cooling plate laterale, così che, una volta raggiunto il

punto di fusione ed avere assorbito calore dalla cella, possa tornare alla condizione di stato solido sfruttando il raffreddamento del cooling.

## Capitolo 2

### Analisi del modello del modulo

Prima di esporre una descrizione dettagliata della simulazione che ha portato ad un'analisi termica del modulo batteria, in questo capitolo sono presentate le condizioni iniziali ad essa inerente. Nello specifico saranno descritte la configurazione elettrica del modulo e in generale del pacco batteria, così da valutare la distribuzione delle correnti all'interno delle celle, la struttura del modulo e del cooling plate, e le ipotesi semplificative della simulazione.

#### 2.1 Modello elettrico del pacco batteria FLAG-ms

Le celle di una batteria sono collegate in serie, in parallelo o in combinazione delle due tipologie, per avere la migliore efficienza energetica (in rapporto anche alla loro destinazione d'uso).

Andiamo quindi a fare una distinzione delle caratteristiche tra celle in serie e celle in parallelo. [6]

- **Celle collegate in serie:** La configurazione in serie è realizzata connettendo il polo positivo di una cella con il polo negativo della successiva, rispettando la condizione per cui la capacità sia la stessa per tutte e considerando che la tensione risultante sarà pari alla somma delle tensioni delle singole celle.

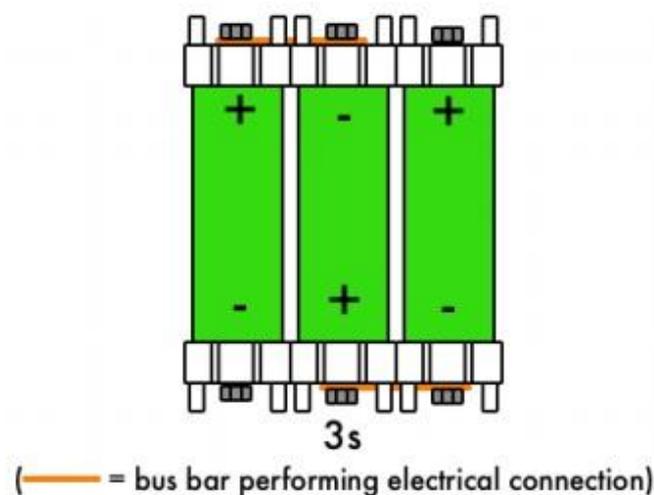
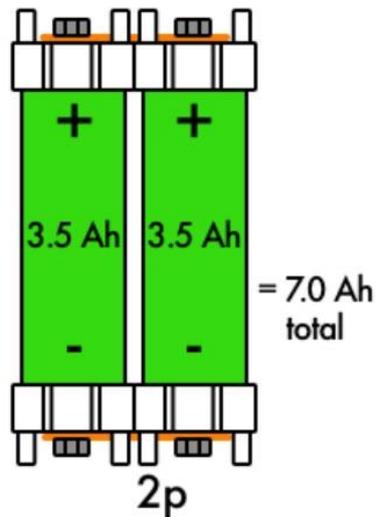


Figura 2.1: Esempio di collegamento in serie di tre celle tramite bus bar[6]

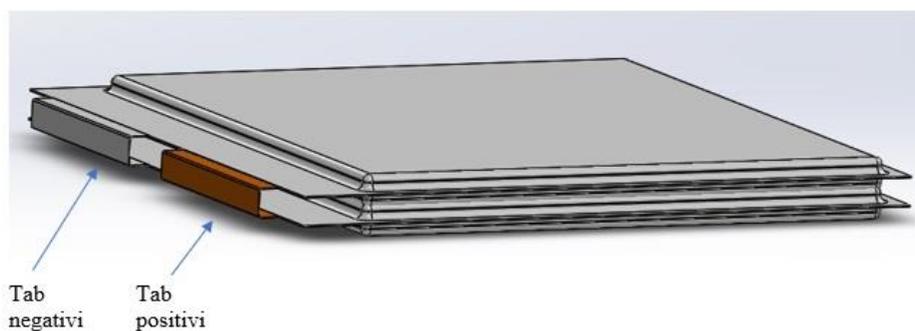
- **Celle collegate in parallelo:** La configurazione in parallelo è realizzata connettendo il terminale positivo di una cella con quello della successiva, con lo stesso ragionamento per quanto riguarda il terminale negativo. A differenza della tipologia precedente, la capacità di ogni coppia di celle in parallelo è la somma della capacità delle singole celle, mentre la corrente in ingresso è dimezzata.



**Figura 2.2:** Esempio di un collegamento in parallelo di una coppia di celle [6]

Il pacco batteria oggetto di analisi è composto da celle collegate in configurazione mista serie-parallelo.

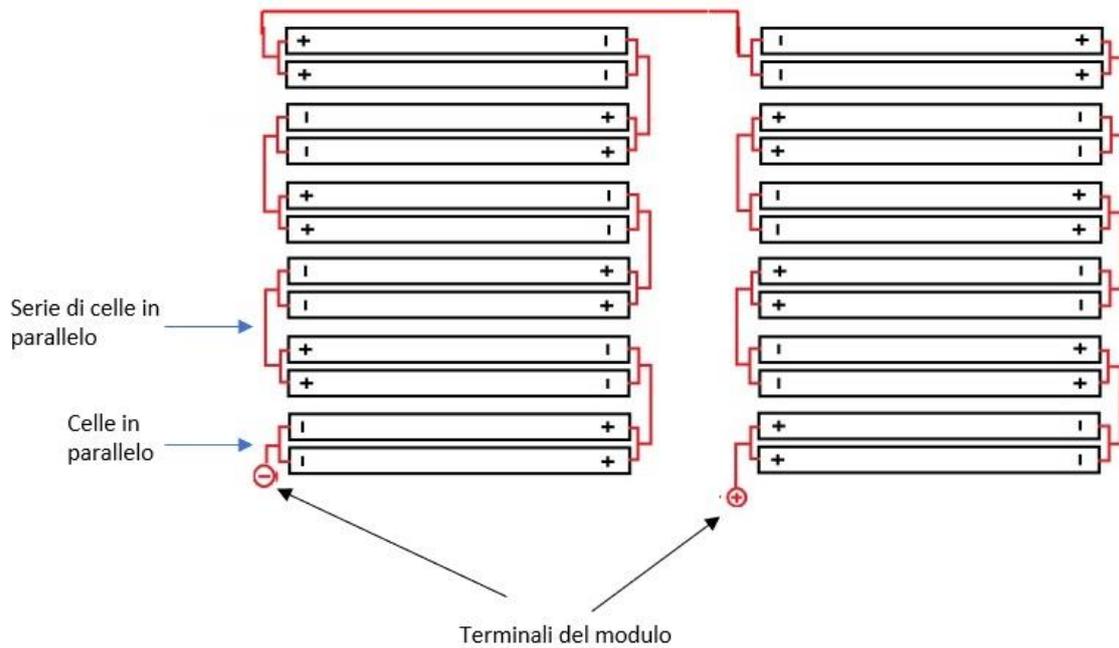
Entrando nel dettaglio, il pacco è costituito da 9 moduli disposti in collegamento serie tra di loro. Ogni modulo è composto da 24 celle parallele tra loro 2 a 2. Come possiamo vedere nella figura 2.3 le celle all'interno della coppia sono collegate in parallelo, mentre ogni coppia è collegata in serie con la successiva, come mostrato nello schema di collegamento in figura 2.4.



**Figura 2.3:** Collegamento in parallelo di una coppia di celle [28]

Sempre nella figura 2.3, si possono notare i collegamenti tra due coppie di celle in parallelo mediante i “tab”, ovvero i terminali delle celle punch, e la disposizione delle celle. La loro compattezza

fornisce una grande flessibilità in fase di progettazione del layout del pacco, favorendo l'uso di minore spazio di alloggiamento all'interno della vettura.



**Figura 2.4:** Schema di collegamento elettrico all'interno del modulo FLAG-ms

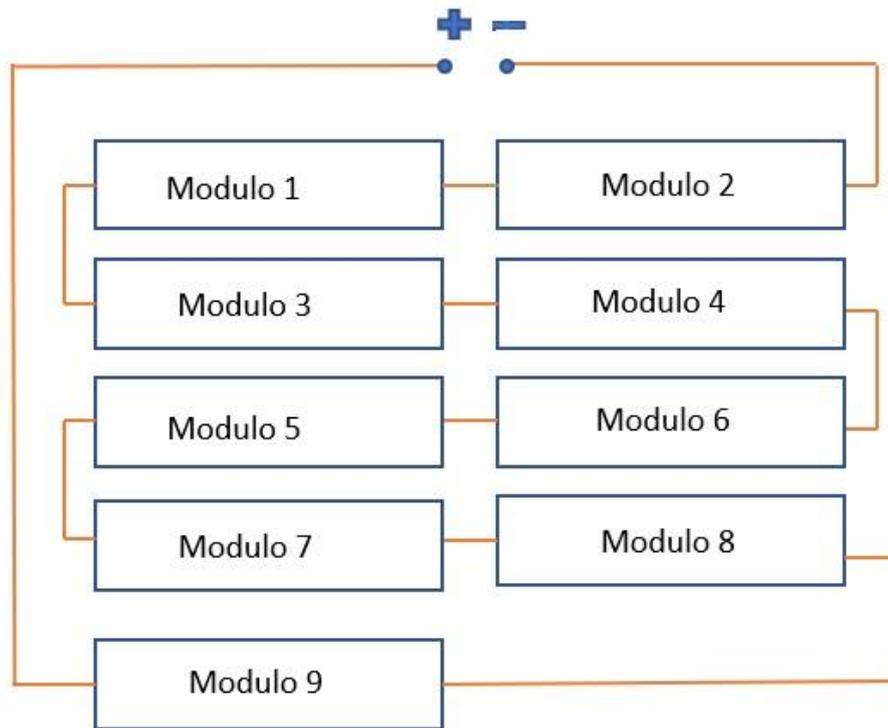
Come menzionato all'inizio del paragrafo, le celle di queste combinazioni sono raggruppate in moduli, anch'essi in collegamento serie, che andranno a strutturare il pacco batteria finale.



**Figura 2.5:** Pacco batteria FLAG-ms composto da 9 moduli in serie

La disposizione dei moduli è in configurazione elettrica serie, per cui avremo che il passaggio della corrente all'interno di ogni modulo sarà la stessa.

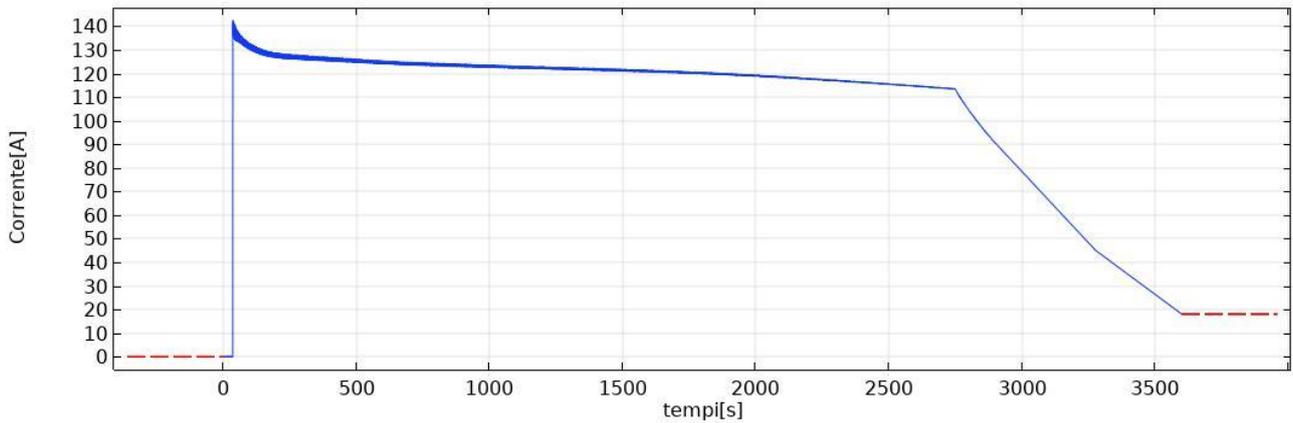
A seguito di ciò avremo che il calore generato all'interno delle celle per effetto Joule, che avrà dipendenza diretta dalla corrente, sarà lo stesso per ogni modulo del pacco. Per questo motivo l'analisi termica sarà incentrata solo su uno di questi moduli, in modo tale da determinare un modello che approssimi l'andamento delle temperature dell'intero pacco batteria.



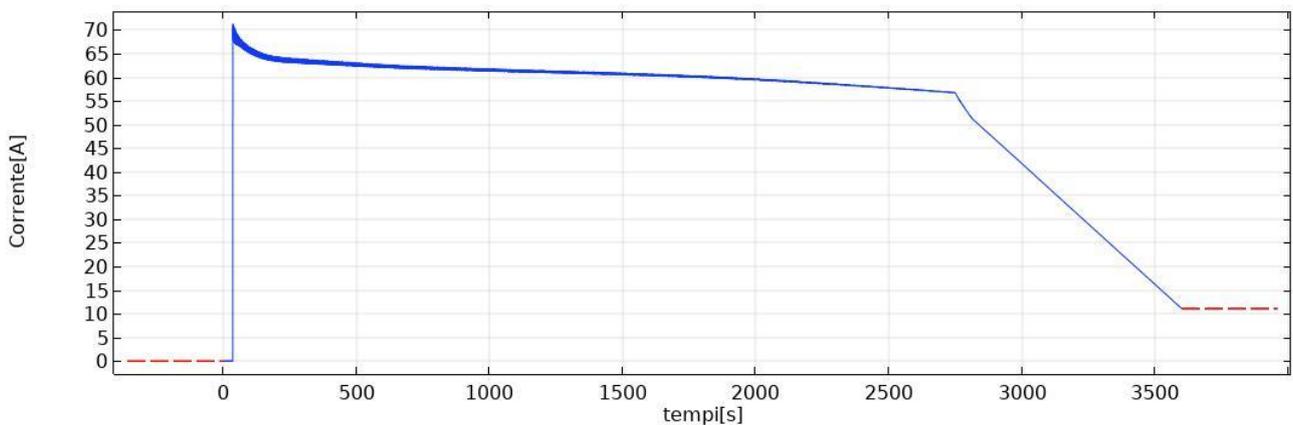
**Figura 2.6:** Configurazione collegamento serie tra i moduli FLAG-ms

Ogni modulo ha configurazione elettrica 2P12S, ovvero 12 serie di coppie di celle in parallelo, e che il pacco è formato da 9 moduli in serie (come mostrato in figura 2.6). Avremo quindi che le celle, essendo poste in parallelo, vedranno una corrente “dimezzata” rispetto a quella dell'intero pacco batteria. Questa particolare configurazione è resa necessaria per soddisfare le richieste energetiche del pacco e, allo stesso tempo, per permettere il passaggio della corrente nella cella scelta dall'azienda.

Il confronto tra la corrente nel pacco e la corrente “vista” da ogni singola cella può essere riscontrata in un test effettuato con potenza del pacco batteria di 50KW nelle figure 2.7 (a)(b).



**Figura 2.7(a):** Andamento delle correnti nel pacco su prova a 50KW di potenza



**Figura 2.7(b):** Andamento delle correnti nella cella su prova a 50KW di potenza

Questo andamento delle correnti può essere verificato basandoci sulle caratteristiche elettriche della cella, riportate nel datasheet in figura 2.8.

Electrical Characteristics			
Items	Typical		Remarks
Nominal Capacity	53Ah		Charge@0.2C, 25±3 °C Discharge@0.2C, 25±3 °C
Energy Density	Gravity	182 Wh/kg	Excluded tab and seal
	Volume	401 Wh/L	
Internal Resistance	Max. 0.90 mΩ		AC @1kHz, SOC30±5%
Weight	Max. 1,080 g		
Cell Dimension [Maximum]	Width <sup>(A)</sup>	226 mm	Unfolded
	Length <sup>(B)</sup>	227 mm	Excluded tab length
	Thickness <sup>(C)</sup>	12.0 mm	0.5kgf/cm <sup>2</sup> , SOC30±5%
Voltage	Average	3.7 V	
	Lower Limit	2.7 V	
	Upper Limit	4.2 V	
Current [Maximum]	Charge	Cont.	106.0A (2C) @25±3 °C
		Peak	159.0A (3C) ≤10sec, ≤ SOC 50%
	Discharge	Cont.	265.0A (5C) @25±3 °C
		Peak	424.0A (8C) ≤10sec, ≥ SOC 50%
Cycle life to 80% of remaining capacity	1C/1C	≥ 4,000	80% DOD or 3.4-4.1V (@25±3 °C)

**Figura 2.8:** Datasheet delle caratteristiche elettriche cella KOKAM SLPB120216216 [33]

Avendo a disposizione la tensione media, riportata nel datasheet della cella considerata, otterremo il valore di corrente nel pacco, riportata in tabella 2.1.

Tensione media sulle celle in parallelo	3.7V
Tensione media nel modulo	44.4V
Tensione media nel pacco	400V
Corrente media nel pacco $I=P/V$	125 A

**Tabella 2.1.** Valore della corrente nel pacco

Sapendo inoltre che la potenza nella cella è pari a:

$$Potenza\ della\ cella = \frac{Potenza\ del\ pacco}{Numero\ dei\ celle} \quad (2.1)$$

Si ricava il valori di corrente della singola cella riportata nella tabella 2.2.

Potenza del pacco	50KW
Numero di celle	216 (24 celle*9 moduli)
Potenza della cella	231W
Corrente media nella cella $I=P/V$	62.5 A

**Tabella 2.2.** Valore della corrente nella cella

Questa differenziazione tra il valore della corrente del pacco e quella della cella risulta essenziale nella fase di calcolo termico in cui la corrente cambia in base ai C-rate di carica e scarica del modulo. Il termine C-rate è un parametro legato alla capacità, con cui si valuta la velocità di carica o scarica di una cella. Moltiplicando la capacità nominale della cella per un C-rate si ottiene la corrente necessaria per caricare o scaricare l'elemento in un determinato tempo.[9]

Nel caso specifico studiato, avendo la cella una capacità nominale di 53A/h, con una corrente di 53 A la carica avverrà in un' ora, ovvero con un C-rate pari a 1.

Di conseguenza un carica a 2C permetterà di concludere la fase di carica in 30 minuti, con una corrente di 106A.

## 2.2 Modello termico del modulo

L'aumento progressivo del calore all'interno della batteria porta ad un conseguente aumento della temperatura, che deve essere tenuto sotto controllo mediante un sistema di dissipazione termica che più si addice alle condizioni di funzionamento del sistema.

La cella è caratterizzata da limiti di temperatura ben definiti a seconda di vari parametri, quali i materiali di cui è composta, la tensione a cui viene sottoposta, le reazioni chimiche all'interno di essa e ovviamente le correnti da cui è attraversata.

Il rischio di un improvviso aumento della temperatura è caratterizzato dal fenomeno definito come "Thermal runaway". Questo accade, in un tempo dell'ordine dei millisecondi, in seguito all'innescio di una serie di eventi dettato da un'iniziale temperatura troppo alta. Il rischio che il Thermal Runway si realizzi si ha in condizioni di instabilità termica, che può avvenire tra i 60 e i 100°C. L'instabilità termica può essere causata sia da normali condizioni di utilizzo, come in fase di carica rapida della batteria o scarica a C-rate elevati, sia da eventi esterni, come un'eccessiva sollecitazione meccanica che potrebbe portare a danneggiamenti interni alla batteria. [7]

Per determinare il calore generato dalla cella durante l'utilizzo, si deve calcolare quello prodotto dalle reazioni chimiche e quello generato dal passaggio di corrente sulla resistenza (intesa come resistenza complessiva di ogni cella). Quest'ultima è fornita dal produttore insieme ad altri parametri.

In generale, nello studio della termodinamica sono state definite numerose equazioni di bilancio termico che tengono conto di ipotesi di generazione del calore, convezione e conduzione termica all'interno della cella.

L'equazione di bilancio termico a parametri concentrati è sicuramente quella maggiormente usata per esprimere la trasmissione del calore ed esprime il legame tra questi fenomeni. [18]

$$\frac{d(\rho c_p T)}{dt} = h A_s (T - T_\infty) + q \quad (2.2)$$

Dove:

- $h$  è il coefficiente convettivo di scambio termico
- $A_s$  è l'area della cella esposta a convezione
- $T_\infty$  è la temperatura ambiente della cella
- $q$  è il calore generato

La parte sinistra dell'equazione rappresenta l'energia accumulata dalla batteria, mentre il termine a destra rappresenta il calore trasmesso per convezione, che nella cella può essere trascurato.

Il termine “q” indica invece la generazione di calore, il cui valore è espresso dall’equazione proposta da Bernardi [16]:

$$q=I[(U_0 - U) - T \frac{\partial U_0}{\partial T}] \quad (2.3)$$

Nella quale  $U_0$  è la tensione a circuito aperto della cella,  $U$  la tensione della cella in funzionamento, e  $\frac{\partial U_0}{\partial T}$  è un valore trascurabile a temperatura ambiente.

Semplificando questa equazione avremo:

$$q=I[(U_{298.15} - U) = I^2(R_i + R_p)= I^2R_{cella} \quad (2.4)$$

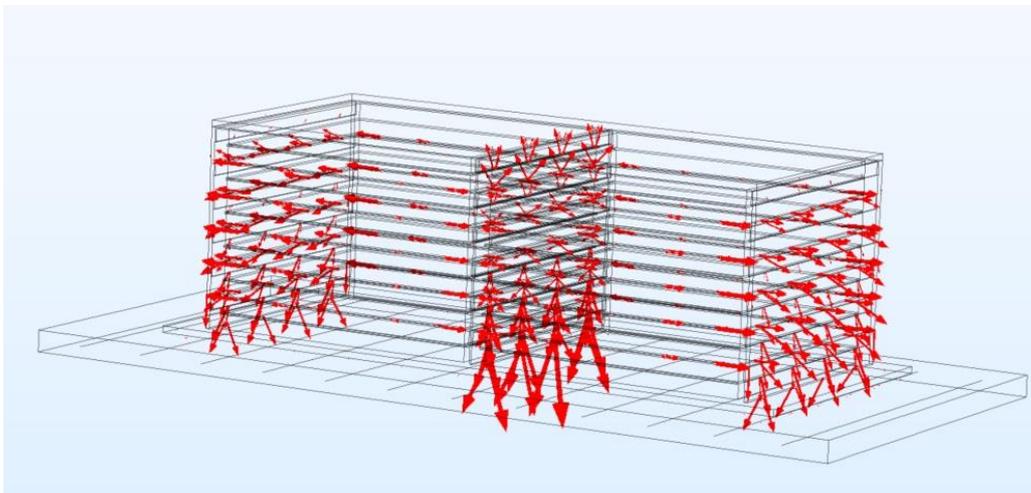
dove, a livello di resistenza, indichiamo con  $R_i$  quella interna della cella e con  $R_p$  quella di polarizzazione, con cui si indica la resistenza sugli elettrodi (tab) .

