



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in **INGEGNERIA MECCANICA**

**VERIFICA SPERIMENTALE DI UN SISTEMA DI
CONTROLLO TERMICO AD IMMERSIONE
DIRETTA PER CELLE A IONI DI LITIO**

**EXPERIMENTAL VERIFICATION OF DIRECT
IMMERSION COOLING SYSTEM FOR Li-ION
CELLS**

Relatore:

Prof. VALERIO D'ALESSANDRO

Tesi di Laurea di:

RICCARDO RIBICHINI

Correlatore:

Ing. LUCA GIAMMICHELE

A.A. 2025/2026

INDICE

INTRODUZIONE	3
CAPITOLO 1: SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO PER BATTERIE A IONI DI LITIO.....	5
1.1 Utilizzo e ruolo delle batterie nel campo dell'aviazione.....	6
1.2 Funzionamento e classificazione delle batterie a ioni di litio	8
1.3 Produzione di calore nelle batterie a ioni di litio	14
1.4 Tipologie di BTMS	17
1.4.1 Sistemi di raffreddamento ad aria	18
1.4.2 Sistemi di raffreddamento con liquido	20
1.5 Il progetto ELECTRA	29
CAPITOLO 2: ALLESTIMENTO DEL SET UP SPERIMENTALE	33
2.1 Realizzazione del pacco batteria	34
2.2 Set-up di misura	37
2.3 Acquisizione ed elaborazione dati	39
CAPITOLO 3: RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE	43
3.1 Prove in aria	44
3.2 Prove con Novec	49
3.3 Confronto tra le prove	55
CONCLUSIONI	59
Bibliografia	61

INTRODUZIONE

Attualmente, il mondo dell'ingegneria e dell'innovazione è sempre più orientato allo sviluppo e al miglioramento di tecnologie caratterizzate da un minore impatto ambientale, sia in fase di produzione che durante l'esercizio e l'utilizzo.

Nel settore dell'aviazione, la crescente attenzione agli effetti del cambiamento climatico, evidenziata dagli ultimi rapporti dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), richiede una rapida riduzione delle emissioni di gas a effetto serra. Secondo l'IEA (International Energy Agency), il solo settore dei trasporti è responsabile del 24% delle emissioni dirette di CO₂ derivanti dall'utilizzo dei combustibili, nonostante, durante la pandemia di Covid-19, si sia registrato un parziale rallentamento della crescita delle emissioni [1].

L'elettrificazione nel settore aeronautico rappresenta un punto di svolta cruciale, risultando particolarmente vantaggiosa per applicazioni a corto raggio e per la mobilità urbana, contesto in cui le tecnologie tradizionali risultano inefficienti e dannose per l'ambiente.

Tale transizione è inoltre supportata dai rapidi progressi nelle tecnologie delle batterie e nei sistemi di gestione della potenza; oltre che dall'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili, che consentono una produzione di energia elettrica a minor impatto ambientale, rendendo l'aviazione elettrica sempre più praticabile e sostenibile. Inoltre, i sistemi di propulsione elettrica migliorano l'efficienza energetica e riducono i costi di manutenzione.

Tuttavia, le batterie presentano numerose criticità di natura termica ed elettrica, legate alle particolari e severe condizioni operative tipiche del settore aeronautico [2]. Per garantire un controllo efficiente della batteria, sia dal punto di vista elettrico che termico, sono fondamentali i sistemi di BMS (Battery Management System) e BTMS (Battery Thermal Management System).

L'obiettivo di questa tesi è valutare quale sistema di raffreddamento si adatti meglio a un determinato modello di aeromobile elettrico, in funzione dell'efficienza e delle prestazioni richieste.

Prima della parte sperimentale viene condotto uno studio preliminare delle principali configurazioni di BTMS presenti in letteratura. Tale studio costituisce il riferimento teorico per l'impostazione e l'interpretazione dei risultati relativi ai sistemi testati in laboratorio.

Successivamente, verranno analizzati sistemi di raffreddamento ad aria e a liquido a contatto, attraverso prove di scarica della batteria. I dati ottenuti saranno elaborati e confrontati alla luce della teoria.

CAPITOLO 1: SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO PER BATTERIE A IONI DI LITIO

1.1 Utilizzo e ruolo delle batterie nel campo dell'aviazione

Nel settore dell'aviazione, come in altri ambiti dell'ingegneria, l'avvento della componentistica e della trazione elettrica sta guidando la ricerca e lo sviluppo di nuovi modelli. La motivazione principale sta nella capacità di sfruttare energia elettrica per alimentare sistemi complessi, presentando un'alternativa tangibile all'utilizzo di risorse di alimentazione non rinnovabili, come gli idrocarburi.

L'utilizzo della propulsione elettrica riduce principalmente le emissioni dirette durante il volo e, se correttamente gestita, anche l'impatto ambientale dell'industria aeronautica. Inoltre, migliora l'efficienza energetica e si riducono i costi di manutenzione. Per quanto riguarda la progettazione degli aeromobili si escludono componenti come il serbatoio, il motore e vari elementi meccanici tipici dei motori tradizionali a combustione interna. A queste semplificazioni del sistema segue, però, un aumento della complessità di elaborazione delle batterie e della gestione termica.