Ciò nonostante nella simulazione si considera la trascurabile la resistenza dei tab, poiché minima rispetto alla resistenza interna della cella.

Avremo perciò che il calore generato dalla cella sarà solo funzione della corrente e della resistenza interna.

Nel modello il raffreddamento è incentrato sull’efficienza del cooling plate che svolge il compito di mantenere il modulo sotto un certo livello di temperature così da non incorrere in fenomeni quali il thermal runaway descritto in precedenza.

Ma il raffreddamento del modulo sfrutta anche le proprietà conduttive dei materiali del case e di profili alettati a “C” posti tra una unità (coppia di celle poste in collegamento parallelo) e l’altra.

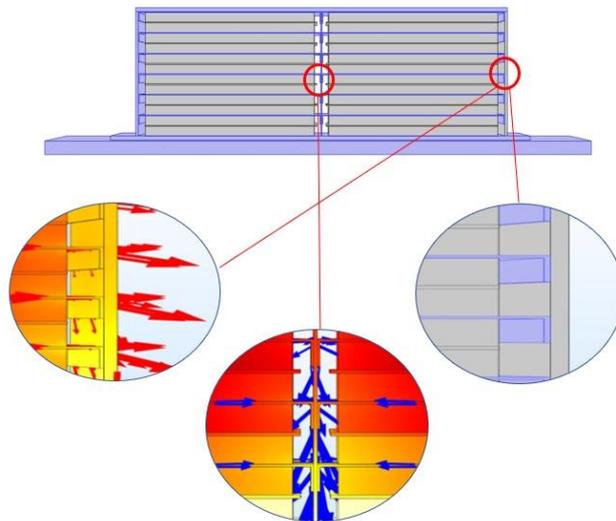


**Figura 2.9.** Dispersione del calore all’interno del modulo

Nella figura 2.9 le frecce indicano come il flusso di calore tenda ad andare in direzione del cooling plate e delle pareti laterali e superiore, grazie all'ausilio del profilo alettato che convoglia il calore generato dalla cella verso l'esterno per effetto termico convettivo e verso il basso per la conducibilità termica dell'alluminio.

Non trascurabile è anche l'apporto del palate centrale, con il calore che sempre tramite il profilo alettato viene indirizzato verso la parte bassa del modulo.

Tutte questo è apprezzabile nella figura 2.10 sottostante dove è rappresentata in maniera grafica la dispersione del calore del modulo.



**Figura 2.10:** Dispersione del calore nell'interno del profilo alettato tra le celle

Le frecce nell'immagine non a caso si trovano esattamente lungo il profilo a "C", posto a contatto superiormente con ogni coppia di celle, per un totale di 12 in tutto il modulo.

## 2.3 Ipotesi semplificative della simulazione

Come descritto nell'introduzione, l'obiettivo di questa tesi è realizzare una simulazione termica di uno dei 9 moduli impiegati nel pacco mediante l'utilizzo del software COMSOL Multyphysics e quindi confrontare i risultati ottenuti in termini di temperatura e calore dissipato nelle prove di carica 1C e 2C e di scarica 3C.

Sebbene lo scopo iniziale fosse quello di simulare l'andamento termico dell'intero pacco si è deciso in un secondo momento di analizzare l'andamento di un solo modulo così da confrontare i dati sperimentali con quelli derivati dalla simulazione. Il motivo risiede nell'impossibilità da parte del

software di realizzare una simulazione così estesa (i nodi della mesh da risolvere sarebbero stati ben oltre la potenza computazionale a disposizione).



**Figura 2.11:** Ciclatore per test pacco batteria FLAG-ms[28]

I dati sperimentali sono stati raccolti mediante l'utilizzo di un ciclatore, un dispositivo costituito da un alimentatore e un carico elettronico, capace di imporre un profilo di tensione, in carica o scarica, del pacco batteria, con lo scopo di andare a determinare le grandezze elettriche quali tensione e corrente di alimentazione delle celle.

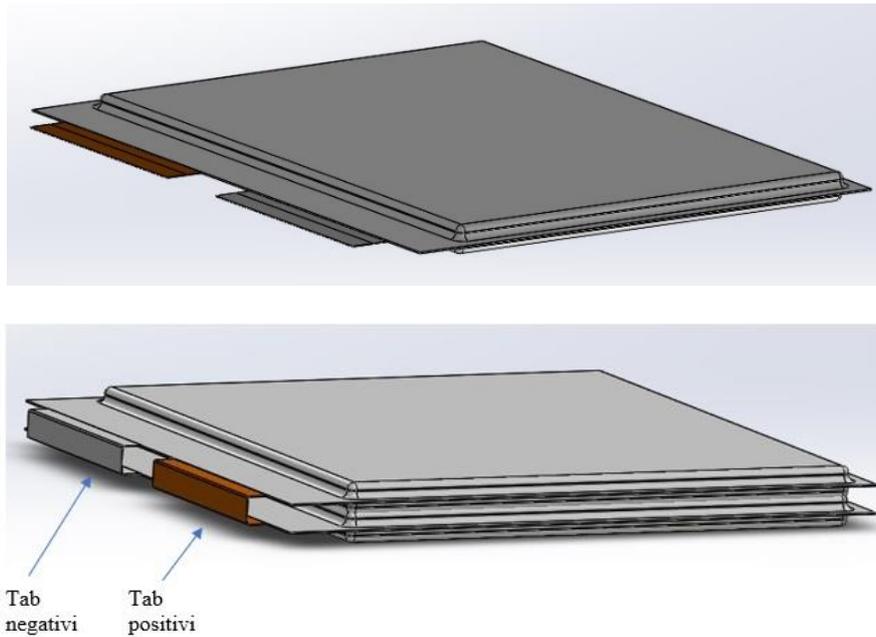
## **2.4 Ipotesi semplificative del modello geometrico**

In questo paragrafo sarà analizzata la geometria del modulo e le ipotesi semplificative adottate per realizzare la simulazione. Al CAD originale, realizzato con il software di progettazione Solidworks, è stato sostituito un modello semplificato a livello sia di struttura della cella, sia di modulo.

Effettuare una simulazione sul modello semplificato ha il vantaggio di strutturare una mesh meno fitta, così da avere meno nodi da risolvere a livello di equazioni differenziali. Nel seguito sono riassunte le variazioni geometriche delle componenti del modulo e della cella

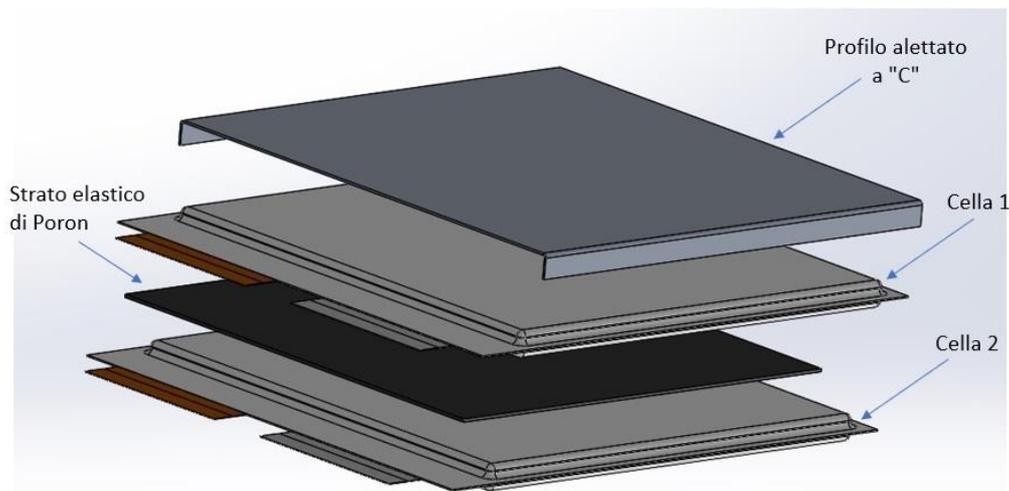
### **2.4.1 Geometria della cella**

Iniziamo ad analizzare come la geometria è stata modificata a partire dal suo CAD originale. Nella figura in basso è possibile vedere la cella nel suo design originale



**Figura 2.12:** Modello CAD della singola cella (a) e di una unità di celle in parallelo (b) [28]

Il collegamento tra le celle del modulo avviene mediante contatto con i due “tab” positivi e negativi. Nella vista esplosa in figura 2.13 è raffigurata la componentistica di una coppia di celle in parallelo.



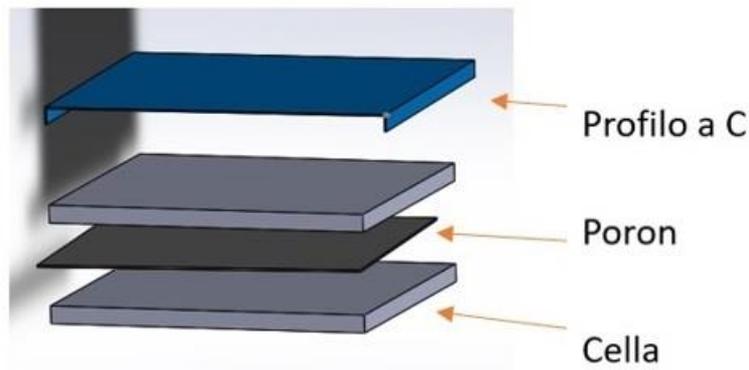
**Figura 2.13.** Esploso del modello

I componenti principali sono, oltre alle 2 celle in parallelo, uno strato di materiale elastico polimerico posto tra loro (poron) e un profilo alettato a “C”.

- **Poron:** È un materiale polimerico elastico che ha come scopo principale quello di “assorbire” l’espansione delle celle dopo diversi cicli di lavoro, oltre ad isolarle elettricamente

- **Profilo alettato a “C”**: Svolge il compito di veicolare il calore delle celle verso le pareti laterali del modulo, dal momento che è connesso con la superficie superiore della cella, oltre che a compattarle una volta montato il pacco.

Questi due componenti sono stati mantenuti dal CAD originale. Risultando invece complessa, come visibile in figura 2.11, la geometria delle celle, è stato necessario riprogettare l’unità composta da cella-poron- profilo a “C” (figura 2.14).



**Figura 2.14.** Modello semplificato

Nel CAD sono stati semplificati tutti i raccordi e le superfici con uno spessore minore di 2mm, come i “tab” e il “cell casing”, ovvero l’involucro di materiale isolante, che non ha effetti termodinamici ma ha lo scopo di isolare elettricamente la cella.

In questa configurazione abbiamo quindi un miglioramento delle condizioni di composizione della mesh che sarà generata con un minor numero di nodi.

## 2.4.2 Geometria del modulo

Il modulo, analogamente alla cella, ha subito una variazione geometrica per ogni suo componente.

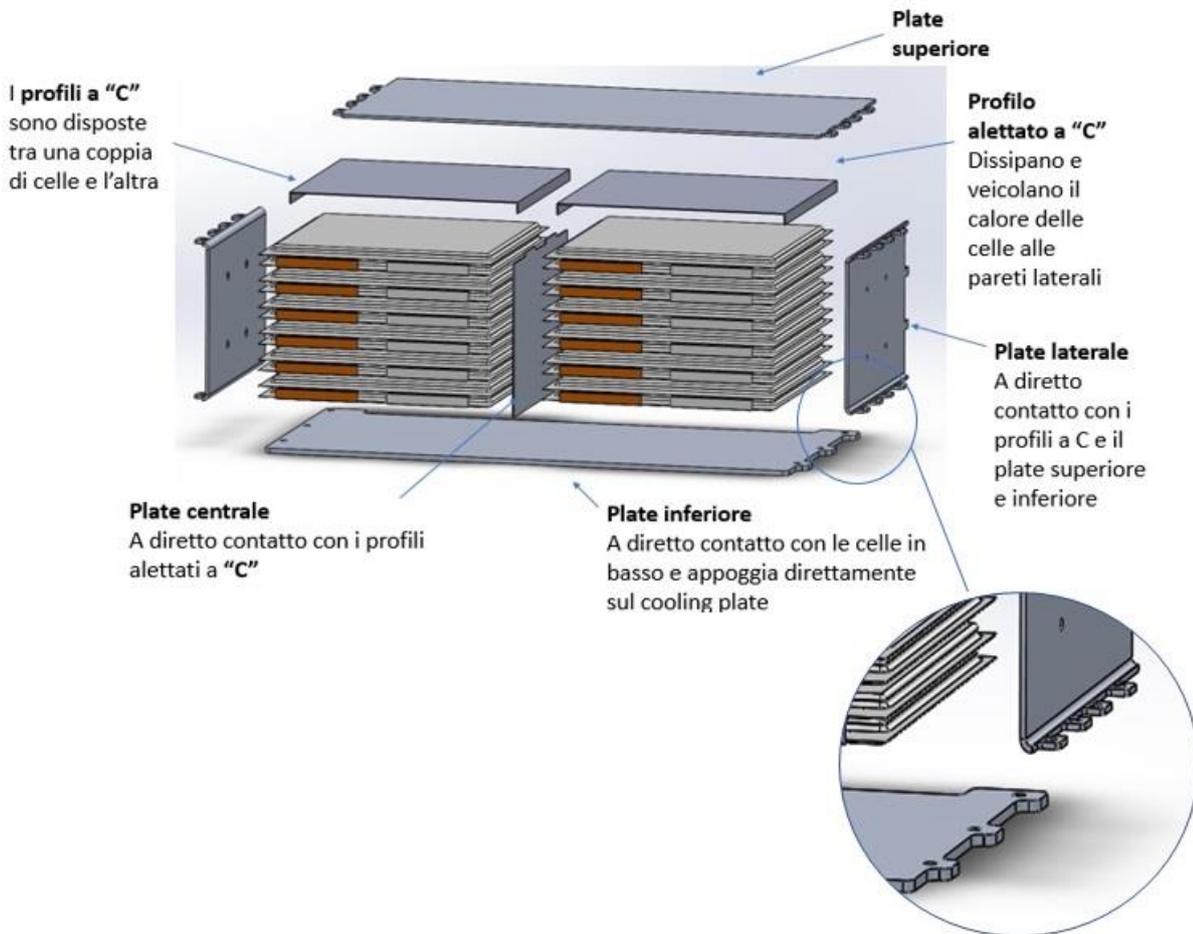


Figura 2.15. CAD del modulo originario[28]

Nell'esploso in figura 2.15 i plate laterali, superiore inferiore e centrale, presentano scanalature, fori e intagli per i quali nell'intorno la mesh risulterebbe molto fitta.

Dopo aver riprogettato le parti in questione, avremo una variante del modulo in cui saranno mantenute solo le forme essenziali per la composizione del modulo.

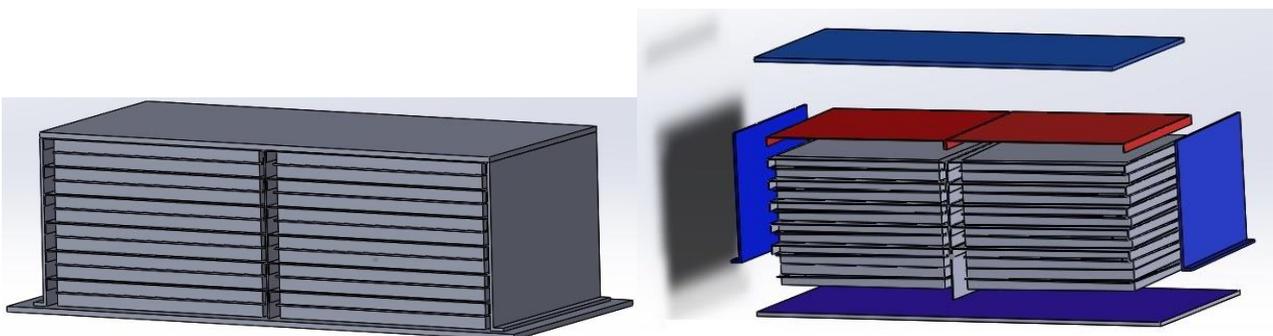


Figura 2.16. Nuova configurazione del modello

Il nuovo modello risulta essere conforme ai fini della simulazione, poiché non più caratterizzato da elementi geometrici che richiedono una mesh molto fitta per essere descritti. Le dimensioni geometriche di ogni componente restano le stesse, sebbene la dissipazione termica varierà necessariamente, determinando un picco di temperature sulle celle diverso da quelle registrate in fase sperimentale, come analizzeremo in seguito.

A seguito alla variazione della geometria, passiamo quindi ad analizzare la topologia di generazione della mesh. I parametri in input determinano la sua struttura e la sua dimensione poligonale in relazione agli elementi finiti utilizzati per discretizzare il modello. In ciascun poligono, di cui è descritta la geometria, viene risolto un insieme di funzioni polinomiali per approssimare la trasmissione del calore il più possibile alla realtà. Dal punto di vista teorico, un numero di elementi della mesh che tende all'infinito porterà a una precisione maggiore e il risultato finale sarà più accurato possibile.



**Figura 2.17.** Caratteristiche della mesh

Rispetto al modello iniziale le semplificazioni ci permettono di avere una struttura della mesh meno fitta rispetto a quella che avrebbe caratterizzato il modello CAD originario. Tuttavia le modifiche apportate permettono lo svolgimento della simulazione, in relazione alla potenza computazionale a disposizione.

## 2.5 Ipotesi semplificative della resistenza elettrica

Nel proseguimento dell'analisi di semplificazione ci occupiamo del parametro della resistenza elettrica  $R$  all'interno della cella Kokam.

La resistenza diminuisce a causa di due fattori:

- Lo **stato di carica (SoC)**, definito come la capacità disponibile, espressa in percentuale, rispetto all'ultimo ciclo di carica-scarica.  
Questo parametro dovrebbe essere sempre riferito ad una cella con pochi cicli di carica/scarica effettuati, poiché la capacità si riduce gradualmente con l'invecchiamento, con gli effetti della temperatura e della velocità di scarica.
- La **temperatura**, che, a parità di stato di carica, porta ad una diminuzione della resistenza a causa dell'influenza che ha all'interno dell'elettrolita. Un aumento del calore conferisce agli ioni più mobilità rispetto alle basse temperature, così da ridurre la resistenza all'interno della cella.

Tuttavia, non potendo estrapolare dai dati sperimentali la variazione della resistenza, si è ritenuto esatto considerare, in relazione anche al suo valore molto basso pari a  $0.0009\Omega$ , la sola resistenza interna.

Un diverso discorso riguarda le ipotesi semplificative delle variazioni geometriche del modulo: le superfici di dissipazioni, nella presenza di intagli e scanalature, portano a una differenza finale di temperatura, tra prove sperimentali e simulate, come vedremo nell'analisi dei risultati.

## Capitolo 3

### Condizioni iniziali e parametrizzazione dei modelli simulati

Come descritto nell'introduzione di questo studio, l'obiettivo è quello di creare un modello per il quale sia possibile un riscontro con i dati sperimentali della temperatura dei test effettuati.

Il pacco batteria progettato dall'azienda FLAG-ms è destinato ad un utilizzo in campo automotive di un veicolo full electric e si compone di 9 moduli collegati elettricamente in configurazione serie.

Sebbene l'obiettivo fosse quello di simulare l'intero pacco, l'attenzione si è poi spostata sulla simulazione di un singolo modulo, così da effettuare una simulazione comparabile con i dati sperimentali di uno dei moduli. Questa scelta è stata motivata dall'impossibilità di simulare l'intera fisica del pacco batteria, come sarebbe stato inutile simulare i singoli moduli e sintetizzare i risultati in un unico pacco, poiché le variabili in gioco sarebbero state molte e di natura diversa.

Di conseguenza anche il cooling plate è stato dimensionato in proporzione al modulo, così da ricreare il più fedelmente possibile il rapporto tra pacco e cooling completo.

Dopo questa prima fase di rimodellamento geometrico e fisico, il lavoro di tesi si è sviluppato in due direzioni:

- Simulazione del modulo e confronto con i dati sperimentali
- Simulazione di due configurazioni alternative del modulo a seguito di design review, con una diversa disposizione delle celle ai fini di valutarne il nuovo aspetto termico. I risultati raggiunti sono poi stati confrontati con quelli del modello simulato originale.

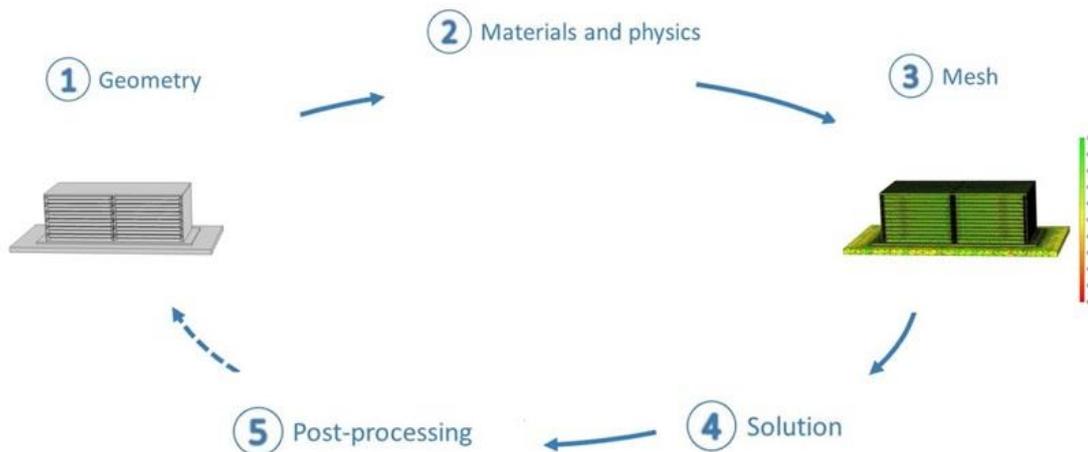
In seguito al confronto tra dati sperimentali e simulati, che indicavano una buona approssimazione del modello creato rispetto al modulo reale, su consiglio del mio tutor aziendale, ho intrapreso una design review del pacco in modo da formulare una sua diversa struttura, con la possibilità di avere una miglior dissipazione termica. I due moduli alternativi progettati mantengono sia la potenza termica della cella del modulo originario, sia le altre variabili iniziali legate alla trasmissione del calore.

I modelli di simulazione sono stati sviluppati su Comsol, un software multifisico capace di unire più aspetti fisici all'interno dello stesso processo.

In un'analisi più specifica, questo software, è un solutore di derivate parziali che descrive le fisiche in gioco mediante la tecnica degli elementi finiti, andando a discretizzare il problema nel continuo trasformandolo in discreto.

In ognuno dei tre modelli il software suddivide la simulazione in 5 fasi , ovvero:

- Definizione del design geometrico del modello da analizzare
- Scelta dei materiali e della fisica
- Strutturazione della mesh
- Analisi delle soluzioni
- Postprocessing



**Figura 3.1.** descrizione delle fasi della simulazione

Queste impostazioni del software permette una variazione dei parametri iniziali al termine di ogni simulazione.

Infatti, nella fase di postprocessing, è possibile valutare le soluzioni, i grafici e gli andamenti di un determinato parametro. A seguito di questo, se i risultati ottenuti risultano insoddisfacenti, possono essere variate la geometria, le proprietà dei materiali o le condizioni al contorno, così da raggiungere i risultati previsti.

### 3.1 Prove nei modelli ed elaborazione dei dati sperimentali

Le simulazioni sono state condotte per le i moduli FLAG-ms su 3 prove:

- Carica 1C:
- Carica 2C
- Scarica 3C

I modelli alternativi A e B progettati con una nuova disposizione delle celle sono stati simulati solo in fase di carica per le seguenti prove:

- Carica 1C
- Carica 2C

La scelta di simulare solo in carica i moduli A e B è motivata dal fatto che, a sollecitazioni termiche molto elevate e in un intervallo molto piccolo (20 minuti) dettate dalla scarica 3C, le ipotesi semplificative fatte per il modulo FLAG-ms e valide anche per i moduli A e B avrebbero caratterizzato negativamente il risultato della simulazione non avendo la possibilità di definire parametri iniziali “ad hoc” .

I dati sperimentali di corrente necessari per calcolare la sorgente di calore nella batteria e quelli di temperatura da mettere a confronto con i risultati della simulazione, dopo una conversione da file “.mat” a un file “.csv”, sono stati elaborati sul software Excel.

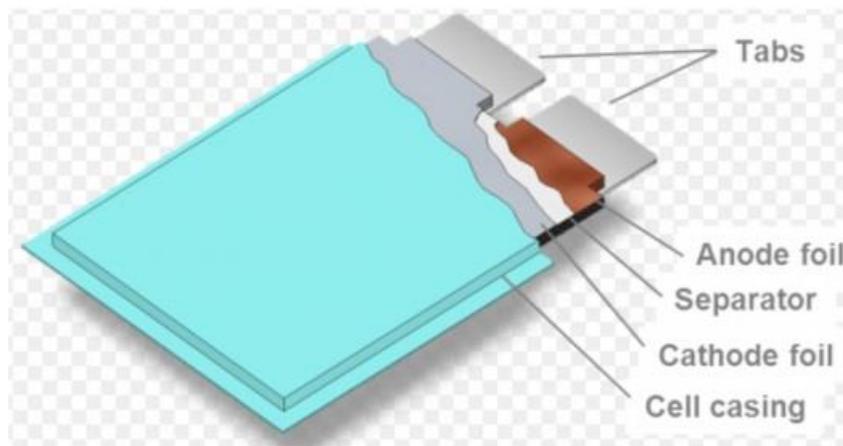
L’elaborazione si è resa necessaria poiché i dati sperimentali avevano degli step di tempo inferiore al secondo, mentre la simulazione è stata impostata su intervalli di tempo (step) di 30 secondi. Di conseguenza si è reso necessario una selezione dei dati a intervalli proporzionati agli intervalli di simulazione, tramite un calcolo della media per ogni distanza temporale, a seconda della durata della prova.

## 3.2 Proprietà termiche dei materiali degli elementi del modulo

Prima di illustrare le equazioni che governano il trasferimento di calore in questa sezione saranno descritti i materiali usati in questa ricerca e che sono stati usati durante la simulazione.

### 3.2.1 Materiali della singola cella

Come visto nei capitoli precedenti la cella è costituita da elementi in tensione ed elementi isolanti che sono difficili da dimensionare poiché il costruttore non è tenuto a dare una descrizione così dettagliata della tecnologia prodotta.



**Figura 3.2.** Struttura di una cella pouch Li-Poly[28]

Come visto in figura, le celle pouch presentano la sovrapposizione di strati laminati. Lo strato in rame costituisce l'anodo, mentre un foglio di alluminio il catodo della cella. I tab sono i terminali negativo, in rame, e positivo, in alluminio, mentre l'esterno della cella è rivestito di un materiale elettricamente isolante, generalmente kapton. [14]

Per questo motivo, non avendo a disposizione caratteristiche e proprietà fisiche degli elementi della cella, sia in tensione, sia isolanti, sono state fatte delle assunzioni relative al modello [12]:

- Le proprietà del materiale si considerano uniformemente distribuite tutti i multistrati dei diversi componenti della cella.
- Effetti termici di convezione sono ignorati all'interno della cella
- Il calore specifico e la conducibilità termica sono considerati costanti e indipendenti dalla temperatura.

- Il passaggio di corrente è considerato uniformemente distribuito all'interno della cella.

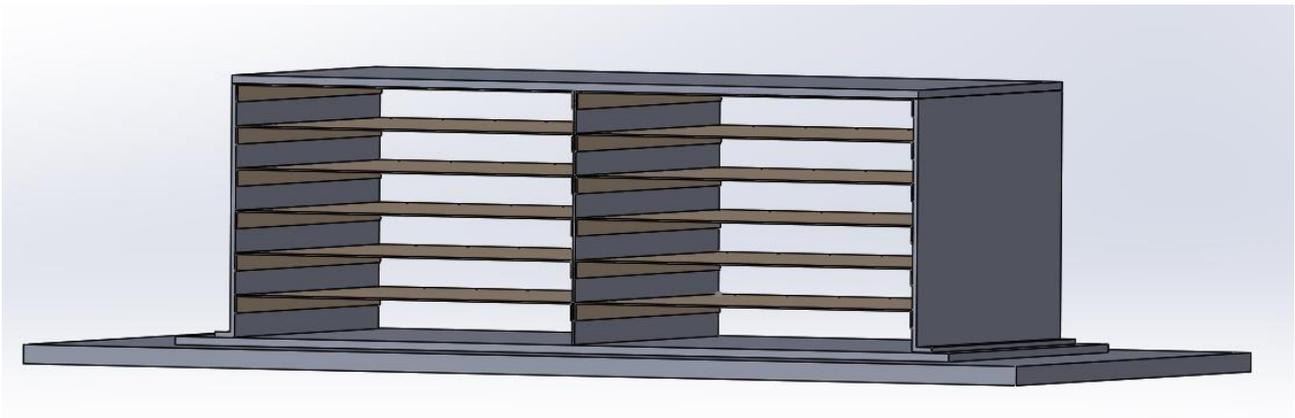
A seguito di queste premesse nella tabella sottostante sono riportati i valori termofisici della cella alla temperatura di 25°C.

Proprietà	Valori
Volume $m^3$	$6.16 \cdot 10^{-4}$
Densità $[Kg/m^3]$	1754
Calore specifico $[J/Kg \cdot K]$	722
Conducibilità Termica $[W/m \cdot K]$	5.22

**Tabella 3.1.** Proprietà termiche della cella[12][15]

### 3.2.2 Materiali del case del modulo

Dopo aver definito le proprietà termiche della cella andiamo a determinare quelli del case del modulo.



**Figura 3.3.** CAD dei componenti in alluminio del modulo

I componenti sono:

- Plate superiore
- Plate inferiore
- Plate laterali

- Profili alettati a C
- Cooling plate

Come detto precedentemente tutti questi componenti sono in alluminio e la definizione delle loro proprietà risultano essenziali per una buona riuscita della simulazione.

In tabella sono riportate le proprietà dell'alluminio inserite durante la fase di definizione dei materiali.

<b>Proprietà dell'alluminio</b>	<b>Valori</b>
Densità [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	2770
Calore specifico [ $\text{J}/\text{Kg}^*\text{K}$ ]	381
Conducibilità Termica [ $\text{W}/\text{m}^*\text{K}$ ]	284

**Tabella 3.2.**Proprietà termiche dell'alluminio[8]

In aggiunta vengono definite le caratteristiche dello strato elastico presente tra le celle, di cui abbiamo definito la funzione di assorbimento dell'espansione gassosa delle celle dopo un certo numero di cicli di funzionamento.

<b>Proprietà del Poron</b>	<b>Valori</b>
Densità [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	320
Calore specifico [ $\text{J}/\text{Kg}^*\text{K}$ ]	1350
Conducibilità Termica [ $\text{W}/\text{m}^*\text{K}$ ]	0.036

**Tabella 3.3.**Proprietà termiche del Poron[11]

Il poron non ha un valore termico rilevante ai fini della simulazione poiché, pur avendo bassa conducibilità termica, il suo spessore è trascurabile poiché soggetto a schiacciamento tra una cella e l'altra.

### 3.3 Condizioni al contorno della convezione

In questo paragrafo saranno definite le condizioni al contorno che regolano la trasmissione termica all'interno del modulo.

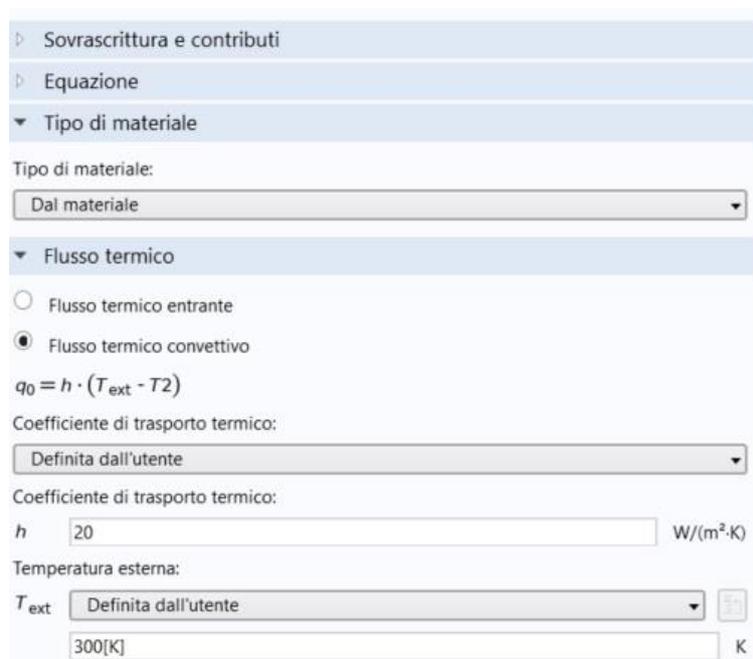
Iniziamo col definire la condizione di convezione naturale con il quale di va definire la dispersione termica a contatto con l'aria.

La convezione è stata applicata sulle superfici del case, regolata dalla seguente relazione:

$$q_0 = hA(T - T_{ext})$$

La formula esprime il flusso termico convettivo caratterizzato dal coefficiente di scambio termico convettivo “h” espresso in  $[W/m^2K]$  e la temperatura esterna  $T_{ext}$  di  $300^{\circ}K$ , mentre T è la temperatura che viene determinata sulla superficie nei vari nodi della mesh per ogni step di simulazione.

Il valore di “h” è stato determinato come nell'ordine di  $20 W/m^2K$ , come valore considerato più adatto nel confronto tra le temperature simulate e le temperature ricavate sperimentalmente.



**Figura 3.4.** Fisica della convezione termica in COMSOL

Vengono poi impostate anche le proprietà dell'aria alle condizioni costanti di  $300^{\circ}K(27^{\circ}C)$  riportate nella seguente tabella

Proprietà dell'aria	Valori
Densità [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	1.225
Calore specifico [ $\text{J}/\text{Kg}^*\text{K}$ ]	1006.5
Coefficiente termico convettivo [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]	20
Temperatura dell'aria costante [K]	300

**Tabella 3.4.** Proprietà termiche dell'aria

La convezione naturale svolge un ruolo rilevante nella dispersione termica. Il modulo è progettato in modo da sfruttare la conduzione degli elementi interni e dei profili alettati poste sulle celle per trasferire il calore verso l'esterno. La convezione permette di dissipare una parte di questo calore verso l'esterno tramite lo scambio termico dell'aria.

### 3.4 Condizioni iniziali di temperatura del modulo e potenza termica della cella

Andiamo ora a presentare le condizioni iniziali di temperatura per le componenti del modello, facendo un distinguo tra le prove in carica 1C, e in scarica 3C effettuate a temperatura iniziale di 25° e 2C effettuate a temperatura iniziale di 40°

- Le prove in carica 1C e scarica 3C sono state effettuate alla temperatura iniziale delle celle di 25°C, e con lo stesso valore sono state definite le altre componenti del modulo non in tensione.

Componenti del modulo	Valori iniziali di temperatura con celle a Tin di 40°C(313°K)
Cella	298.15 (25°C)
Plate inferiore	298.15(25°C)
Plate superiore	298.15(25°C)
Profilo alettato “C”	298.15(25°C)
Plate centrale	298.15(25°C)

**Tabella 3.5** Valori iniziali delle temperature dei componenti del case

- La prova 2C ha richiesto le nuove condizioni di temperatura degli elementi non in tensione del modulo, ovvero delle varie componenti di alluminio e del poron. Perciò è stata simulata una potenza termica fittizia all’interno delle celle fino a portarle a 40° così da ottenere le temperature iniziali degli altri componenti al raggiungimento di tale soglia.

I valori ricavati dalla prova sono riportati nella seguente tabella 3.6.

Componenti del modulo	Valori iniziali di temperatura con celle a Tin di 40°C(313°K)
Cella	313 (40°C)
Plate superiore	309.82 (36.82°C)
Plate laterale	308.28 (35.28°C)
Profilo alettato “C”	311.57 (38.57°C)
Plate inferiore	306.42 (33.42°C)
Plate centrale	308.63 (35.63°C)
Poron	312.1 (39.1°C)
Cooling Plate	305.12 (32.12°C)

**Tabella 3.6** .Valori iniziali delle temperature dei componenti del case

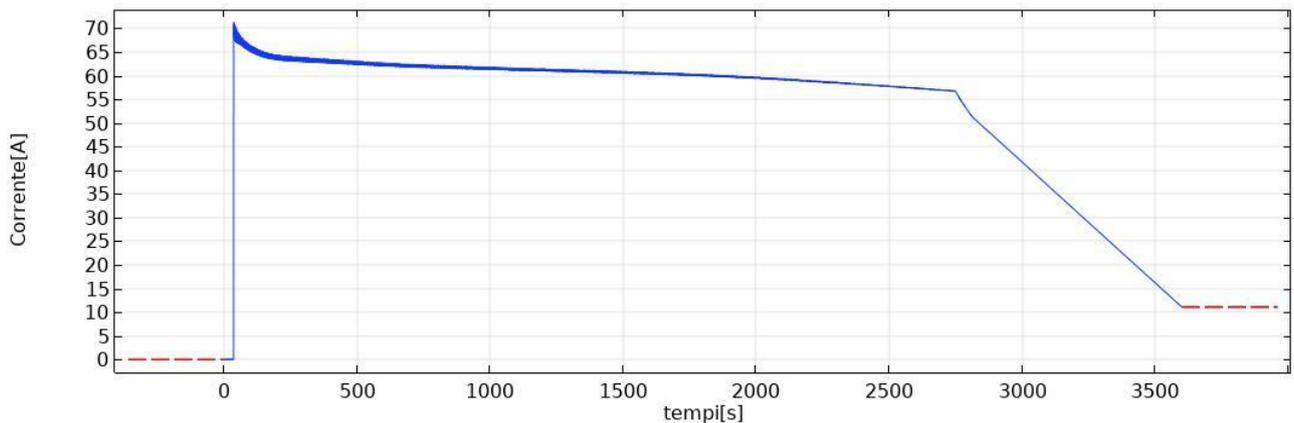
Dopo aver stabilito le condizioni iniziali della del case in alluminio e della cella passiamo alla potenza termica generata da quest'ultima. Nel capitolo precedente nel paragrafo sull' analisi termica abbiamo definito la potenza termica secondo la seguente relazione:

$$\text{Potenza termica} = I^2 R_{\text{cella}} \quad (3.1)$$

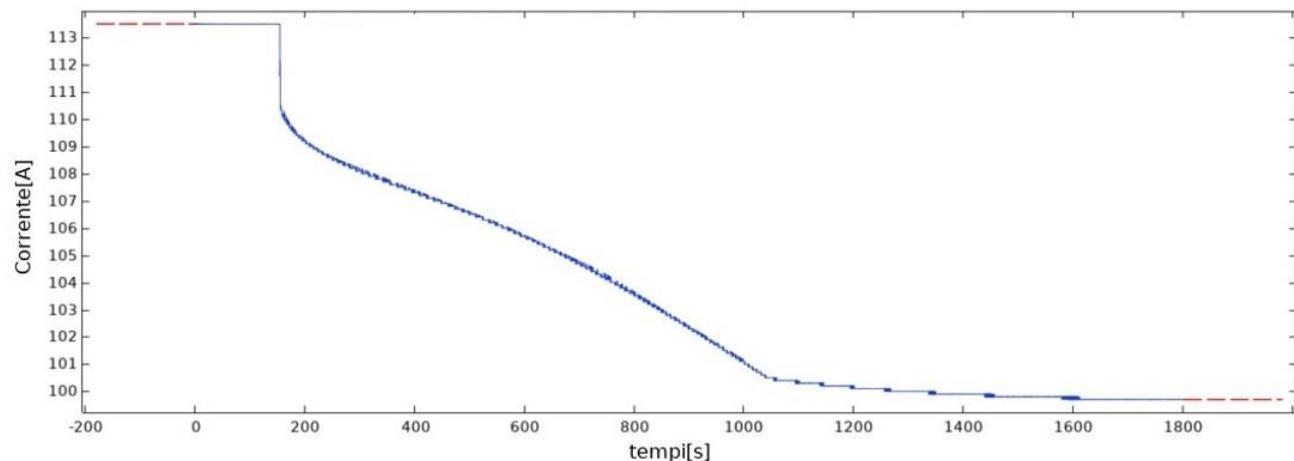
Poiché come già detto non teniamo conto della resistenza sugli elettrodi (tab) della cella poiché trascurabile, quella interna sarà l'unica di cui terremo conto.

Quindi, moltiplicando il profilo della corrente al quadrato, in ogni suo punto nel tempo, per la resistenza, il software di simulazione genererà un profilo di potenza che determinerà la sorgente termica del nostro modello

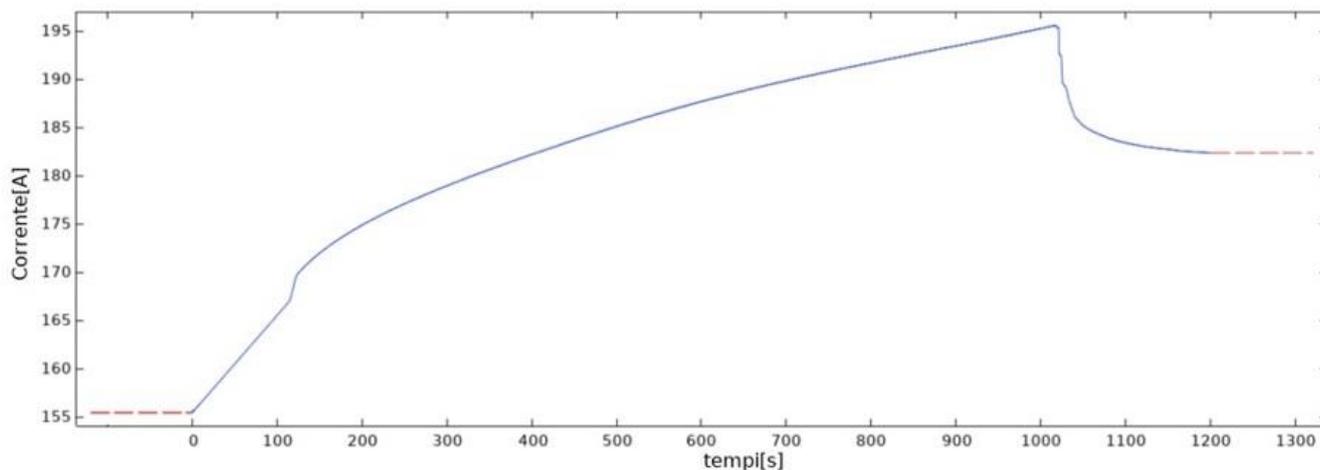
Le figure 3.5(a),(b),(c), mostrano i profili sperimentali di corrente rispettivamente per la carica 1C, 2C e per la scarica 3C rispettivamente per una base tempi di 3600 secondi(60 minuti), 1800 secondi (30 minuti) e 1200 secondi(20 minuti).



**Figura 3.5(a).** Profilo di corrente con carica 1C



**Figura 3.5(b).** Profilo di corrente a carica 1C



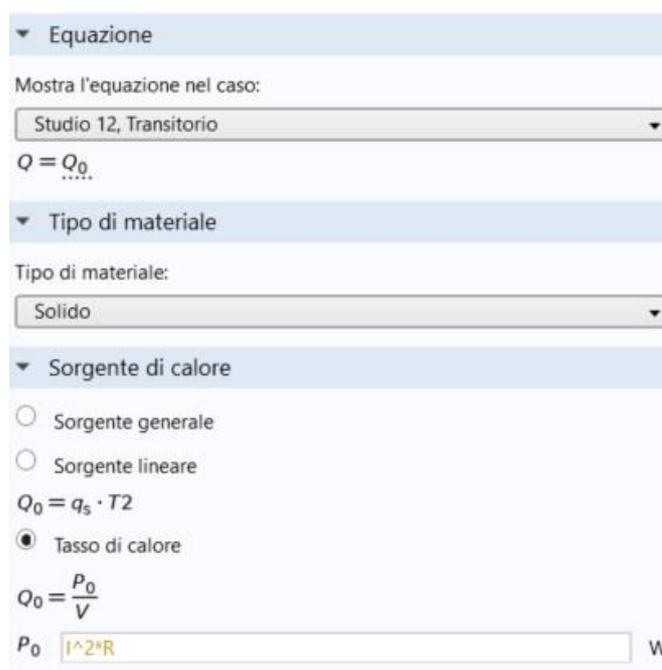
**Figura 3.5(c).** Profilo di corrente a scarica 3C

Per avere una idea della potenza termica media sviluppata dalle tre correnti per ogni singola cella riportiamo i valori nella tabella 3.6 sottostante

Potenza Termica Carica 1C	2.25W
Potenza Termica Carica 2C	10.69W
Potenza Termica Scarica 3C	28.19W

**Tabella 3.6.** Potenza termica media generata da ogni singola cella per le diverse prove.

Nella fase di elaborazione dei dati è stata calcolata la media dei valori delle correnti sperimentali ogni 30 secondi, in modo da essere concorde con il time step impostato nella simulazione.