Tali soluzioni si sono principalmente diffuse nel trasporto urbano dove prevalgono tratte a breve raggio e spostamenti veloci. Gli aeromobili elettrici a decollo e atterraggio verticale (eVTOL) e i veicoli aerei senza pilota (UAV) costituiscono gli esempi più significativi di questa trasformazione. Questi veicoli hanno favorito soluzioni di mobilità aerea urbana (UAM) più efficienti, silenziose ed ecosostenibili.

Esistono poi soluzioni più complesse che hanno l'obiettivo di coprire percorsi a lungo raggio tramite veri e propri aerei elettrici i quali possono essere classificati come AEA (All-Electric Aircraft). L'aumento delle dimensioni comporta un incremento significativo della potenza richiesta, introducendo criticità nella progettazione dei pacchi batteria e nei relativi sistemi di raffreddamento.

Per comprendere la portata di questa trasformazione basta osservarne la relativa letteratura scientifica. La pubblicazione annuale relativa all'aviazione elettrica evidenzia una chiara evoluzione attraverso tre diverse fasi: crescita iniziale (1997–2016), rapida accelerazione (2017–2022) e fase di svolta (2023–dicembre 2024) [2].

Tra il 1997 e il 2016, l'attività di ricerca è stata relativamente limitata, indicando le prime fasi di sviluppo delle tecnologie per l'aviazione elettrica con studi di carattere generale.

Il periodo 2017–2022 ha registrato una crescita esponenziale grazie ai progressi nella tecnologia delle batterie agli ioni di litio (Li-ion) e ad una rinnovata attenzione verso l'aviazione sostenibile da parte di importanti produttori come Hamilton Aerospace, Zunum Aero e Volocopter [2].

I primi progetti di aeromobili elettrici furono lanciati durante questo periodo; tuttavia, la maggior parte delle configurazioni era limitata a una capacità massima di due passeggeri. Dal punto di vista accademico gli Stati Uniti hanno presentato il maggior numero di pubblicazioni, seguiti poi dalla Cina e dalle ricerche europee (Figura 1).

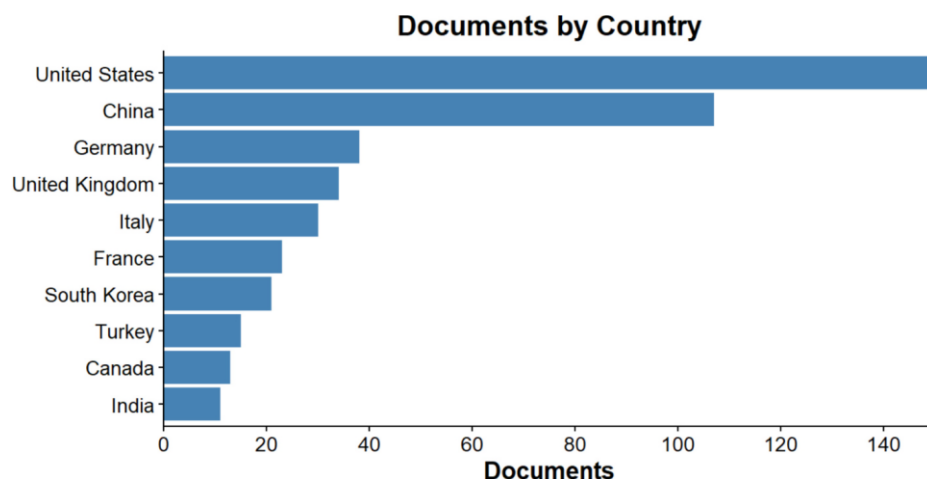


Figura 1: Pubblicazioni per paese [2]

Programmi di ricerca di riferimento sono quelli del Boeing 787 nel 2010 e dell'Airbus A350-900 nel 2015. La NASA ha invece avanzato la propria visione di aviazione del ventunesimo secolo grazie al progetto N+3 (Figura 2). Tra i primi modelli di aerei elettrici di successo vi sono anche il Velis Electro della Pipistrel e il eFlyers della Bye Aereospace [1].



Figura 2: NASA X-57 Maxwell DEP aircraft [1]

1.2 Funzionamento e classificazione delle batterie a ioni di litio

Le batterie ideali per applicazioni aeronautiche dovrebbero essere leggere, ricaricabili, sicure, avere una lunga durata e possedere la più alta densità energetica possibile. Per questo le batterie agli ioni di litio stanno diventando sempre più popolari nella ricerca e nello sviluppo per l'aviazione elettrica [1, 2]. Rispetto a batterie quali nichel-cadmio (Ni-Cd) oppure nichel-metallo idruro (Ni-MH), le celle Li-ion presentano densità energetiche più elevate, oltre a una tensione di cella maggiore, che può raggiungere fino a 3,6 V [1].