**Figura 3.6.** Parametrizzazione della potenza termica in COMSOL

La figura 3.6 mostra come il software COMSOL estrapoli ed interpoli il valore di corrente, dipendente dal tempo, con ogni time step definito dallo studio transitorio del modello. In tutte le simulazioni svolte, come descritto all'inizio del capitolo, gli step considerati sono di 30 secondi.

### 3.5 Fisica del cooling e condizioni iniziali di temperatura

Il cooling plate, grazie all'ausilio del liquido che scorre all'interno dei canali, permette sia di raffreddare direttamente il modulo tramite contatto diretto alla base del plate inferiore, sia di convogliare verso il basso il calore accumulato nei profili a "C" e gli altri componenti del case.

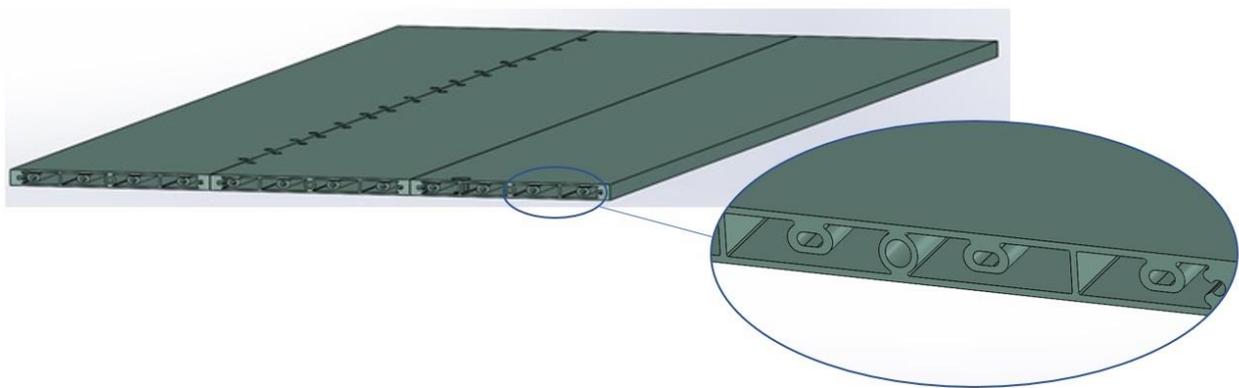


Figura 3.7. CAD del cooling originario[28]

Nella figura 3.7 si possono notare alcuni dettagli del plate originale del modulo progettato dalla FLAG-ms. Realizzato tramite un processo di estrusione, la struttura presenta elementi di dispersione termica, con le superfici interne che presentano un vuoto che favorisce il passaggio dell'aria e conseguentemente uno scambio per convezione con l'ambiente esterno.

Per quanto concerne i canali di passaggio dell'acqua, questi hanno una forma ovalizzata, così da avere una maggiore superficie di contatto con il piano superiore del plate.

Anche per quanto riguarda il cooling, come per il modulo e la cella, la geometria del pezzo risultava di difficile adattamento all'interno dell'ambiente di simulazione, poiché una struttura 3D dei canali rendevano lo sforzo computazionale molto alto e risultava impraticabile l'approcciarsi del modello a risultati concordanti con quelli sperimentali.

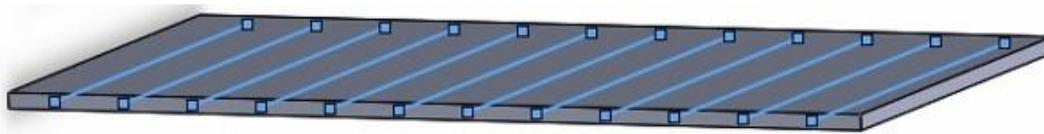
Per questo motivo i canali del cooling plate sono stati sostituiti da una fisica del software per cui vengono rappresentati in 2D, con dei segmenti che vanno a sostituire la loro fisica 3D. Tuttavia il raffreddamento termico risultava, a seguito di simulazioni preliminari, non abbastanza incisivo da produrre un effetto considerevole di dissipazione termica del modulo.

A seguito di ciò si è adottata una fisica che imponesse al piano del cooling una temperatura fissa impostata sul piano medio.

Nel seguito viene brevemente descritta la fisica non adottata, poiché è risultato essere un passo intermedio per la fisica finale imposta.

### **Soluzione fisica “pipe flow non isoterma” (non adottata)**

Un primo modello di semplificazione è stato quello di adottare un modello fisico del software COMSOL denominato “pipe flow non isoterma”.



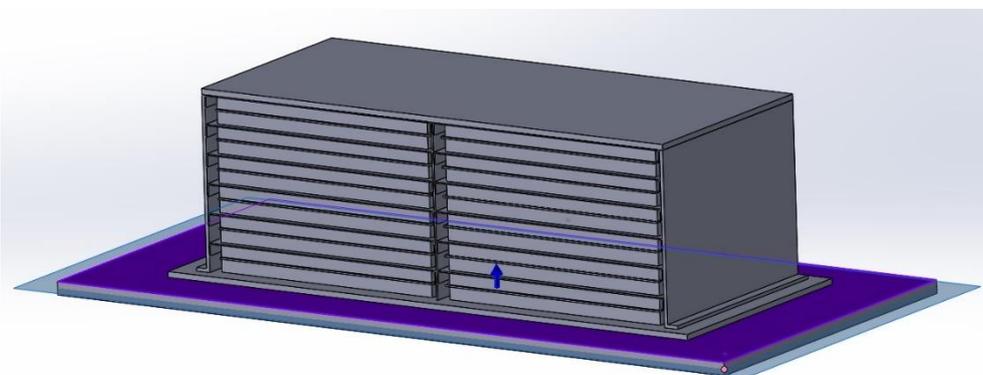
**Figura 3.8.** Fisica 2D dei canali del cooling [28]

Questo “pacchetto” fisico permette di simulare il flusso di un fluido, il calore e il trasferimento di massa all’interno dei canali. Inoltre, determina i valori finali di velocità pressione temperatura. Inoltre, la modellazione 2D avrebbe dato un vantaggio in termini di efficienza computazionale[35]. Tuttavia, a seguito delle simulazioni effettuate con questa configurazione i risultati sono stati insoddisfacenti se confrontati con i parametri sperimentali.

### **Soluzione fisica verificata con piano del plate a temperatura fissa e costante(adottata)**

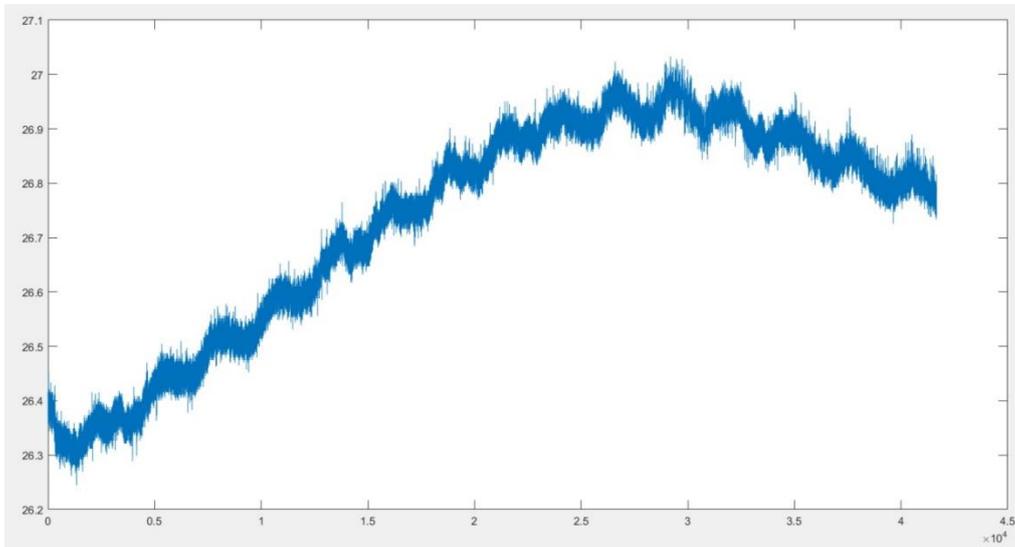
Di conseguenza si è reso necessario creare un secondo modello di dispersione termica in cui la condizione fosse quella di imporre una temperatura fissa nel piano di mezzeria del plate.

Il valore di tale parametro è stato determinato imponendo una media tra i valori iniziali e finali della temperatura rilevata sperimentalmente nei canali del cooling plate originale.

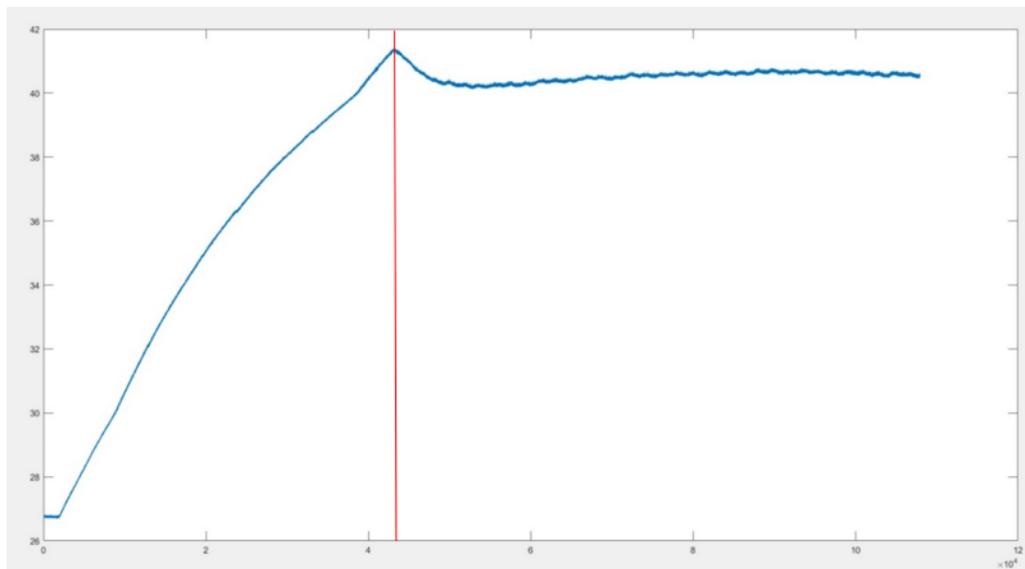


**Figura 3.9.** Fisica del cooling con temperatura fissata sul piano medio

Dai dati sperimentali si nota come la temperatura all'interno dei canali del cooling sia molto diversa tra le prove con temperatura iniziale delle celle a 25°C e quelle con temperatura a 40°C.



**Figura 3.10.** Temperature nel tempo dei canali del cooling a temperatura iniziale di 25°C



**Figura 3.11.** Temperature nel tempo dei canali del cooling a temperatura iniziale di 40°C

La figura 3.10 mostra come la temperatura nei canali in carica 1C e scarica 3C subisca un gradiente termico di 0.8°C arrivando ad un picco massimo di 27°C.

Nella prova a 2C con temperature iniziali di 40°C, dopo la fase di preriscaldamento delle celle a sinistra della linea rossa, come mostrato nelle figura 3.11, i canali del cooling raggiungono una temperatura massima di 41.3°C per poi stabilizzarsi per un valore medio di 40.6°C.

Questa analisi dei dati dimostra quanto influisca alle alte temperature l'apporto del liquido del cooling, mentre per innalzamenti minori della temperatura influisca maggiormente il coefficiente conduttivo della piastra di alluminio e la convezione dell'aria sul modulo.

Valori di C-rate	Temperatura imposta nella simulazione sul piano medio del cooling plate
Carica 1C e Scarica 3C Temperatura iniziale delle celle 25°C	26.7°C
Carica 2C Temperatura iniziale delle celle 40°C	40.6°C

**Tabella 3.7:** Valori di temperatura imposti sul cooling plate

Come poi sarà mostrato nei risultati della tesi la capacità del liquido nel cooling di assorbire calore generata dal modulo, nelle diverse prove e a diversa temperatura iniziale, produrrà un effetto diverso ai fini della dissipazione termica .

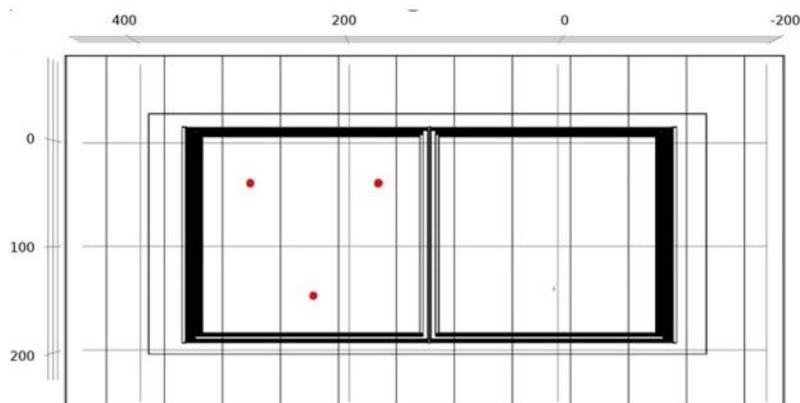
## Capitolo 4

### Simulazione del modulo FLAG-ms

Dopo aver definito la fisica del modello, i parametri iniziali, le condizioni al contorno e le ipotesi semplificative, in questo capitolo saranno evidenziati e commentati i risultati delle simulazioni relative al modello del modulo FLAG- ms nelle prove condotte in carica 1C,2C e scarica 3C.

#### 4.1 Metodo di rilevamento delle temperature

Le temperature della simulazione sono state valutate con l'ausilio di 3 rilevamenti puntuali sulla superficie della cella, di cui è stata poi effettuata una media integrale. Questo procedimento si è reso necessario dal momento che anche nelle prove sperimentali sono state utilizzati 3 sensori termocoppie posizionati allo stesso modo per rilevare la temperatura.



**Figura 4.1.** Riferimenti puntuali di temperatura sulla superficie della cella

Come possibile vedere in figura 4.1, i punti sono posti in maniera equidistante dal centro della cella, in modo da avere una stima globale della superficie considerata. Naturalmente questo procedimento è ripetuto per le celle esaminate nelle diverse prove di tutti i modelli.

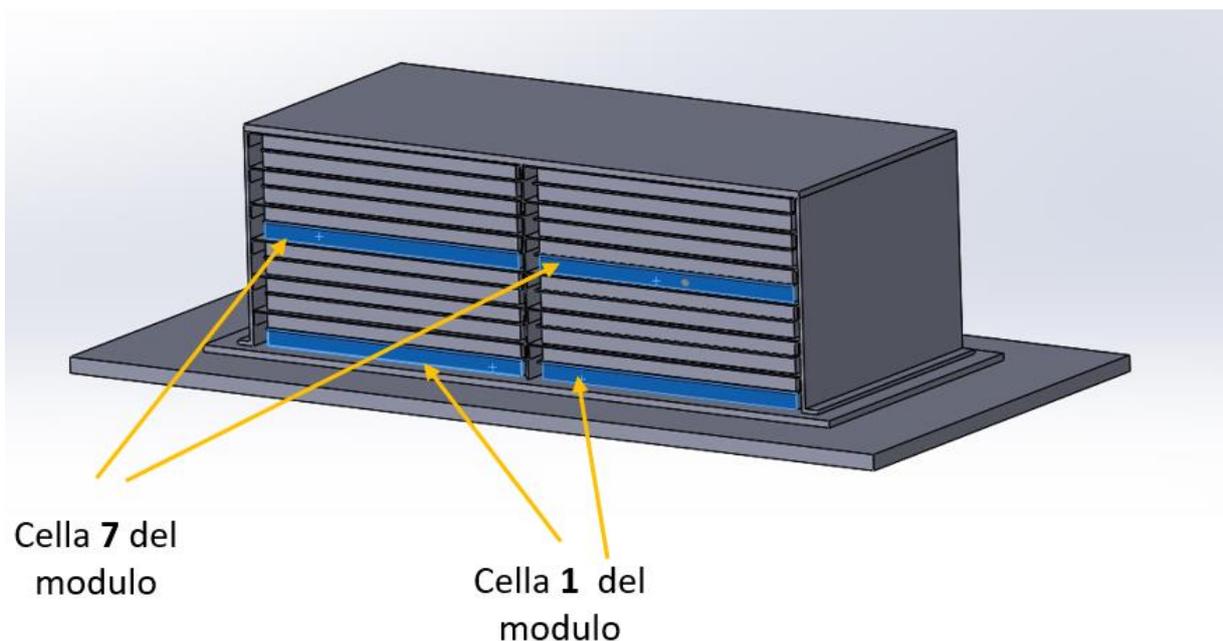


**Figura 4.2.** Vista nel piano yz del modulo

Le temperature, per ogni prova condotta sono state misurate in due celle ben precise, la 1 e la 7, evidenziate nella figura 4.2, considerando una numerazione di ogni coppia di celle simmetriche rispetto al plate centrale dalla 1 alla 12 dal basso verso l'alto.

La cella 7 risulta sia dai dati sperimentali che a seguito delle simulazioni la cella più sollecitata. In quella posizione si ha trasferimento di calore dalle altre celle e gli effetti di raffreddamento per conduzione del cooling plate risulta minimo

Al contrario i dati indicano la cella 1 come quella termicamente meno stressata, essendo quella più vicina al cooling plate. Al fine di valutare le condizioni al contorno e le ipotesi semplificative del modello saranno valutate anche le temperature della suddetta cella. Sarà quindi possibile avere un'analisi più approfondita dell'effetto del cooling plate rispetto alla posizione delle celle nel modulo.



**Figura 4.3.** Modulo simulato con celle studiate in evidenza.

Ricordando che, il modello simulato si riferisce solo a uno dei nove moduli del pacco batteria, e avendo a disposizione le temperature sperimentali di ognuno di loro, sono stati confrontati i valori simulati con quelli del modulo con i valori di temperatura più alti, a parità di celle considerate.

## 4.2 Risultati e validazione del modello

In questo paragrafo saranno mostrati i risultati delle simulazioni delle prove relative al modulo progettato dalla FLAG-ms, e confrontati per le diverse prove di carica a 1C, 2C e scarica a 3C.

Le condizioni iniziali delle temperature nelle celle sono riassunte nella tabella 4.1

Simulazioni svolte	Temperatura iniziale [C°]
Carica 1C	25°C
Carica 2C	40°C
Scarica 3C	25°C

**Tabella 4.1:** Valori di temperatura iniziali delle celle

Questi valori sono stati ricavati dalla media delle temperature del liquido all'interno dei canali.

### 4.2.1 Risultati della prova 1C a temperatura iniziale di 25°C

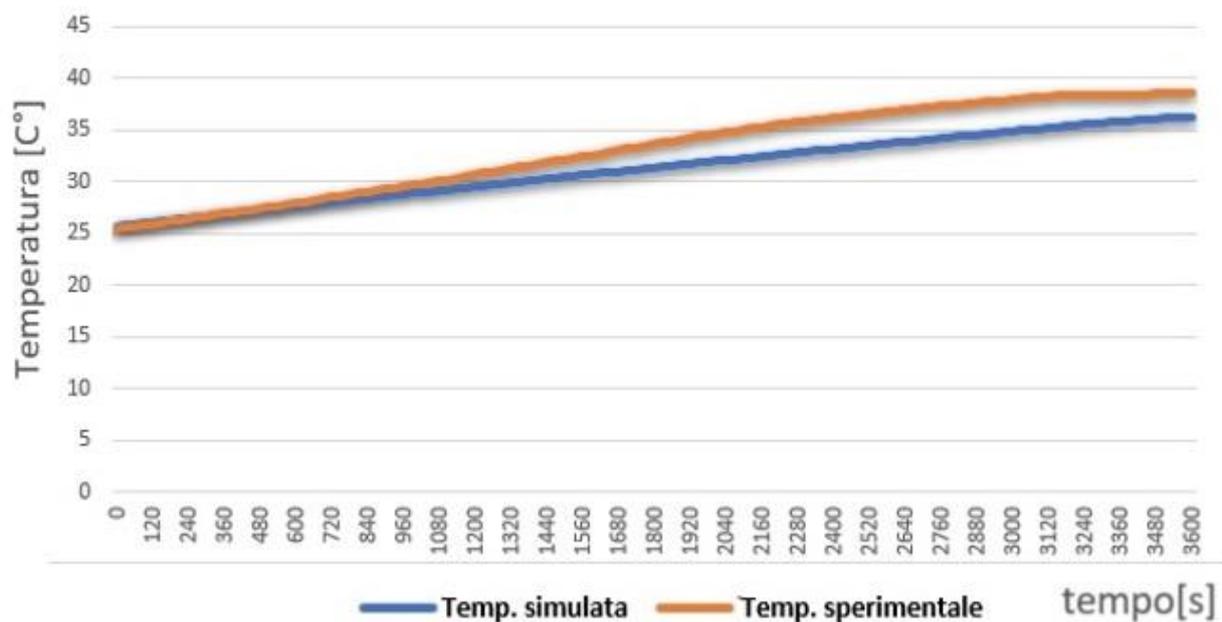
Nel capitolo precedente sono state illustrate le condizioni al contorno del modello, sia per il modulo, sia per il cooling plate. La prova a carica 1C è stata condotta con una temperatura iniziale delle celle di 25°, ovvero nelle stesse condizioni dei test effettuati sul pacco batteria.

Con questo C-rate di carica 1C andremo a valutare la temperatura in condizioni ottimali per ciò che concerne la carica in sicurezza del modulo.

Impostando un time step di 30 secondi, per un totale di 120 intervalli, abbiamo ottenuto una prova di 3600 secondi.

- **Risultati della prova cella 7 al centro del modulo**

Nella figura 4.4 sono riportate gli andamenti delle temperature. La cella 7 come detto all'inizio del capitolo risulta essere, dai valori delle temperature sperimentali, quella termicamente più sollecitata. La simulazione conferma tale dato, e nel confronto tra le temperature del grafico è possibile notare una buona approssimazione della curva simulata rispetto alla sperimentale, che tuttavia raggiunge la stazionarietà con un anticipo di circa 400 secondi(6 minuti e 30) rispetto alla curva simulata.