Tuttavia, nonostante il successo tecnologico e le promettenti prospettive della tecnologia, diverse sfide ne limitano l'applicazione e sollevano numerose

preoccupazioni riguardo alla sicurezza e alla minore energia specifica, rispetto ai carburanti per aerei a reazione.

Per risolvere il problema della bassa energia specifica delle celle Li-ion è necessario aumentare ulteriormente la densità energetica dei materiali del catodo e dell'anodo. Tuttavia, vi sono limitazioni riguardo la stabilità elettrochimica degli elettroliti e le capacità tecnologiche di materiali come la grafite. Attualmente sono state certificate densità energetiche specifiche superiori a 250 Wh/kg [1].

Un'ulteriore limitazione riguarda la variazione di peso del sistema di accumulo nella fase di utilizzo; infatti, nei motori aeronautici convenzionali a combustione interna il combustibile si riduce progressivamente durante il volo, determinando una diminuzione della massa complessiva del velivolo; mentre le batterie mantengono, in azione, una massa pressoché costante.

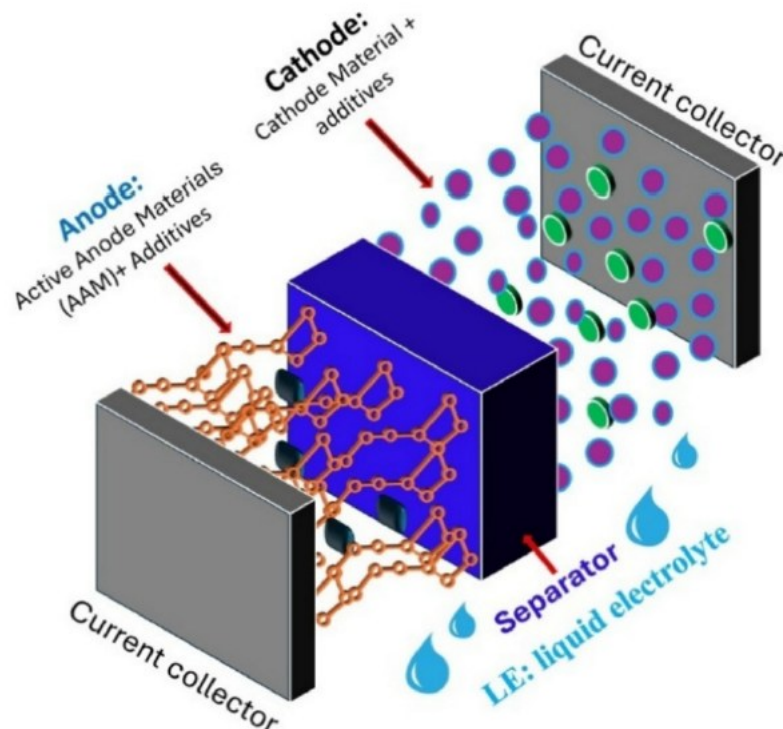


Figura 3: Rappresentazione grafica LIB [3]

Gli elementi fondamentali di una cella (Figura 3) sono l'anodo, il catodo, l'elettrolita, il separatore e i collettori di corrente. L'anodo rappresenta l'elettrodo negativo e generalmente è composto da grafite; durante la carica immagazzina gli ioni di litio. Il catodo rappresenta, invece, l'elettrodo positivo ed è normalmente composto da ossidi metallici contenenti litio. La conduzione degli ioni Li^+ tra anodo e catodo avviene attraverso un mezzo elettrolitico, il quale non consente invece il passaggio degli elettroni grazie alla sua composizione chimica di sale a base di litio. Il separatore impedisce il contatto diretto tra anodo e catodo, che altrimenti causerebbe un cortocircuito. Generalmente, è realizzato con materiali polimerici sintetici o naturali. I collettori di corrente, materiali conduttivi, sono presenti su entrambi i lati dell'anodo e del catodo e permettono il trasferimento degli elettroni tra la batteria e il circuito esterno. La carica e la scarica si basano sull'inserimento ed estrazione degli ioni di litio (Li^+) tra gli elettrodi positivo e negativo attraverso l'elettrolita (Figura 4).

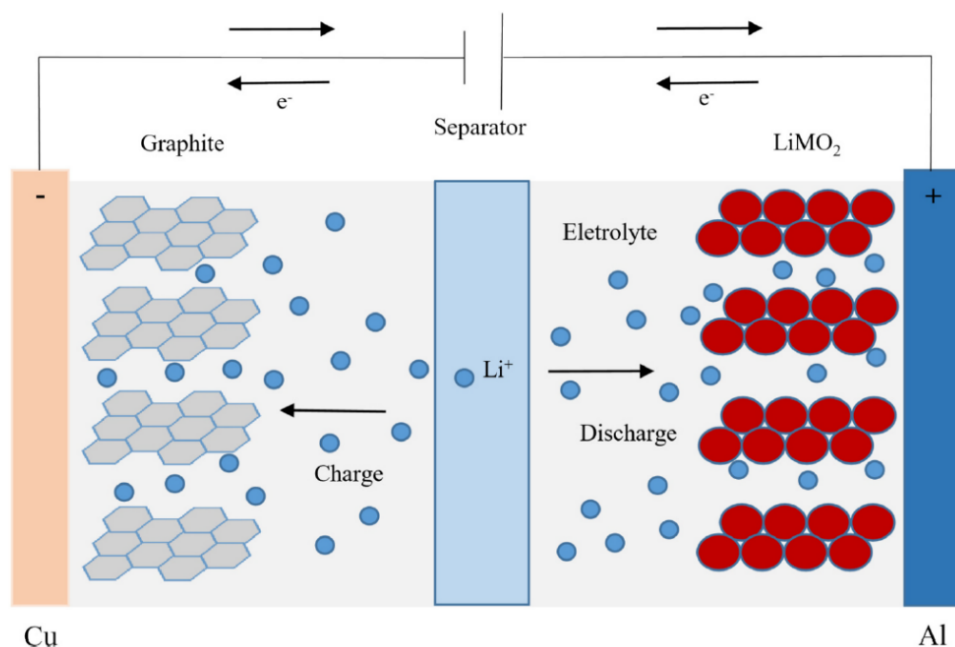


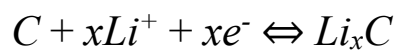
Figura 4: Schema batteria a litio [4]

La specifica elettrochimica dipende dai materiali utilizzati per gli elettrodi positivo e negativo. Considerando, come esempio, LiMnO_2 per l'elettrodo positivo e grafite per l'elettrodo negativo, le reazioni elettrochimiche risultanti possono essere descritte come segue:

- **Elettrodo positivo:**



- **Elettrodo negativo:**



- **Reazione generale della batteria:**



Ogni batteria, a seconda del funzionamento, può essere caratterizzata con dei valori di riferimento che la rendono adeguata a una determinata applicazione:

- Tensione nominale: oscilla tra 3,6 e 4 V a seconda della composizione chimica. [V]
- Corrente massima: è la massima corrente che la batteria può erogare per brevi durate. [A]
- Capacità: corrente che in un'ora scarica completamente una cella inizialmente carica al 100% [Ah].
- C-rate: rapporto con il quale la batteria può essere scaricata rispetto alla sua capacità massima [1/h].
- Ciclo di vita: numero di cicli di scarica e ricarica completi mantenendo inalterate le prestazioni della batteria. È importante ricordare che il fine vita di una batteria su un mezzo si considera sempre con una capacità rimanente dell'80%, ma ci saranno ancora numerose possibilità di utilizzo in altri ambiti, come ad esempio l'energy storage.

- SOC: State of Charge, rappresenta lo stato di carica della batteria in percentuale.

La classificazione principale delle batterie a ioni di litio, invece, si basa sulla loro composizione chimica, in particolare del catodo. Per l'aviazione elettrica si distinguono le NMC (Nichel-Manganese-Cobalto), le NCA (Nichel-Cobalto-Alluminio) e le LFP (Litio-Ferro-Fosfato).

Le prime batterie ad essere impiegate sono state le LFP (LiFePO_4) dato il loro adattamento alle esigenze del settore industriale; sono infatti le più sicure e stabili sul mercato e sono disponibili in formati di grande capacità. Inoltre, tramite un opportuno sistema di BMS, possono agevolmente superare i 4000 cicli di vita completi.

Attualmente, le LFP sono state sostituite dalle batterie NMC ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$) ampiamente utilizzate anche nel settore dell'automotive. Difatti, permettono di immagazzinare tanta energia con peso e volumi contenuti (220 – 240 Wh/kg), a discapito di un numero di cicli minore. La sigla NMC è solitamente seguita da tre numeri che indicano la percentuale degli elementi che compongono il catodo. Le più recenti sono le NMC 811, mentre le più comuni sono le NMC 622. Si nota dunque un particolare interesse nel ridurre la quantità di cobalto per motivi economici e prestazionali; tuttavia, risulta ancora essere un elemento fondamentale per la stabilità e l'aumento dei cicli di vita della batteria.

Soluzioni simili sono le NCA (LiNiCoAlO_2), ma con un grado di sicurezza leggermente inferiore. Nonostante ciò, sono solitamente utilizzate in blend con le NMC, con l'obiettivo di raggiungere grandi capacità.

Le batterie si possono categorizzare anche per la loro geometria cilindrica, prismatica o a pouch (sacchetto) (Figura 5). Le prime sono caratterizzate da elevata robustezza e semplicità di produzione, proprietà che ne hanno favorito l'ampia diffusione nelle applicazioni industriali.

Le celle prismatiche offrono notevoli vantaggi in termini di efficienza nell'utilizzo dello spazio, resistenza agli urti e ampia superficie disponibile per la dissipazione del calore.

Le celle pouch hanno, invece, attirato grande interesse grazie all'elevata densità energetica e alle superiori prestazioni in termini di sicurezza, risultando particolarmente adatte per piccoli dispositivi elettronici.