**Figura 4.4.** Grafico delle temperature cella 7 carica 1C

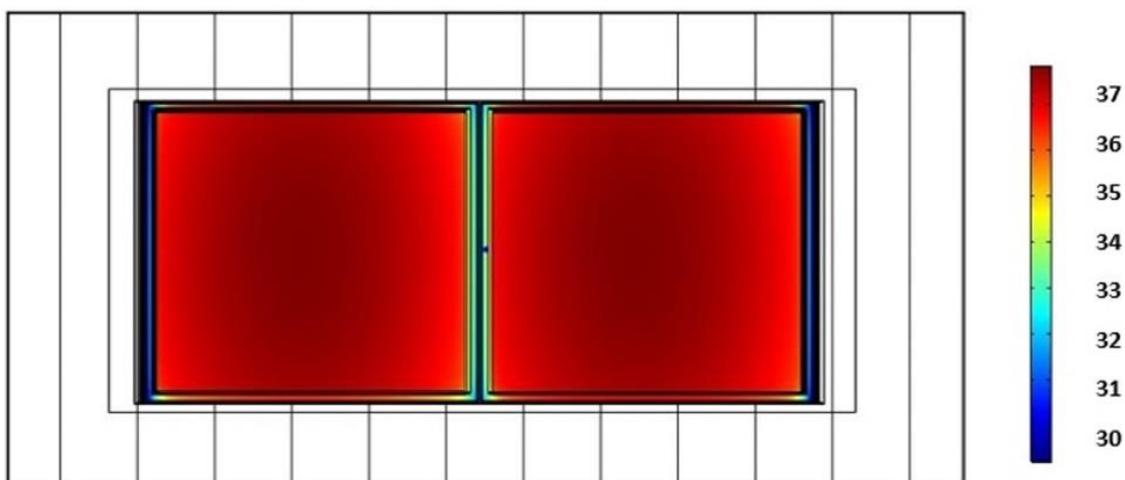
È evidente come le temperature tendano, dall'istante di tempo iniziale fino a 840 secondi (14 minuti), ad avere un andamento pressoché concorde, per poi tracciare due pendenze della curva differenti. La temperature finali presentano una differenza di temperatura di 2.38°C

Temperatura sperimentale	massima	Temperatura massima simulata	Differenza di temperatura
38.54°C		36.16°C	2.38°C

**Tabella 4.2.** Valori finali delle temperature sperimentali e simulate.

Le differenze finali di temperatura sono da attribuire alle ipotesi semplificative fatte nel capitolo precedente. In particolar modo la semplificazione della fisica del cooling ha determinato una maggiore quantità di calore sottratta al modulo nel modello simulato. In aggiunta, la geometria semplificata del modello, avendo ora più superfici continue di scambio termico, ha influito sugli effetti di conduzione termica del case.

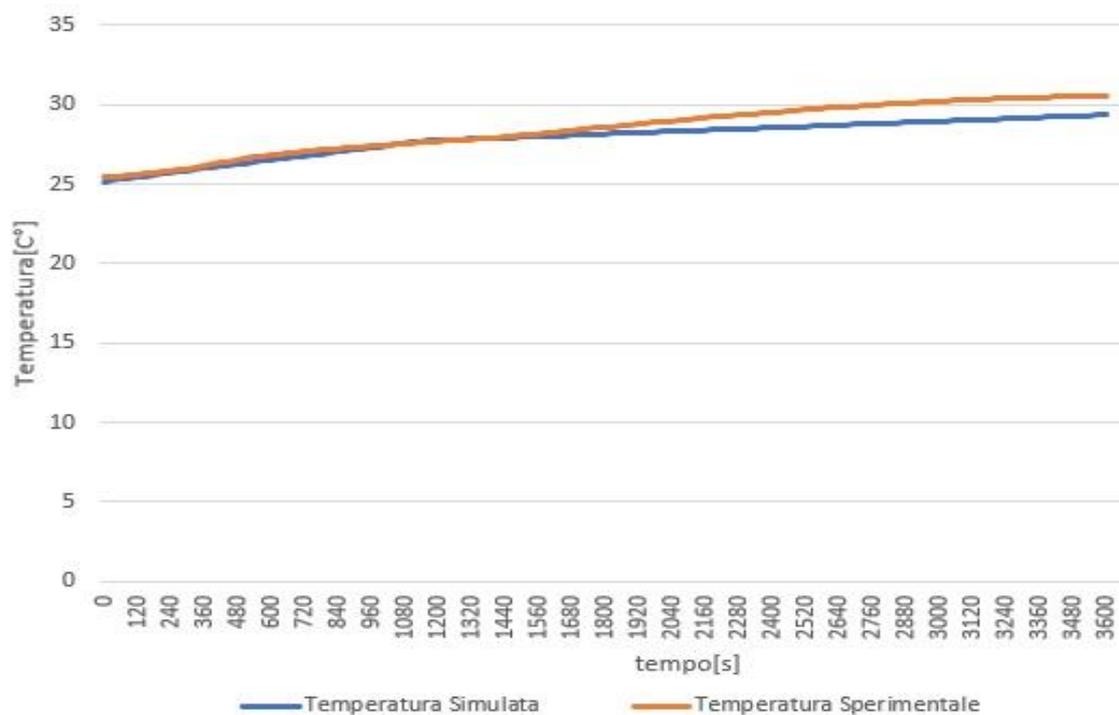
Nella figura 4.5 si può notare come la temperatura sia più elevata al centro delle celle 7 con una speculare distribuzione del calore rispetto al plate centrale. Sui lati esterni le temperature diminuiscono di 0.6°C per gli effetti di conduzione relativi al contatto tra il profilo alettato posizionato tra ogni coppia di celle e i plate laterali.



**Figura 4.5.** Immagine termica delle temperature sulla superficie delle celle 7

- **Risultati della prova celle 1C cella 1 sul cooling plate**

Nel grafico in figura 4.6 sono riportate le temperature sperimentali e simulate

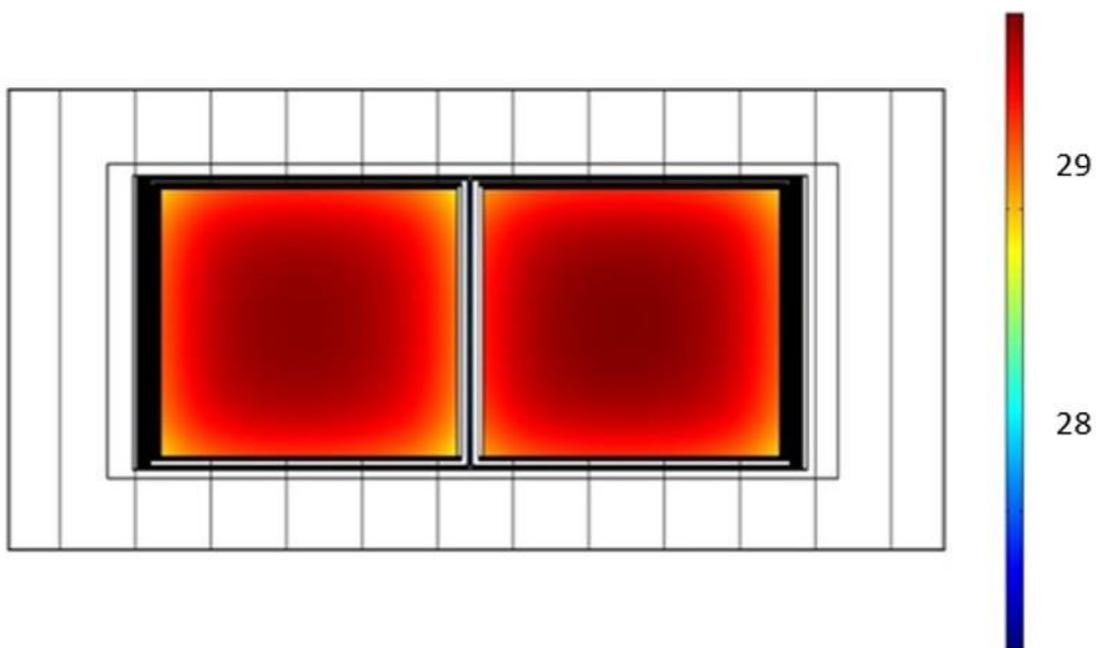


**Figura 4.6** Grafico delle temperature cella 1 carica 1C

Temperatura massima sperimentale	Temperatura massima simulata	Differenza di temperatura
30.96°C	29.37°C	1.59°C

**Tabella 4.3** Valori finali delle temperature sperimentali e simulate.

I risultati ottenuti per la carica 1C sulle celle meno sollecitate termicamente, su una prova condotta a 3600s(un' ora), presentano una minima differenza nella temperatura finale di 1.59°C. Gli effetti del cooling plate sulle celle più vicine risultano essere in linea con quelli della prova sperimentale, così da portare le curve ad una condizione di quasi stazionarietà. Quest'ultima condizione è certamente favorita dalla diminuzione del valore delle correnti all'aumentare dello SoC, determinando un calore estratto dalle celle inferiore rispetto a quello di inizio simulazione.



**Figura 4.7.** Analisi termica delle temperature sulla superficie delle celle 7

La figura 4.7 mostra la distribuzione delle temperature delle celle vicino al cooling. Rispetto alla figura 4.5 della prova precedente, le temperature diminuiscono in prossimità dei lati esterni della cella, sia per la vicinanza al cooling plate, sia per scambio termico favorito dal contatto con le pareti laterali. Quest'ultime presentano, nella loro parte inferiore a contatto con il cooling, temperature più basse, trasferendo quindi maggior calore per conduzione e per effetto della convezione naturale dell'aria.

#### 4.2.2 Risultati della prova 2C a temperatura iniziale di 40°C

La prova a carica 2C è stata condotta con una temperatura iniziale delle celle di 40°, proprio come nei test sperimentali, in modo da avere un confronto corretto dei risultati ottenuti. L'intervallo di tempo analizzato è pari a 1800 secondi, ovvero il tempo necessario per caricare una cella con C-rate pari a 2.

Per questa prova è stato necessario determinare le nuove condizioni di temperatura degli elementi non in tensione del modulo, ovvero delle varie parti di alluminio e del poron. Perciò è stata effettuata una prova 1C senza effetto del cooling, in modo da ricavare le temperature medie iniziali dei vari componenti nell'istante in cui le celle più sollecitate raggiungono 40°C.

Componenti del modulo	Valori iniziali di temperatura[K°]
Cella	313 (40°C)
Plate superiore	309.82 (36.82°C)
Plate laterale	308.28 (35.28°C)
Profilo alettato "C"	311.57 (38.57°C)
Plate inferiore	306.42 (33.42°C)
Plate centrale	308.63 (35.63°C)
Poron	312.1 (39.1°C)

**Tabella 4.4.** Valori iniziali delle temperature dei componenti del case in alluminio

Poiché la prova è condotta alla temperatura iniziale di 40°C anche la temperatura fissa in sostituzione della fisica dei canali di raffreddamento varierà rispetto alla prova 1C come riportato in tabella 4.5.

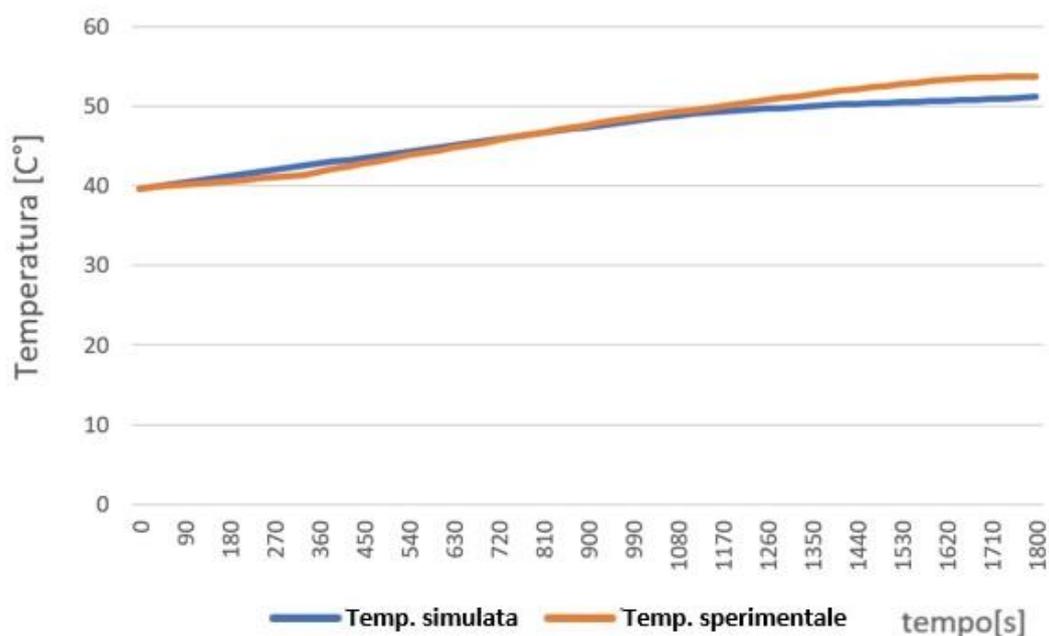
Cooling plate	Valori iniziali di temperatura[K°]
Temperatura fissa nel piano	40.6°C

**Tabella 4.5.** Temperatura imposta sul cooling plate

Nei grafici che seguiranno saranno confrontati gli andamenti dei valori di temperatura della cella 7 maggiormente sollecitata e della 1 posta sul cooling plate, con le temperature sperimentali delle corrispettive celle del modulo.

- **Risultati della prova celle 7 al centro del modulo**

Nel grafico in figura 4.8 sono riportati gli andamenti delle temperature sperimentali e simulate.



**Figura 4.8** Grafico delle temperature cella 7 carica 2C

Temperatura massima sperimentale	Temperatura massima simulata	Differenza di temperatura
52.36°C	51.18°C	1.18°C

**Tabella 4.6.** Valori finali delle temperature sperimentali e simulate.

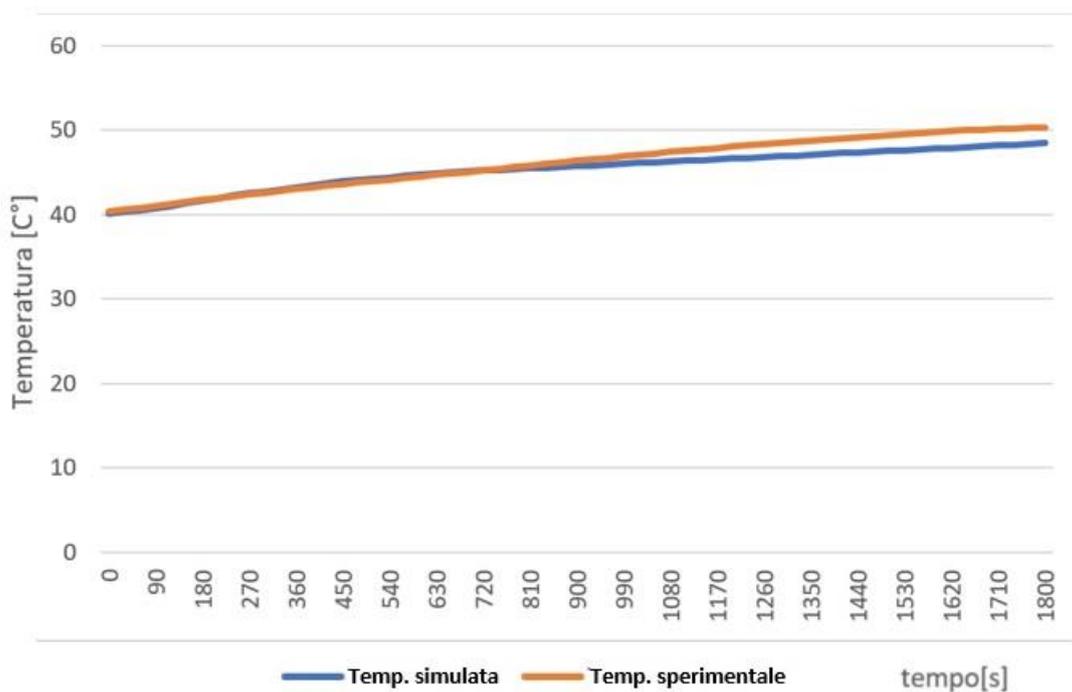
La simulazione presenta la stessa tendenza a discostarsi dopo un certo intervallo di tempo dalla curva sperimentale della prova 1C. La differenza di temperatura finale pari a 1.18°C è minore rispetto alla stessa cella della carica 1C poiché le ipotesi semplificative geometriche del modello hanno influito maggiormente a temperature più alte.

Il cambio di pendenza della curva sperimentale a 360 secondi è dovuto ad un breve intervallo in cui non c'è la registrazione delle temperature da parte dei sensori. Un malfunzionamento che tuttavia risulta influente ai fini del confronto. La curva simulata, anche in questo caso, raggiunge la

stazionarietà prima di quella sperimentale, poiché le ipotesi semplificative della fisica del cooling plate influiscono maggiormente rispetto al caso reale.

- **Risultati della prova celle 1 sul cooling plate**

Nel grafico 4.9 sono riportate le temperature sperimentali e simulate.



**Figura 4.9** Grafico delle temperature cella 1 carica 2C

Temperatura massima sperimentale	Temperatura massima simulata	Differenza di temperatura
50.25°C	48.51°C	1.74°C

**Tabella 4.7.** Valori finali delle temperature sperimentali e simulate.

I risultati ottenuti per la carica 2C su una prova condotta a 1800s(30 minuti) mostrano una differenza finale di temperatura di 1,74°C. La temperatura finale è minore rispetto alle celle termicamente critiche al centro del modulo ma le curve si discostano solo dopo la metà della simulazione. Nella prima parte il modello fino a circa 45° le ipotesi semplificative non sembrano influire, mentre nella seconda parte si evidenzia una differenziazione nei due andamenti.

### 4.2.3 Risultati prova di scarica 3C a temperatura iniziale di 25°C

La prova condotta con scarica 3C è quella che più sollecita termicamente le celle tra quelle proposte, poiché la corrente è in media tre volte superiore a quella in carica 1C, come verificato nel paragrafo sull'analisi termica nel capitolo 3. Di conseguenza il calore prodotto dalle celle è molto più alto rispetto alle prove di carica avendo una dipendenza diretta dalla corrente per effetto Joule.

La simulazione ha una durata di 1200 secondi e il time step è di 30 secondi.

Le condizioni iniziali della prova sono state condotte con i valori iniziali della prova a 1C, sia del modulo che del cooling.

- **Risultati della prova celle 7 al centro del modulo**

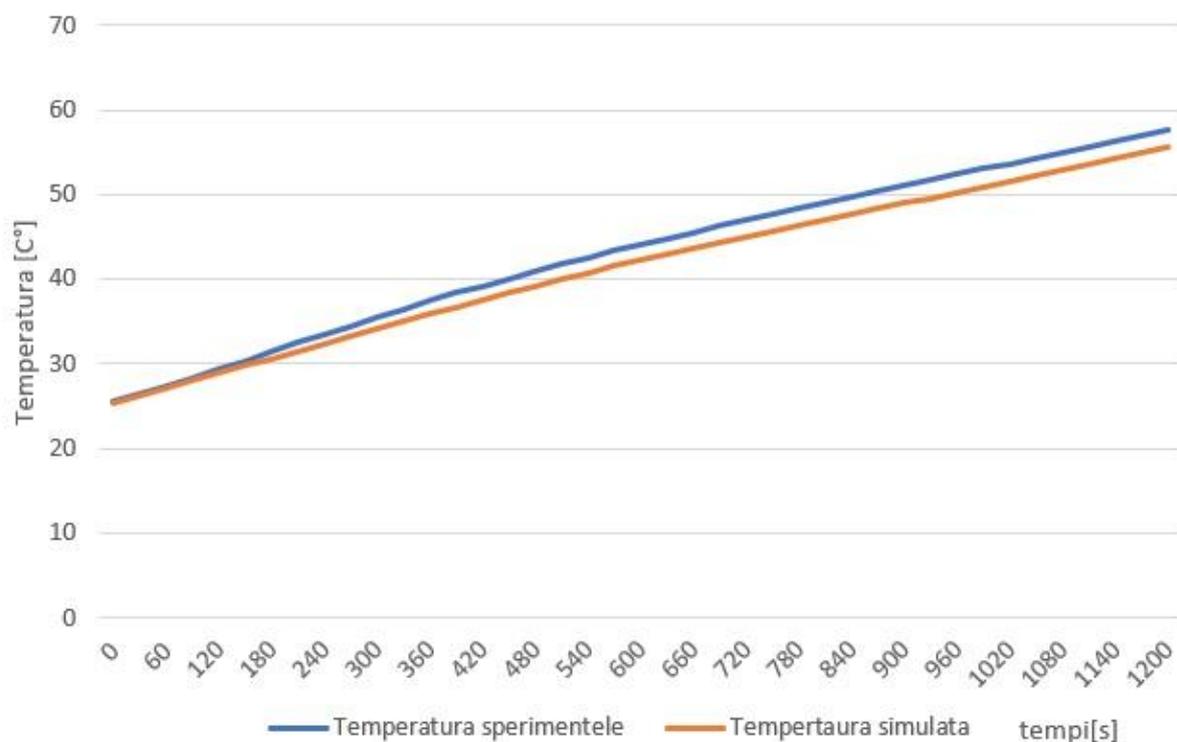


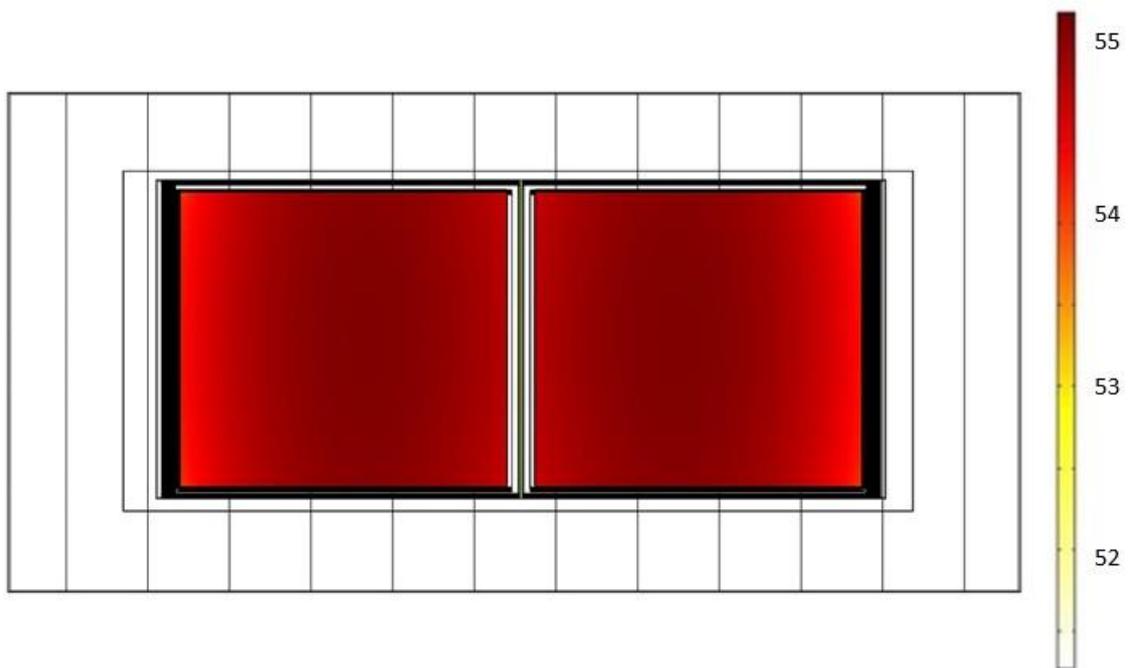
Figura 4.10 Grafico delle temperature cella 7 scarica 3C

Temperatura massima sperimentale	Temperatura massima simulata	Differenza di temperatura
58.14°C	55.55°C	2.59°C

Tabella 4.8. Valori finali delle temperature sperimentali e simulate.