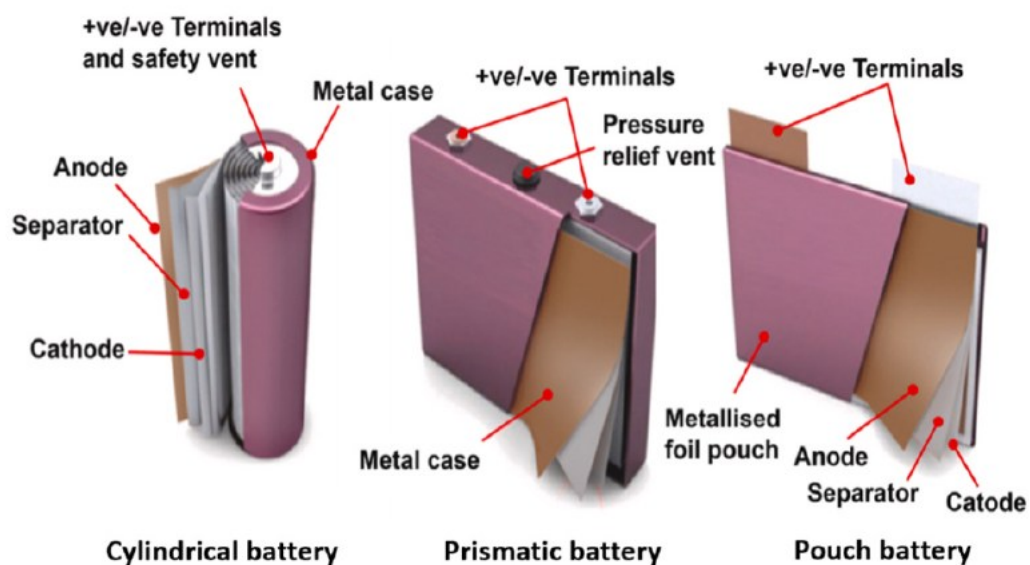


Figura 5: Tipologie di batteria [5]

Alternative valide possono essere le batterie Li-S, composte da un catodo in zolfo e con energia specifica stimata a 500 Wh/kg [1], e le batterie allo stato solido (SSB), che rappresentano una soluzione alle limitazioni delle LIB quali la ridotta durata ciclica, il rischio di perdite dell'elettrolita, l'infiammabilità e i limiti di tensione operativa. [1]

1.3 Produzione di calore nelle batterie a ioni di litio

Le batterie agli ioni di litio sono tra le tecnologie elettrochimiche più promettenti per l'accumulo e la conversione dell'energia elettrica nei EV (Electric Vehicles). Tuttavia, condizioni operative caratterizzate da elevate temperature possono generare criticità di natura termica, tra cui il fenomeno del thermal runaway (o fuga termica), ovvero una condizione di instabilità in cui la batteria produce calore in maniera incontrollata, superando la propria capacità di dissipazione termica. Tale fenomeno può portare alla generazione di gas nocivi, incendi o, nei casi più gravi, esplosioni.

L'intervallo di temperatura ottimale per le batterie agli ioni di litio è compreso tra circa 15 e 35 °C, con un gradiente di temperatura tra le celle ideale inferiore a 5 °C nella fase di utilizzo [4] (Figura 6, 7). Uno studio ha dimostrato che se la temperatura viene mantenuta nell'intervallo tra 30 °C e 40 °C, la durata della batteria si riduce di circa 60 giorni per ogni aumento di 1 °C della temperatura [4]. In condizioni estreme, quando la temperatura aumenta fino a circa 90 °C, il film di interfaccia elettrolitica solida (SEI) inizia a disintegrarsi. Arrivando a circa 135 °C, il separatore inizia a fondere e, se aumenta ulteriormente fino a 200 °C, iniziano a verificarsi ulteriori reazioni di decomposizione che portano al guasto catastrofico della cella.

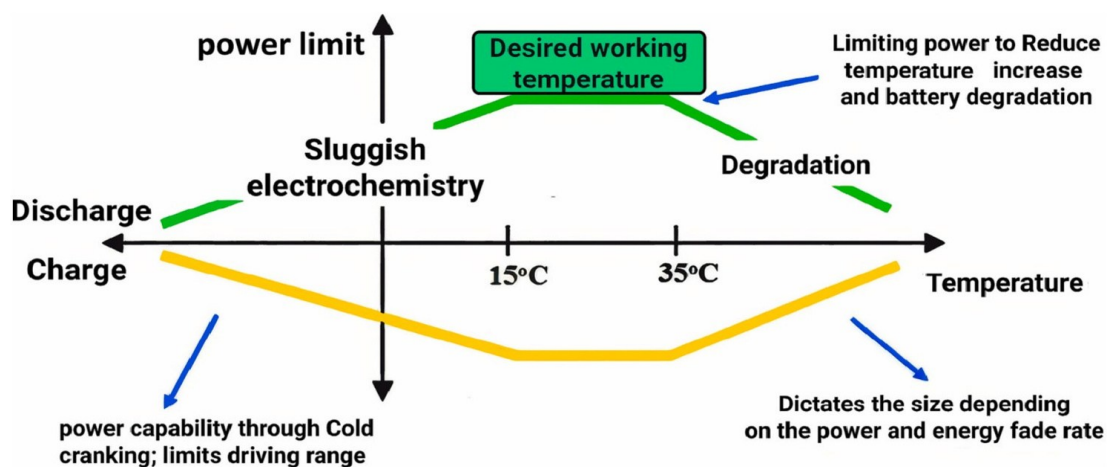


Figura 6: Andamento della potenza limite in funzione della temperatura [4]