Le temperature, sia sperimentali che simulate, tendono ad essere, al termine della prova lontano dalla stazionarietà, in linea con la potenza termica generata dalle celle. Nuovamente la curva simulata approssima bene quella sperimentale ,ma con una differenza di temperatura di  $2.59^{\circ}\text{C}$ , da attribuire alle ipotesi semplificative imposte al modello.

La dissipazione termica in questo caso è meno efficace rispetto alle altre prove, poiché il calore prodotto dalle celle è molto più intenso, e concentrato in tempi molto ristretti (20 minuti).

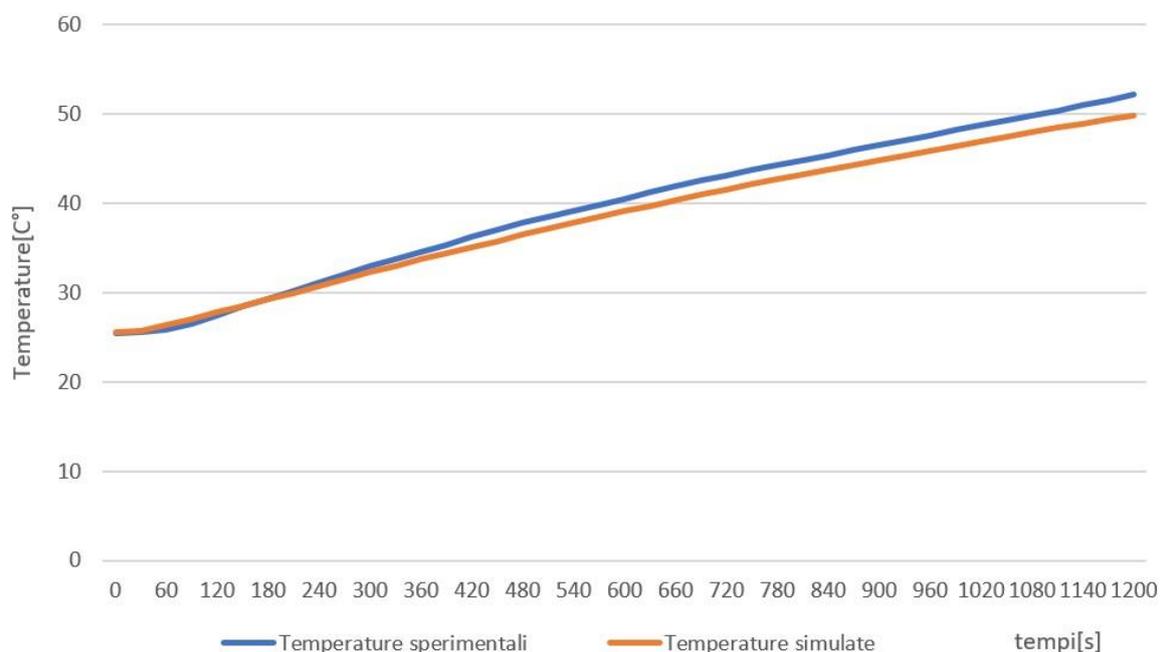


**Figura 4.11.** Immagine termica delle temperature sulla superficie delle celle 7

In figura 4.11 viene rappresentata la distribuzione della temperature sulle celle considerate. Essendo quelle più sollecitate termicamente l'immagine mostra una diminuzione dei valori simulati solo in prossimità dei plate laterali, dove è presente uno scambio termico per convezione dei plate con l'aria esterna. Le maggiori temperature sono presenti al centro delle celle, con valori massimi di  $55^{\circ}\text{C}$

- **Risultati della prova celle 1 sul cooling plate**

Nel grafico 4.12 sono riportate le temperature sperimentali e simulate



**Figura 4.12** Grafico delle temperature cella 1 scarica 3C

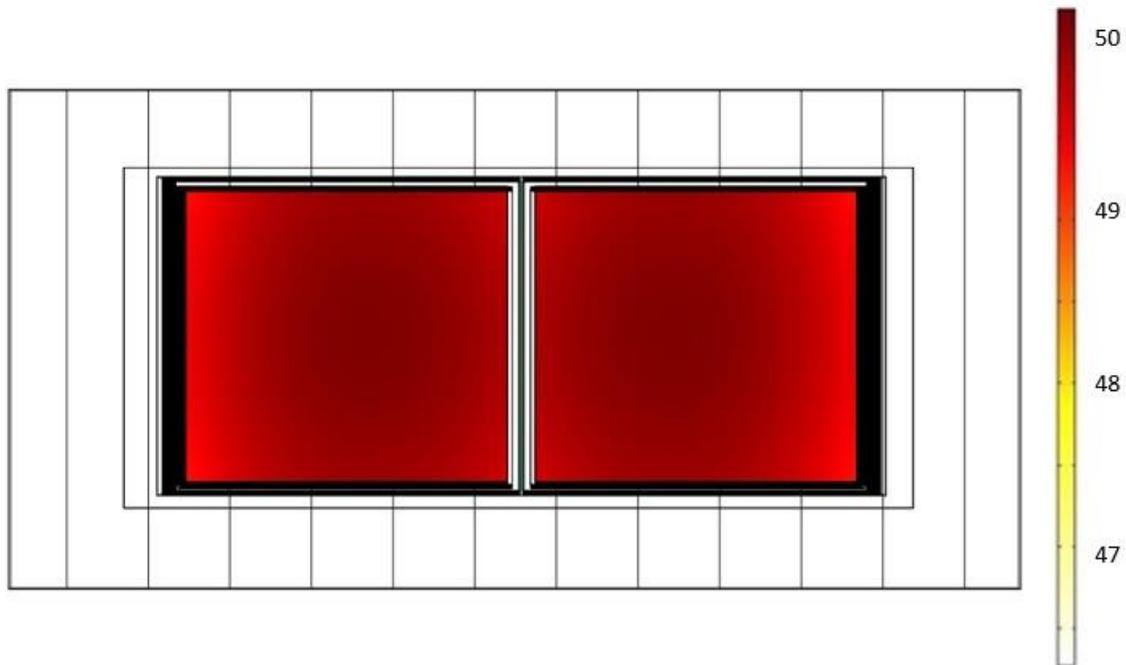
Temperatura massima sperimentale	Temperatura massima simulata	Differenza di temperatura
52.14°C	49.77°C	2.37°C

**Tabella 4.9.** Valori finali delle temperature sperimentali e simulate.

Le curve si discostano dopo circa 360s (6 minuti), con le temperature simulate che si mantengono inferiori per tutta la durata della simulazione. Da notare come la curva sperimentale impieghi più tempo a salire nei primi minuti, mentre la simulata inizia a crescere prima. Questo è dovuto sia alla potenza termica del modello, di cui si considera solo la resistenza interna, sia ai materiali della cella, che nello studio simulato sono stati considerati con una conducibilità termica omogenea di 5.22 W/m\*K.

L'intervallo di temperatura finale di 2,37°C è molto simile a quello ricavato dalla cella 7 più sollecitata, per cui la simulazione, nelle sue condizioni al contorno e condizioni iniziali imposte, ricalca nei risultati l'andamento della curva di temperatura della cella al centro del modulo.

La successiva immagine in figura 4.13 mostra l'andamento delle temperature sulla superficie delle celle 1.



**Figura 4.13** Immagine termica delle temperature sulla superficie delle celle 1

L'immagine termica mostra come la zona più scura al centro della cella sia meno estesa rispetto alle celle più sollecitate in figura 4.11. Le zone in cui la temperatura risulta minore sono la zona esterna, dove abbiamo un trasferimento termico a seguito degli effetti di convezione sul plate laterale, e quella centrale, dove il plate tra le celle presenta temperature minori essendo più vicino al cooling plate.

## Capitolo 5

### Modelli alternativi di disposizione delle celle

La seconda parte dello studio si è concentrata sulla progettazione di due varianti del modulo originario, con l'obiettivo di assemblare le celle in maniera tale da avere una migliore propagazione del calore generato da quest'ultime, pur mantenendo le condizioni iniziali, le condizioni al contorno e le ipotesi semplificative già descritte nel capitolo 4.

Lo scopo sarà quindi quello di confrontare le celle più sollecitate dei nuovi moduli con quella della cella più sollecitata del modulo FLAG-ms simulato, ovvero delle celle 7, così da determinarne le differenze in termini di temperature critiche

#### 5.1 Modello alternativo del modulo batteria A

A seguito di un processo di design review la nuova struttura del modulo presenta un significativo cambiamento nella disposizione delle celle, con un allineamento verticale delle stesse e perpendicolari al piano del cooling plate.

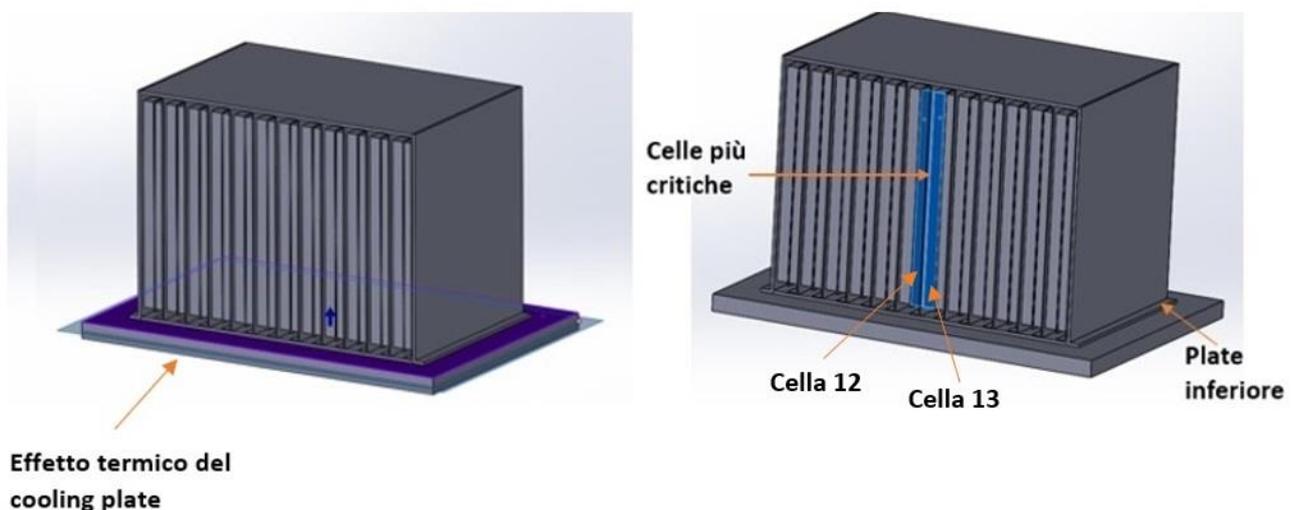
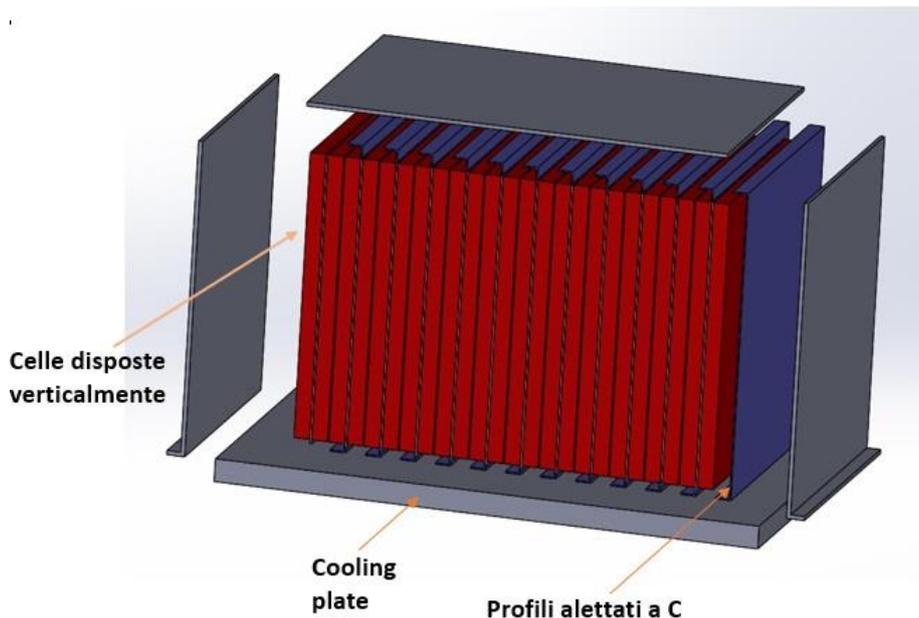


Figura 5.1. Modulo A con nuova disposizione delle celle

Nella figura 5.1 le celle evidenziate in blu risultano essere le più sollecitate a seguito della simulazione. Le 24 celle restano collegate elettricamente come il modulo precedente, così da avere lo stesso calore generato dal passaggio della corrente nella resistenza.

Nell'esplosione in figura 5.2 si può apprezzare la nuova disposizione delle celle (in rosso), intervallate dal profilo alettato (in blu), in contatto con il plate superiore e inferiore. Quest'ultimo a sua volta è alloggiato sul cooling plate.



**Figura 5.2.** Vista esplosa del Modulo A in tutti i suoi componenti

Dal punto di vista dimensionale, in tabella 5.1, vengono riportati il volume del modulo A e quello del modello FLAG-ms. Il volume è aumentato di circa il 3%, dovuto al nuovo assemblaggio del case esterno in alluminio.

<b>Dimensioni</b>	<b>Dimensione modulo A</b>	<b>Dimensione modulo FLAG-ms</b>
<b>Lunghezza</b>	310.8mm	453mm
<b>Larghezza</b>	200mm	200mm
<b>Altezza</b>	226mm	149.4mm
<b>Volume Totale</b>	14048cm <sup>3</sup>	13590cm <sup>3</sup>

**Tabella 5.1.** Parametri dimensionali dei due moduli a confronto

Come vedremo dai risultati riportati nei prossimi due paragrafi, questo modulo raggiunge temperature massime meno elevate, favorendo la dispersione termica del calore generato dalle celle, grazie ai diversi punti di contatto tra quest'ultime, il case in alluminio e il cooling plate.

### 5.1.1 Risultati della prova 1C a temperatura iniziale di 25°C

La celle termicamente più sollecitate si trovano esattamente al centro del modulo e verranno indicate con cella 12 e cella 13. Avendo registrato tra le due gli stessi andamenti di temperatura ci limiteremo ad analizzare solo la cella 12.

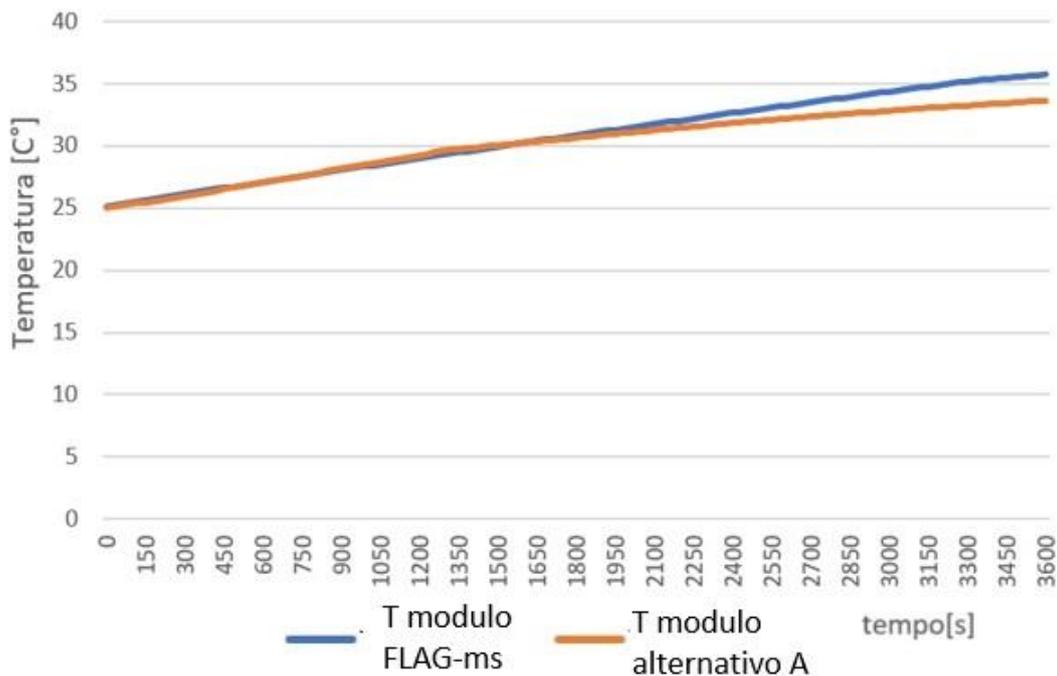


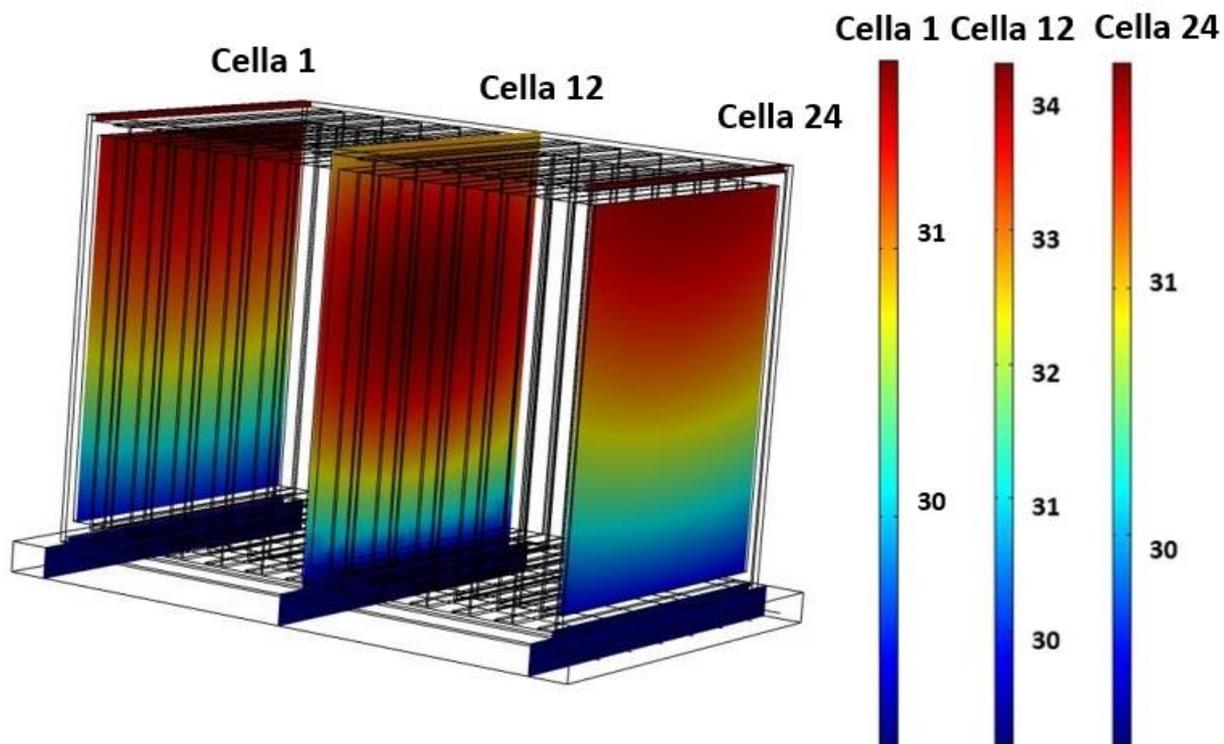
Figura 5.3. Grafico delle temperature cella 12 carica 1C

Temperatura massima simulata Modulo A	Temperatura massima simulata Modulo FLAG-ms	Differenza di temperatura
33.64°C	36.16°C	2.52 °C

Tabella 5.2. Valori finali delle temperature simulate dei due moduli.

Il grafico in figura 5.3 mostra come la temperatura del nuovo modello A sia più performante dal punto di vista della dissipazione termica. Infatti, le curve sono pressoché sovrapponibili fino a 31°C per poi avere un decremento della temperatura. La miglior dissipazione associata a delle temperature meno elevate risiede nei maggiori punti di contatto della cella con il cooling. Il calore viene trasferito con l'ausilio del profilo alettato a "C" che a differenza del modulo originario poggia per ogni coppia di cella sul plate inferiore.

Possiamo quindi definire una maggiore influenza della trasmissione per conduzione tra le celle e il cooling plate rispetto al modello originario.



**Figura 5.4.** Analisi termica delle temperature sulla superficie delle celle 1-12-24

Temperatura massima Cella 1	Temperatura massima Cella 12	Temperatura massima Cella 24
31.47	33.64	31.67

**Tabella 5.3.** Valori finali delle temperature sulle celle 1,12 e 24

La figura 5.4 mostra l'andamento delle temperature sulla superfici della cella centrale rispetto a quelle laterali. La cella 12, più sollecitata, raggiunge temperature più alte nell'ordine dei 3°C rispetto alle celle laterali. Da notare come le celle 1 e 24 dissipino meglio il calore a fronte del contatto con i plate laterali, per i quali la dissipazione del calore avviene tramite convezione.