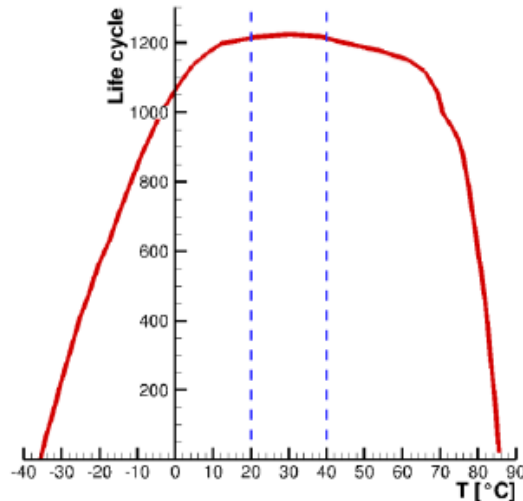


Figura 7: Andamento dei cicli di vita rispetto alla temperatura

È necessario comprendere, prima di tutto, i meccanismi di generazione di calore durante la fase di scarica; per poter poi implementare un determinato sistema di controllo della temperatura.

Nello specifico lo sviluppo di potenza termica nelle batterie può essere associato a quattro tipi di calore: della reazione, ohmico, di polarizzazione e della reazione secondaria [4].

Il calore di reazione è il calore generato durante il trasferimento degli ioni di litio (Li^+) a causa dei processi di intercalazione e deintercalazione che avvengono durante la carica e la scarica della batteria.

Il calore ohmico è prodotto dalla resistenza elettrica interna della batteria quando viene attraversata da corrente.

Il calore di polarizzazione è invece associato ai fenomeni di polarizzazione che si sviluppano all'interno della cella durante il funzionamento.

Infine, il calore dovuto alle reazioni secondarie è generato da reazioni indesiderate che possono verificarsi all'interno della batteria, come ad esempio l'autoscarica; tale contributo è generalmente di entità relativamente ridotta. I

fattori più influenti sono quindi la chimica della cella e la relativa resistenza ohmica interna.

Osservando questo fenomeno da un punto di vista più analitico si ricava la seguente espressione [6], che tiene conto di più fattori caratteristici di una LIB (Lithium Ion Battery):

$$Q = I(U - E) + IT \frac{dE}{dT}$$

dove I rappresenta la corrente di funzionamento, E la tensione a circuito aperto, U la tensione di funzionamento e T la temperatura. Il primo termine a destra dell'equazione risulta essere sempre positivo nella fase di scarica. Infatti, considerando la corrente con segno negativo, la tensione di funzionamento U è sempre minore di quella a circuito aperto E , dunque il loro prodotto è maggiore di zero. Perciò, tale termine definisce il calore irreversibile prodotto dalla cella e dovuto alle perdite ohmiche e di polarizzazione. La seconda parte dell'equazione, invece, varia segno durante la scarica partendo da un valore positivo e finendo in negativo attraverso un punto di massimo. Questo andamento, che si è osservato nelle celle, definisce la parte di calore che determina il passaggio da una reazione endotermica ad una esotermica. Solitamente è un termine significativo alle basse scariche.

Condizioni di produzione eccessiva di calore e di thermal runaway sono spesso le conseguenze di un abuso meccanico, termico o elettrico della batteria. Il primo comprende l'azione di forze esterne, urti e deformazioni dell'involucro di protezione del pacco batteria. L'abuso termico è, invece, l'effetto di sorgenti termiche esterne o sistemi di raffreddamento non adeguati. Infine, una LIB può essere sovraccaricata o andare in cortocircuito, portando ad un abuso elettronico.

1.4 Tipologie di BTMS

Parallelamente allo studio dei meccanismi di generazione del calore nelle batterie, sono state sviluppate tecnologie dedicate al controllo della temperatura. Tale problematica si amplifica nel momento in cui, per soddisfare le esigenze di tensione e di capacità di un veicolo elettrico l'utilizzo di una singola cella elettrochimica non è sufficiente. Dunque, queste ultime vengono integrate in pacchi batteria che, a causa della loro struttura più complessa, presentano maggiori criticità nella gestione termica, aumentando il rischio di innescare surriscaldamenti localizzati.

Il Battery Management System (BMS) gestisce principalmente gli aspetti elettrici, computazionali e diagnostici del pacco batteria, inclusi la stima dei parametri elettrici, la regolazione della potenza, il bilanciamento delle celle e il rilevamento dei guasti. Nel settore aeronautico, tecniche avanzate di machine learning (ML), logica fuzzy e metodi di filtraggio rappresentano soluzioni fondamentali per affrontare la complessità di questi sistemi.