### 5.1.2 Risultati della prova 2C a temperatura iniziale di 40°C

Per questa prova, come in quella 2C del modulo FLAG-ms, sono determinate le nuove condizioni di temperatura degli elementi di alluminio del case e del Poron. Anche in questo caso è stata effettuata una simulazione in modo da ricavare le temperature medie iniziali nell'istante in cui le celle raggiungono i 40°C, utilizzando un profilo di corrente adeguato. I dati sono riportati in tabella 5.4.

Componenti del modulo	Valori iniziali di temperatura[K°]
Cella	313 (40°C)
Plate superiore	310.47 (37.47°C)
Plate laterale	306.49 (33.49°C)
Profilo alettato "C"	311.04 (38.04°C)
Plate inferiore	306.68 (33.68°C)
Poron	311.56 (38.76°C)

**Tabella 5.4** Valori iniziali delle temperature dei componenti del case in alluminio

Poiché la prova è condotta alla temperatura iniziale di 40°C anche la temperatura fissa in sostituzione della fisica dei canali di raffreddamento varierà rispetto alla prova 1C come riportato in tabella.

Cooling plate	Valori iniziali di temperatura[C°]
Temperatura fissa nel piano	40.6°C

**Tabella 5.5.**Temperatura imposta sul cooling

Durante questa prova dovremo tener conto della diminuzione di corrente nella fase finale della simulazione. Arrivati a un determinato limite di stato di carica della batteria la potenza termica generata diminuisce e con essa le temperature della cella. Di conseguenza il modello avrà una dissipazione termica maggiore con un conseguente cambiamento della pendenza della curva

Il grafico in figura 5.5 mostra come nuovamente ci sia un abbassamento, seppur lieve delle temperature del modulo A rispetto al modulo simulato FLAG-ms. La differenza finale tra le 2 curve è ora di 1.33°C.

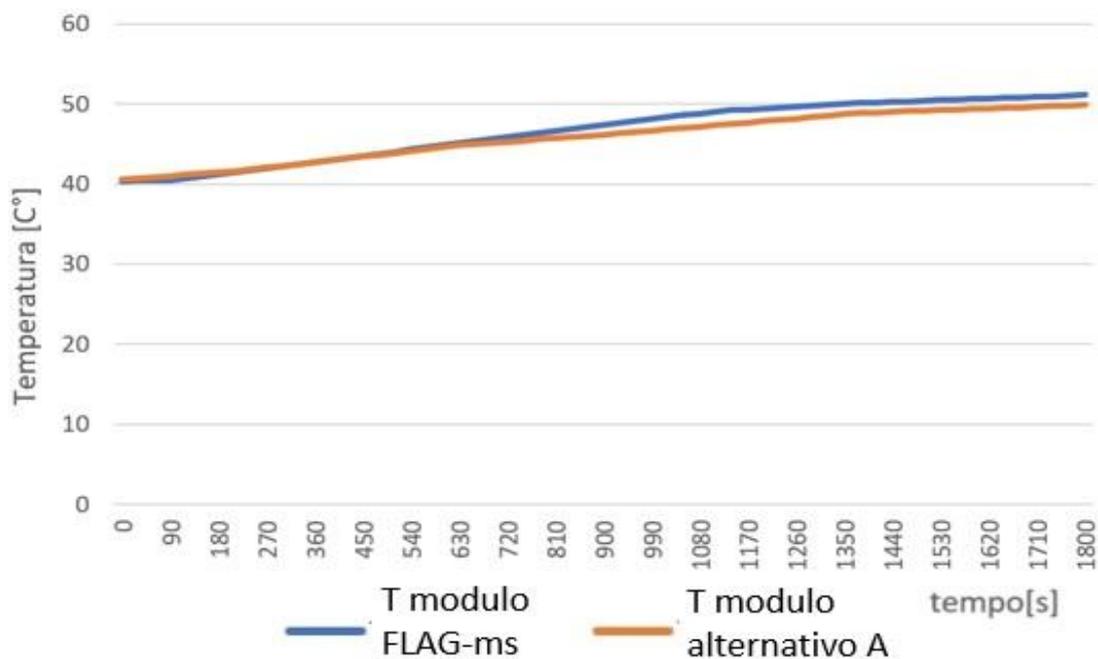


Figura 5.5. Grafico delle temperature cella 12 carica 2C

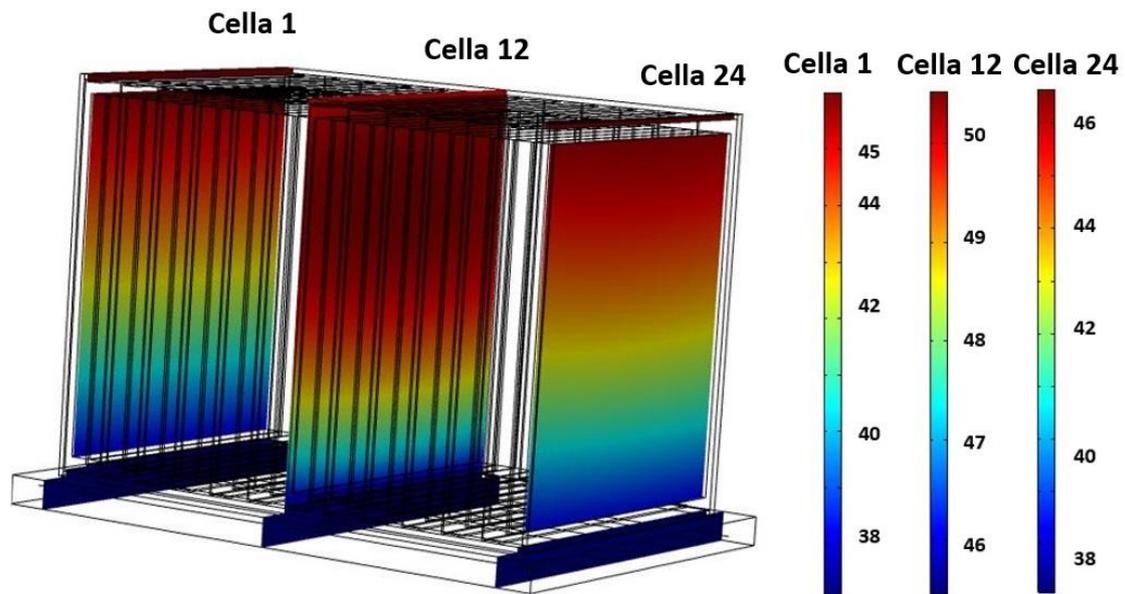
Temperatura massima simulata Modulo A	Temperatura massima simulata Modulo FLAG-ms	Differenza di temperatura
49.85°C	51.18°C	1.33°C

Tabella 5.6. Valori finali delle temperature simulate dei due moduli.

Come nelle precedenti simulazioni a carica 2C, anche in questo caso l'andamento delle temperatura tenderà alla stazionarietà prima rispetto alla prova 1C. Di nuovo l'andamento della corrente che andrà a diminuire dopo circa 200 secondi determinerà anche un abbassamento della potenza termica generata, come mostrato nel paragrafo relativo all'analisi termica del modulo.

Nel confronto tra le due curve il miglioramento dell'andamento della temperatura del modulo A decreta un miglior dissipamento termico. Le proprietà conduttive del cooling svolgono di nuovo un ruolo importante essendo a contatto con la base inferiore di tutte le celle, mentre la convezione sul case esterno migliora le condizioni delle celle laterali, favorendo un delta termico con le celle al centro nell'ordine dei 4°C.

Le temperature delle celle 1,12 e 24 sono riportate in figura 5.6.



**Figura 5.6.** Analisi termica delle temperature sulle superfici delle celle 1,12 e 24.

Temperatura massima Cella 1	Temperatura massima Cella 12	Temperatura massima Cella 24
45.34°C	49.85°C	45.97°C

**Tabella 5.6.** Valori finali delle temperature sulle celle 1,12 e 24

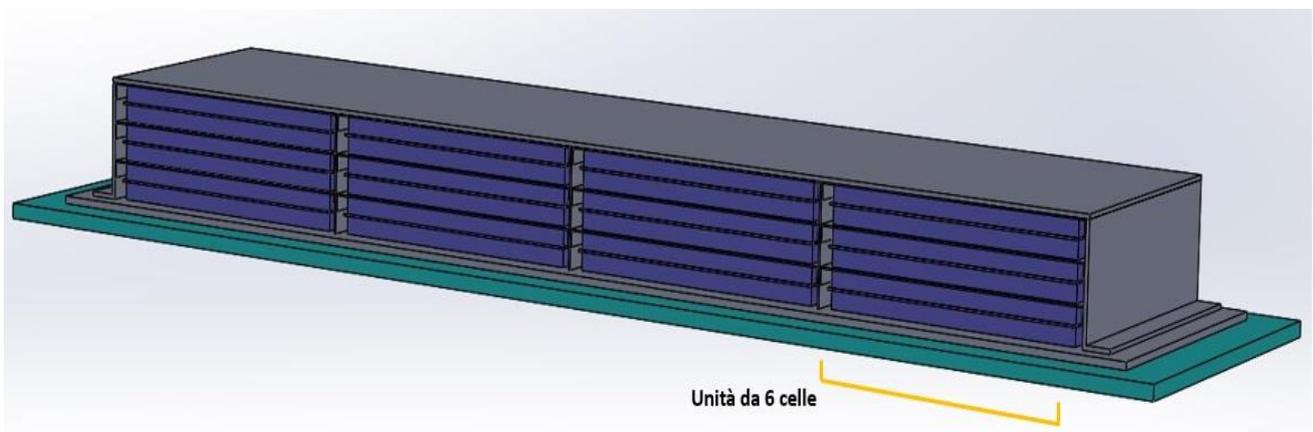
L'immagine termica ci mostra di nuovo come la distribuzione delle temperature raggiunga il massimo nella cella centrale, mentre ai lati la distribuzione del calore risulta simmetrica, con una variazione di temperatura tra le due celle laterali di 0.63°C.

Il cooling plate ha una grande influenza in termini di dispersione del calore. L'immagine indica come tutta la parte bassa delle tre celle sia influenzata dall'effetto di raffreddamento del plate, facendo registrare in quella zona le temperature minori sulla superficie delle celle.

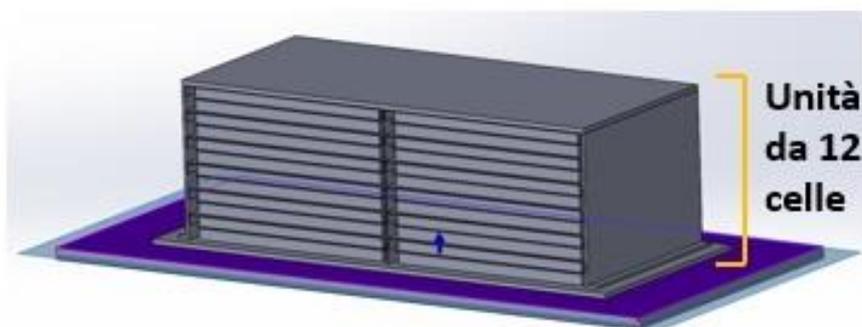
## 5.2 Modello alternativo B del modulo batteria

Il modello ha visto la rivisitazione del modulo e della struttura di impacchettamento delle celle. La disposizione presenta un allineamento delle celle simile a quella del modulo originario. Sono ora impacchettate in “unità” composte da 6 celle e non più 12 come in precedenza. Le ipotesi semplificative restano le stesse, così come le condizioni iniziali delle prove 1C e 2C.

Il fine di questo modello è stato quello di trovare una disposizione delle celle che desse continuità al modello originario, senza stravolgere il design originale, come successo nel modulo alternativo A. Mantenendo la stessa configurazione elettrica nel collegamento, viene mantenuta anche la stessa potenza termica delle celle e le stesse condizioni di raffreddamento del cooling plate.



**Figura 5.7** Modello 3D del modulo B composto da 4 unità da 6 celle ciascuna



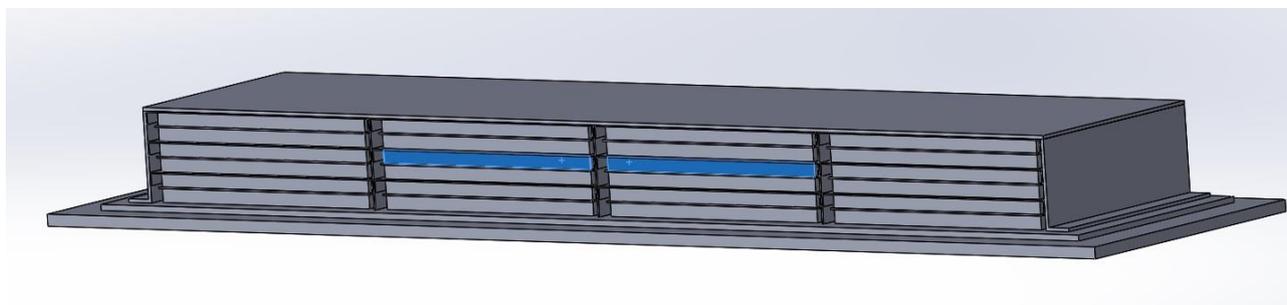
**Figura 5.8.** Modello 3D FLAG-ms composto da 2 unità da 12 celle

Dal punto di viste degli ingombri abbiamo ovviamente un aumento di lunghezza, l'altezza diminuisce sensibilmente, mentre la larghezza del modulo resta invariata.

Dimensioni	Dimensione modulo B	Dimensione modulo FLAG-ms
Lunghezza	980 mm	453mm
Larghezza	200mm	200mm
Altezza	73.2mm	149.4mm
Volume totale	14347cm <sup>3</sup>	13499cm <sup>3</sup>

**Tabella 5.7.** Parametri dimensionali dei due moduli a confronto

Questa configurazione delle celle permette un sostanziale miglioramento della dissipazione per conduzione del cooling plate. Avendo ora 6 celle per ogni unità, quelle in basso registreranno un aumento della dissipazione per conduzione, mentre quelle in alto saranno influenzate dalla convezione naturale tra il plate superiore e l'aria a condizione ambiente. Le celle maggiormente sollecitate a seguito della simulazione sono quelle evidenziate nella figura 5.9.

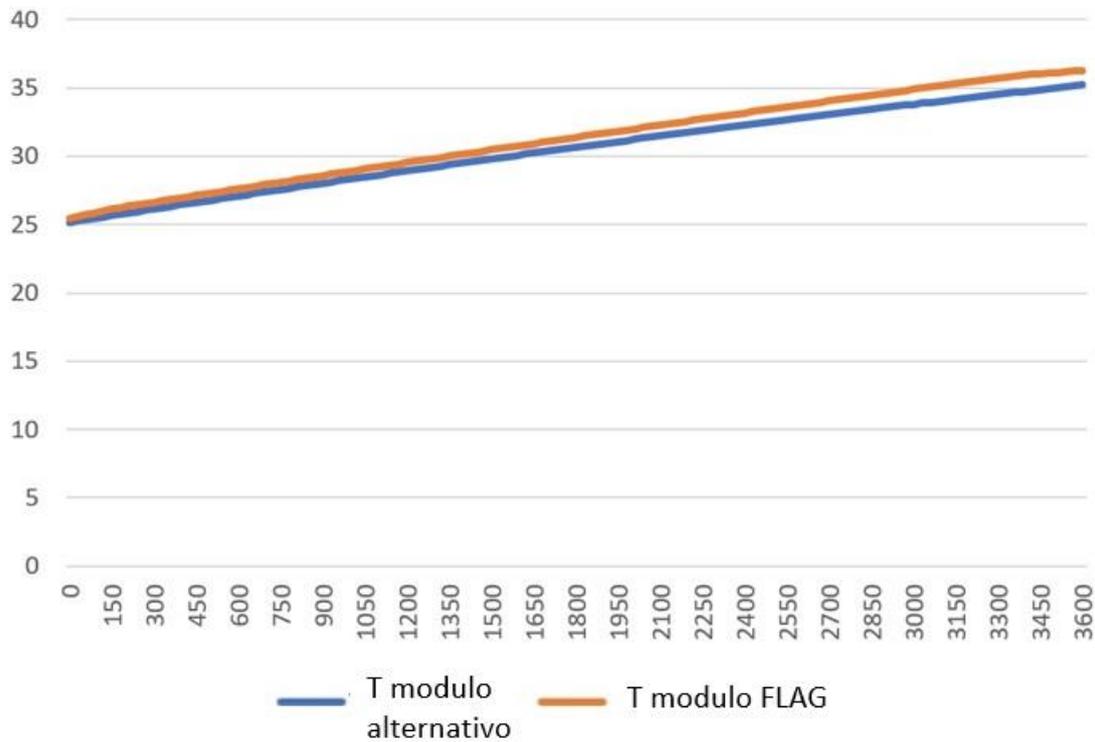


**Figura 5.9.** Celle maggiormente sollecitate termicamente in evidenza al centro del modulo

Questo generale aumento della dissipazione determinerà un decremento delle temperature nelle celle evidenziate più sollecitate, che risulterà maggiore rispetto alla prova simulata sul pacco FLAG-ms.

## 5.2.1 Risultati della prova 1C a temperatura iniziale di 25°C

Nel grafico in figura 5.10 sono riportate le temperature sperimentali e simulate.

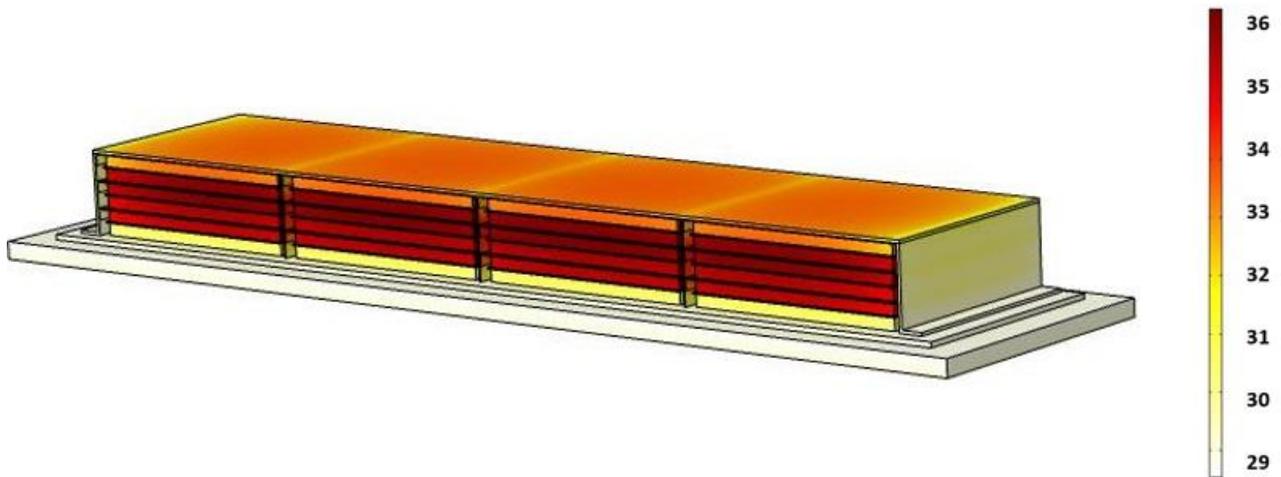


**Figura 5.10.** Grafico delle temperature della cella maggiormente sollecitata in carica 1C

Temperatura massima simulata Modulo B	Temperatura massima simulata Modulo FLAG-ms	Differenza di temperatura
35.08°C	36.16°C	1.06°C

**Tabella 5.8.** Valori finali delle temperature simulate dei due moduli.

Il grafico mostra come la curva del modello B del pacco approssimi quella del modulo originario fino a circa 2000 secondi (33 minuti), mentre in seguito la temperatura della cella simulata si discosta, fino alla temperatura finale di 35.08°C.



**Figura 5.11.** Immagine termica della temperature nel modulo in carica 1C

L'immagine in figura 5.11 mostra l'andamento delle temperature sull'intero modulo. L'influenza del cooling è evidente per le celle più in basso e arriva anche alle celle superiori. La trasmissione del calore per convezione naturale tra il plate superiore e l'aria favorisce un abbassamento delle temperature delle celle superiori, mentre i plate laterali riescono a dissipare calore per effetto della convezione e per effetto dell proprietà di conduzione termica del cooling plate.

## 5.2.2 Risultati della prova 2C a temperatura iniziale di 40°C

Per questa prova come in quella 2C è necessario determinare le nuove condizioni di temperatura degli elementi di alluminio del case e del Poron. Anche in questo caso è stata effettuata una prova 1C in modo da ricavare le temperature iniziali nell'istante in cui le celle hanno raggiunto i 40°C, utilizzando un profilo di corrente adeguato. I dati sono riportati in tabella 5.9.

Componenti del modulo	Valori iniziali di temperatura[K°]
Cella	313 (40°C)
Plate superiore	310.23. (37.47°C)
Plate laterale	307.31 (34.31°C)
Profilo alettato "C"	311.13 (38.13°C)
Plate inferiore	305.17 (32.17°C)
Poron	311.86 (38.86°C)

**Tabella 5.9.** Valori iniziali delle temperature dei componenti del case in alluminio

La temperatura fissa impostata sul piano medio del cooling plate è riportata in tabella 5.10.