Il Battery Thermal Management System (BTMS), invece, si concentra sul mantenimento della batteria all'interno del suo intervallo ottimale di temperatura mediante tecniche attive o passive di dissipazione del calore, garantendo uniformità termica e prevenendo il fenomeno del thermal runaway (TR). Opera spesso come sottosistema fisico coordinato dal BMS, formando un sistema integrato in grado di assicurare stabilità elettrica, sicurezza termica ed elevate prestazioni complessive.

La categorizzazione dei BTMS si basa sulle diverse soluzioni di rimozione del calore che si distinguono per il mezzo termovettore impiegato e per il relativo flusso di dispersione, ma anche per la geometria e la modalità di integrazione sul pacco batteria (Figura 8).

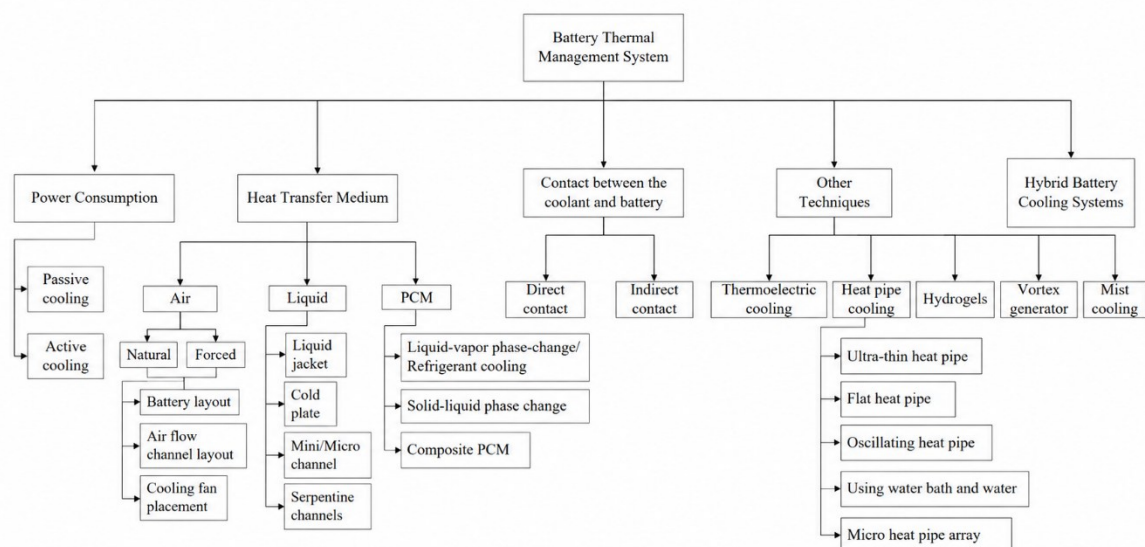


Figura 8: Classificazione dei BTMS [7]

Negli ultimi anni sono stati sviluppati metodi ibridi, che combinano diverse strategie di gestione termica al fine di sfruttarne i rispettivi vantaggi. Nonostante ciò, i modelli basati sull'utilizzo di aria e liquido rimangono le soluzioni più diffuse nei veicoli elettrici.

1.4.1 Sistemi di raffreddamento ad aria

Nelle applicazioni commerciali, in particolare per esigenze di bassa potenza, il sistema di raffreddamento ad aria è ampiamente riconosciuto come una soluzione economicamente conveniente e con efficacia consolidata in letteratura. È fondamentale implementare una configurazione accuratamente progettata che mantenga uniforme la temperatura e conservi il pacco batteria entro l'intervallo termico desiderato.

È importante notare che, negli studi sui BTMS basati sull'aria, i ricercatori si concentrano spesso su parametri quali la progettazione dei percorsi dell'aria, la spaziatura tra le celle e la configurazione del pacco batteria. In una parte significativa delle pubblicazioni scientifiche l'attenzione è stata rivolta al

posizionamento degli ingressi e delle uscite del flusso d'aria e alla loro influenza sulle prestazioni termiche.

In una ricerca di riferimento, Zhang et al. hanno dimostrato come differenti configurazioni del flusso d'aria influenzino l'efficienza del raffreddamento su una batteria prismatica (Figura 9). Allo stesso modo è stato fatto da Chen et al. avvalendosi dell'utilizzo di sistemi di calcolo numerico, validati dai risultati sperimentali (Figura 10) [7]. L'approccio modellistico permette di determinare i valori ottimali della distanza tra le celle e delle posizioni di ingresso e uscita dell'aria. Possono essere condotte analisi preliminari di numerosi parametri, quali il volume dei canali di raffreddamento, gli angoli dei canali e dispositivi per la modifica della direzione del flusso, come spoiler e generatori di vortici.