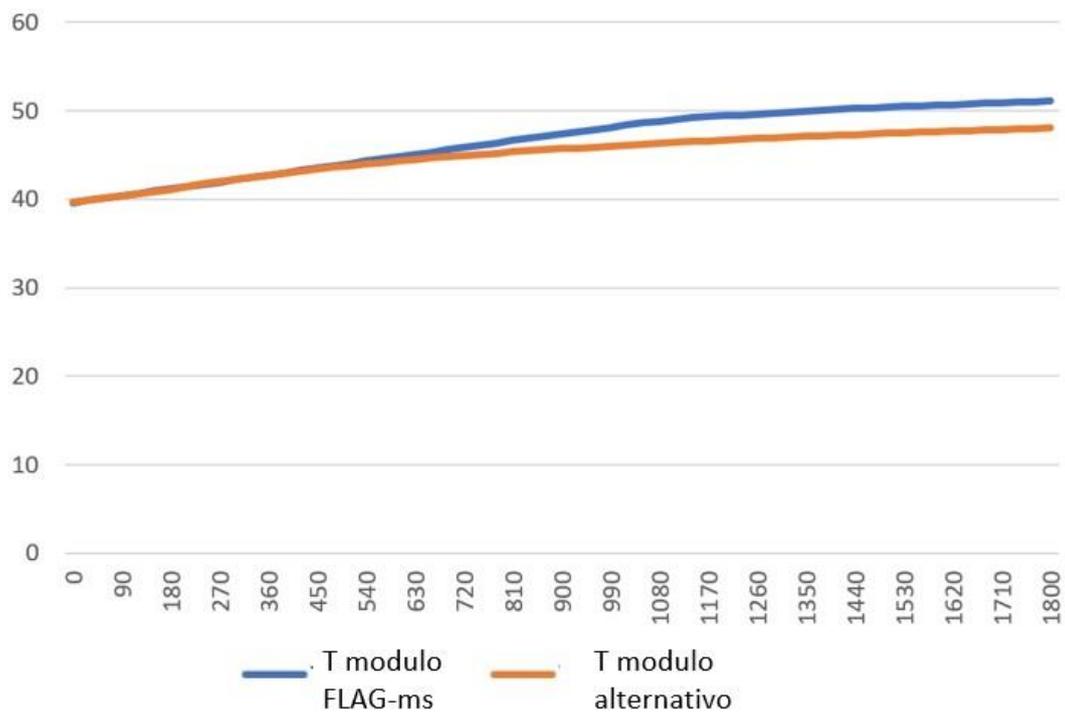
Cooling plate	Valori iniziali di temperatura[C°]
Temperatura fissa nel piano	40.6°C

**Tabella 5.10.** Temperatura imposta sul cooling

In figura 5.12 sono riportati gli andamenti delle temperature nelle celle centrali mostrate all'inizio del paragrafo. Come per le precedenti prove le curve raggiungono una stazionarietà derivante da un calo della potenza termica direttamente legato all'abbassamento delle correnti. Quest'ultime si abbassano conseguentemente all'aumento dello stato di carica (SoC) della cella, permettendo al sistema di raffreddamento del modulo di avere maggiore efficacia su fonti di sorgenti di calore più basse.

La differenza di temperatura finale tra il modulo con unità da sei celle e quello progettato dalla FLAG-ms è di 3.15°C, a dimostrare come il modulo B dissipi calore in modo più efficiente.

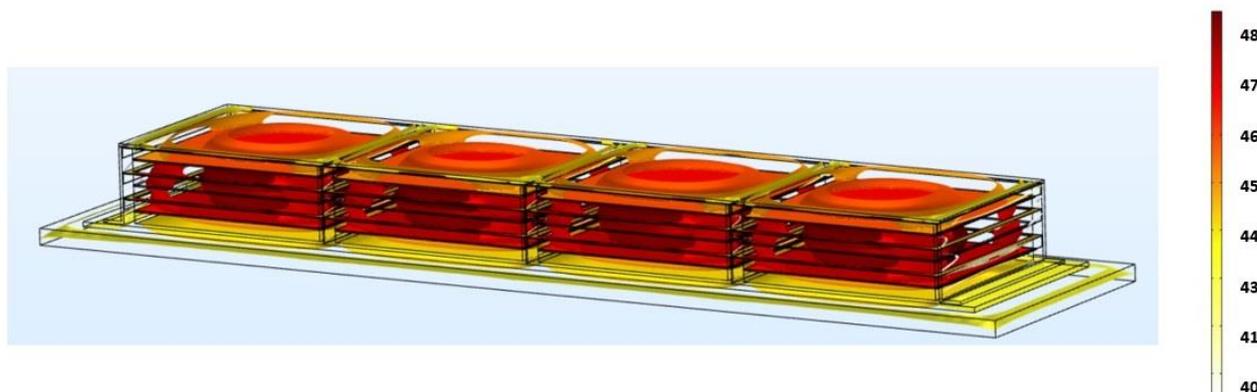
Gli andamenti delle temperature su un intervallo di 1800 secondi è mostrato sono mostrati nel grafico in figura 5.12.



**Figura 5.12.** Grafico delle temperature della cella maggiormente sollecitata in carica 1C

Temperatura massima simulata Modulo A	Temperatura massima simulata Modulo FLAG-ms	Differenza di temperatura
48.03°C	51.18°C	3.15°C

**Tabella 5.11.** Valori finali delle temperature simulate dei due moduli



**Figura 5.13.** Immagine termica della temperature nel modulo in carica 2C

La figura 5.13 mostra la distribuzione del calore all'interno del modulo a simulazione ultimata e le temperature raggiunte nei vari componenti. Si noti come le temperature scendano per effetto di

conduzione sul cooling plate, mentre i valori più alti siano raggiunte nelle colonne di celle centrali del modulo considerato .

### 5.3 Analisi comparativa dei modelli

La progettazione di due nuovi moduli A e B, a partire dal modulo di originario ideato dall'azienda FLAG-ms, aveva come scopo quello di valutare se, un cambiamento nella disposizione delle celle e di conseguenza anche del case esterno, avrebbe comportato un miglioramento o un peggioramento nelle temperature più critiche del modulo.

Come abbiamo visto per i singoli casi dei moduli A e B in entrambi sono stati fatti registrare miglioramenti nell'ambito della trasmissione del calore, a parità di condizioni al contorno e di ipotesi semplificative.

Nel grafico 5.14 è riportato il grafico del confronto tra i 3 moduli nella prova a carica 1C con temperatura iniziale di 25°C

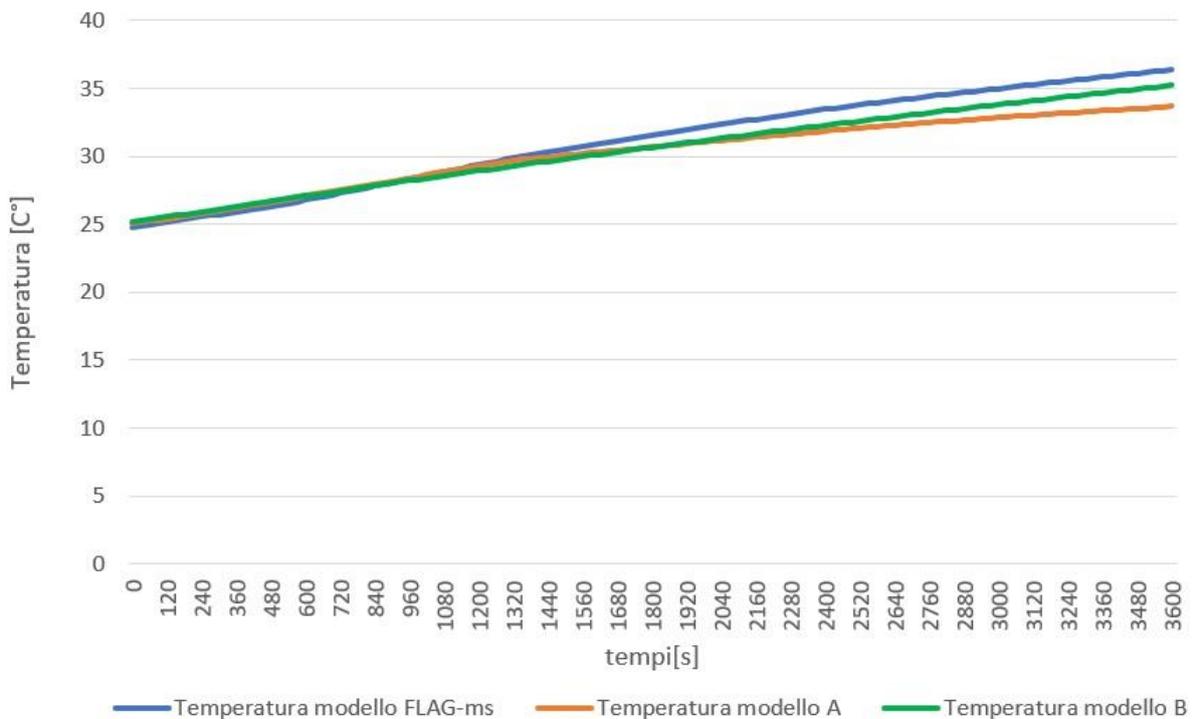
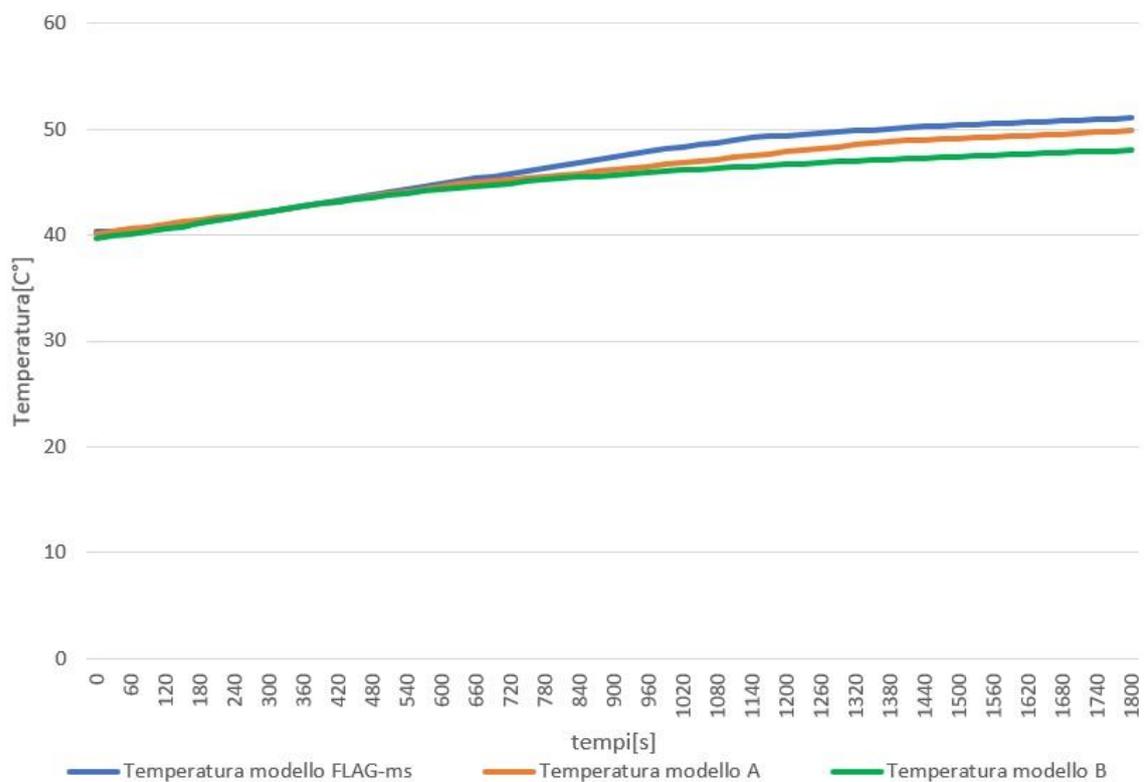


Figura 5.14. Confronto tra le gli andamenti delle temperature tra i 3 moduli in carica 1C

Carica 1C con temperatura iniziale di 25°C		
Temperatura massima modulo Flag-ms	Temperatura massima modulo A	Temperatura massima modulo B
36.16°C	33.64°C	35.08°C

**Tabella 5.12** Valori finali delle temperature sperimentali e finali

Il grafico in figura 5.14 mostra come il modulo A abbia fatto registrare un maggiore abbassamento delle temperature rispetto al modulo B. Questo decremento è dovuto al contatto che tutte le celle hanno tramite l'appoggio sui profili alettati a C, determinando una dispersione maggiore del calore rispetto al modulo A, e all'efficienza del cooling plate che mantiene una temperatura fissata di 25.7°C. Tuttavia nella prova a carica 2C è il modulo B a registrare una miglior curva di temperature rispetto al modulo A con una temperatura finale a 1800 secondi(30 minuti) di 48.03°C contro 49.58°C.



**Figura 5.15.** Confronto tra le gli andamenti delle temperature tra i 3 moduli in carica 2C

Carica 2C con temperatura iniziale di 40°C		
Temperatura massima modulo Flag-ms	Temperatura massima modulo A	Temperatura massima modulo B
51.18°C	49.85°C	48.03°C

**Tabella 5.13**

Risulta chiaro come ad alte temperature, poiché la temperatura iniziale della prova è di 40°C, il modulo B presenti una dissipazione migliore sia dal punto di vista conduttivo che convettivo, testimoniato anche dalle immagini termiche relative ai due modelli e commentate nei paragrafi precedenti.

## Capitolo 6

### Conclusioni e sviluppi futuri

In questo capitolo sono riportati i risultati raggiunti nello studio effettuato di tre differenti modelli realizzati per simulare la trasmissione di calore all'interno di un modulo batteria.

Analizzando i dati ricavati dai test sul modulo del pacco batteria progettato dall'azienda FLAG-ms, e utilizzando il profilo delle correnti dello stesso, è stato possibile ricavare l'evoluzione nel tempo della temperatura del modulo, nello specifico delle celle soggette a maggiore stress termico.

Con l'ausilio del software di progettazione 3D Solidworks si è andati a ricostruire un modello semplificato del modulo FLAG-ms, per adattarlo ai vincoli computazionali imposti del software COMSOL Multiphysics. Impostando determinate condizioni al contorno e condizioni iniziali di temperatura si sono svolte prove con corrente in carica 1C, 2C e scarica 3C. I risultati ottenuti hanno evidenziato una buona resa della simulazione, ma le curve ottenute sono state condizionate da vincoli imposti dalle ipotesi semplificative del modulo limitando gli effetti di conduzione e convezione. Difatti, oltre alle semplificazioni geometriche, sulla resa della simulazione ha influito la temperatura fissa imposta sul cooling plate per tutta la durata della simulazione. L'impossibilità di simulare i canali all'interno del cooling, e la conseguente sostituzione della fisica con un intero piano di raffreddamento a temperatura fissa, ha portato ad una temperatura finale minore rispetto a quelle sperimentali. Nonostante ciò si può ritenere che le simulazioni abbiano dato, in termini di approssimazione delle temperature, dei risultati apprezzabili nonostante le molte variabili in gioco nel modello.

Nello studio successivo sono stati elaborati due nuovi modelli, con una nuova disposizione delle celle all'interno del modulo, mantenendo le condizioni al contorno e le ipotesi semplificative del primo modello. I risultati raggiunti, con l'obiettivo di migliorare la dissipazione termica a parità di potenza termica delle celle, hanno rivelato un abbassamento delle temperature dei due moduli sia a carica 1C sia a 2C.

In particolar modo da notare come nella prova a 1C abbia avuto una migliore dissipazione termica il modulo A, con le celle disposte verticalmente rispetto al plate, grazie al continuo contatto tra le celle e il cooling, dove il piano medio mantenuto a  $25,7^{\circ}\text{C}$  favorisce lo scambio termico per conduzione.

Nella prova 2C invece, dove la temperatura iniziale delle celle è di  $40^{\circ}\text{C}$ , è il modulo B ad avere un miglior profilo termico rispetto ad entrambi gli altri due moduli. La maggiore superficie di scambio termico per convezione con le celle superiori, e la contemporanea influenza del cooling dal basso, ha permesso una migliore dissipazione del calore proveniente dalle celle.

Un'ultima riflessione sul futuro miglioramento dei risultati ottenuti è legata alle ipotesi semplificative imposte al modello e alla potenza computazionale necessaria per la simulazione.

Partendo da quest'ultimo, l'impostazione di un time step minore con un conseguente aumento degli intervalli della simulazione, permetterebbero di approssimare meglio la curva simulata a quella sperimentale.

In secondo luogo, tra le ipotesi semplificative, un miglioramento della fisica del cooling plate migliorerebbe la simulazione, andando a determinare gradienti termici finali di minore entità.

Infine, un ulteriore sviluppo di questo lavoro potrebbe risiedere nell'approfondimento del sistema di raffreddamento illustrato nel secondo capitolo a proposito del raffreddamento mediante l'uso dei PCM (Phase Change Materials). Una tecnologia in sviluppo da ormai due decenni e che potrebbe migliorare il raffreddamento dei pacchi batteria di piccole/medie dimensioni, riducendo i costi relativi alla realizzazione di sistemi di cooling e migliorandone l'affidabilità.



## Bibliografia

- [1] Y. Chen e W. Evans, «Heat Transfer Phenomena in Lithium/Polymer-Electrolyte Batteries for Electric Vehicle Application,» J. Electrochem. Soc., vol. 140, 1993.
- [2] G. Xia, L. Cao e G. Bi, «A review on battery thermal management in electric vehicle application,» Journal of Power Sources, 2017.
- [3] T. Wang, K. Tseng e J. Zhao, «Development of efficient air-cooling strategies for lithium-ion battery module based on empirical heat source model,» Applied Thermal Engineering 90, 2015.
- [4] A.A. Pesaran, S. Burch, and M. Keyser, «An Approach for Designing Thermal Management Systems for Electric and Hybrid Vehicle Battery Packs Preprint January», 1999
- [5] [http://didattica.uniroma2.it/files/index/insegnamento/148670- Chimica per l'energia](http://didattica.uniroma2.it/files/index/insegnamento/148670-Chimica%20per%20l'energia)
- [6] L'enciclopedia libera Wikipedia, Accumulatore litio polimero.  
URL [https://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore litio-polimero](https://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore_litio-polimero)
- [7] Xie, Yongqi; Tang, Jincheng; Shi, Shang; Wu, Hongwei; Yu, Jianzu, «Experimental and analytical study on heat generation characteristics of a lithium-ion power battery», International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018.
- [8] L'enciclopedia libera Wikipedia, Alluminio, <https://it.wikipedia.org/wiki/Alluminio>
- [9] MIT Electric Vehicle Team, A Guide to Understanding Battery Specifications. [http://web.mit.edu/evt/summary\\_battery\\_specifications.pdf](http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf)
- [10] Ibrido misto o complesso, e-nsight, URL <https://www.e-nsight.com/2019/10/11/librido-misto-o-complesso/>
- [11] Gruppo Poron, caratteristiche tecniche poron, URL <http://gruppoporon.com/wp-content/uploads/2015/02/ST-PORON-B.pdf>
- [12] Ben Ye, Md Rashedul Haque Rubel and Hongjun Li, «Design and Optimization of Cooling Plate for Battery Module of an Electric Vehicle», Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University.
- [13] Ultrasonic Metal Welding for Lithium-Ion Battery Cell. 2014.
- [14] Add to Compare Share A123 lifepo4 20Ah prismatic pouch battery cell. 2019
- [15] Alastair Hales, Laura Bravo Diaz, Mohamed Waseem Marzook, Yan Zhao, Yatish Patel, and Gregory Offer, «The Cell Cooling Coefficient: A Standard to Define Heat Rejection from Lithium-Ion Batteries»

- [16] Bernardi, D.; Pawlikowski, E.; Newman, J., «A General Energy Balance for Battery Systems. » J. Electrochem. Soc. 1985, 132, 5–12.
- [17] L'enciclopedia libera Wikipedia, Condizioni al contorno, URL [https://it.wikipedia.org/wiki/Condizione\\_al\\_contorno](https://it.wikipedia.org/wiki/Condizione_al_contorno)
- [18] Sebastiano Corona «Simulazione MULTYPHYSICS termo-fluido-meccanica di celle al litio per batterie di veicoli ibridi-elettrici» corso di laurea magistrale ,tesi di laurea magistrale in ingegneria meccanica, rel. Aurelio Somà.
- [19] Electropedia, URL <https://www.mpoweruk.com/bms.htm> the electropedia
- [20] Normativa URL,[http://www.ing.mo.it/Media/Default/Commissioni/Impianti%20ed%20Energia/CE\\_I99\\_2\\_PI20140418%20dist.%20\(2\)\\_784\\_3589.pdf](http://www.ing.mo.it/Media/Default/Commissioni/Impianti%20ed%20Energia/CE_I99_2_PI20140418%20dist.%20(2)_784_3589.pdf)
- [21] L'enciclopedia libera Wikipedia, Auto Elettrica URL [https://it.wikipedia.org/wiki/Auto\\_elettrica](https://it.wikipedia.org/wiki/Auto_elettrica)
- [22] Q. Wang, B. Jiang, B. Li e Y. Yan, «A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles,»,Renewable and Sustainable Energy Reviews 64, pp. 106-128, 2016.
- [23] Battery university,battery cells, URL [https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types\\_of\\_battery\\_cells](https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_battery_cells)
- [24] Datasheet specifiche tecniche Kokam, Technical Specification SLPB120216216.
- [25] Ahmad A. Pesaran, «Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions» Advanced Automotive Battery Conference,2001
- [27] Jaewan Kim,Jinwoo Oh,Hoseong Lee, «Review on battery thermal management system for electric vehicles», Applied Thermal Engineering, 2019
- [28] FLAG-MS S.r.l. Flexible and Green Mechatronics Solutions Srl
- [29] H. Mehling and L. F. Cabeza. « Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications», 2008
- [30] Christian Huber , « Phase Change Material in Battery Thermal Management Applications» Technischen Universität München , Prof. Dr. Sc. Samarjit Chakraborty,Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen,Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp,2017
- [31] L'enciclopedia libera Wikipedia , Paraffina, URL <https://it.wikipedia.org/wiki/Paraffina>
- [32] Scheda tecnica paraffina, URL, [https://www.drillservice.it/thatsbin/items/97925\\_87676\\_PARAFFINA%20SCHEMA%20TECNICA.pdf](https://www.drillservice.it/thatsbin/items/97925_87676_PARAFFINA%20SCHEMA%20TECNICA.pdf)
- [33]Kokam, brochure prodotti, URL <http://m.kokam.com/brochure-en>

[34] L'enciclopedia libera Wikipedia , equazione di Darcy Weisbach , URL [https://it.wikipedia.org/wiki/Equazione\\_di\\_Darcy-Weisbach](https://it.wikipedia.org/wiki/Equazione_di_Darcy-Weisbach)

[35] Guida in linea, documentazione tecnica software di simulazione COMSOL multiphysics

## **Ringraziamenti**

Desidero ringraziare per questo lavoro di tesi le persone che ne hanno permesso lo svolgimento, a partire dal mio relatore, il professore Andrea Tonoli, e il mio tutor aziendale Fabrizio Impinna.

Quest'ultimo insieme a tutti gli altri ragazzi della FLAG-ms mi hanno consigliato e sostenuto in quello che è stato un percorso di crescita durato un anno. Li ringrazio per ogni insegnamento e consiglio ricevuto, umanamente e professionalmente, perché da loro ho imparato tanto anche solo osservando quotidianamente l'impegno e la passione che mettono in ogni singolo progetto.

Ringrazio i miei genitori, o i miei sponsor come amano definirsi, per i sacrifici che hanno fatto negli anni per farmi raggiungere questo traguardo.

Ringrazio infine mia sorella e gli amici più cari che mi hanno sostenuto nei momenti difficili, incoraggiandomi a non mollare, avendo la consapevolezza, a volte più di me, che questo giorno sarebbe arrivato.

Grazie a tutti.