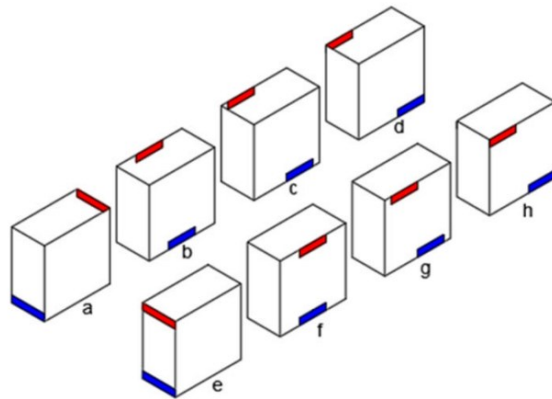


Figura 9: Configurazioni flusso d'aria [7]

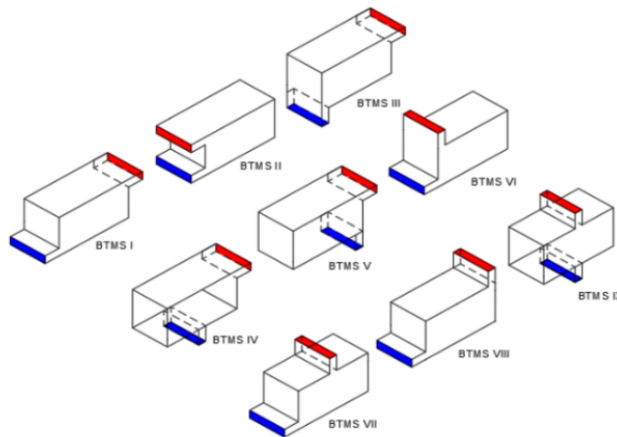


Figura 10: Configurazioni con canali [7]

I valori principali della prestazione termica del pacco batteria sono la temperatura massima raggiunta, il tasso di utilizzo dello spazio α e il fattore di efficienza energetica β . La definizione di α e β è la seguente [7]:

$$\alpha = \frac{V_{canali}}{V_{batteria}}$$

$$\beta = \frac{Q_{rimosso}}{P_{ventilazione}}$$

I sistemi di raffreddamento ad aria possono essere realizzati mediante convezione naturale o forzata; in particolare, l'impiego di ventilatori consente di incrementare il coefficiente di scambio termico convettivo, migliorando la gestione della temperatura. Una serie di studi condotti con una velocità dell'aria tra i 0,5 e 2 m/s e con un C-rate compresa tra 0,5 e 2,5 C hanno dimostrato, all'aumentare della velocità, una riduzione della temperatura massima di 6,28% e una diminuzione della differenza di temperatura tra le celle pari al 90,78% [8]. Dunque, tali proprietà rendono la convezione forzata più ampiamente utilizzata.

1.4.2 Sistemi di raffreddamento con liquido

I sistemi di raffreddamento a liquido rappresentano una delle soluzioni più efficaci per la gestione termica dei pacchi batteria ad alta densità energetica. In generale, tali sistemi possono essere classificati in raffreddamento diretto e indiretto. Nel primo caso il fluido refrigerante entra effettivamente a contatto con il rivestimento delle celle, mentre nel secondo il trasferimento di calore avviene attraverso una superficie intermedia, generalmente costituita da piastre o canali metallici. A partire da questa differenza principale si richiede che il fluido, in cui viene immerso il pacco batteria, sia dielettrico permettendo di isolare elettricamente il sistema.

Nel caso dei sistemi a raffreddamento indiretto, in letteratura vengono analizzati differenti fluidi refrigeranti, varie configurazioni dei canali di raffreddamento e numerose strategie di ottimizzazione geometrica finalizzate ad aumentare l'efficienza dello scambio termico.

Le soluzioni adottate dipendono fortemente dalla geometria delle celle. Nel caso delle celle cilindriche, una configurazione frequentemente utilizzata prevede l'impiego di condotti dedicati che aumentano la superficie disponibile per lo scambio termico. Un esempio significativo è rappresentato dal sistema adottato nel pacco batterie della Tesla Model S, nel quale ciascun modulo è dotato di tubazioni di raffreddamento sagomate (Figura 11).

L'introduzione di alette all'interno dei canali può garantire una temperatura più uniforme e una migliore dissipazione termica, a patto che si mantengano dei consumi energetici di pompaggio accettabili. Tali strutture si possono distinguere per disposizione e forma: quadrata, circolare, ellittica, romboidale o poligonale [4].

Per le celle prismatiche e pouch la soluzione più diffusa è invece costituita dalle piastre di raffreddamento (cold plates). Le piastre possono essere integrate all'interno del modulo batteria, posizionate tra celle adiacenti oppure installate sulle superfici esterne del pacco batteria. In questo campo l'analisi modellistica ha permesso lo sviluppo di geometrie complesse. Ad esempio nello studio di Monika et al. [4] sono state analizzate strutture interne alle piastre che permettono un aumento della turbolenza, riducendo la temperatura dato un incremento del coefficiente di scambio termico convettivo (Figura 12).

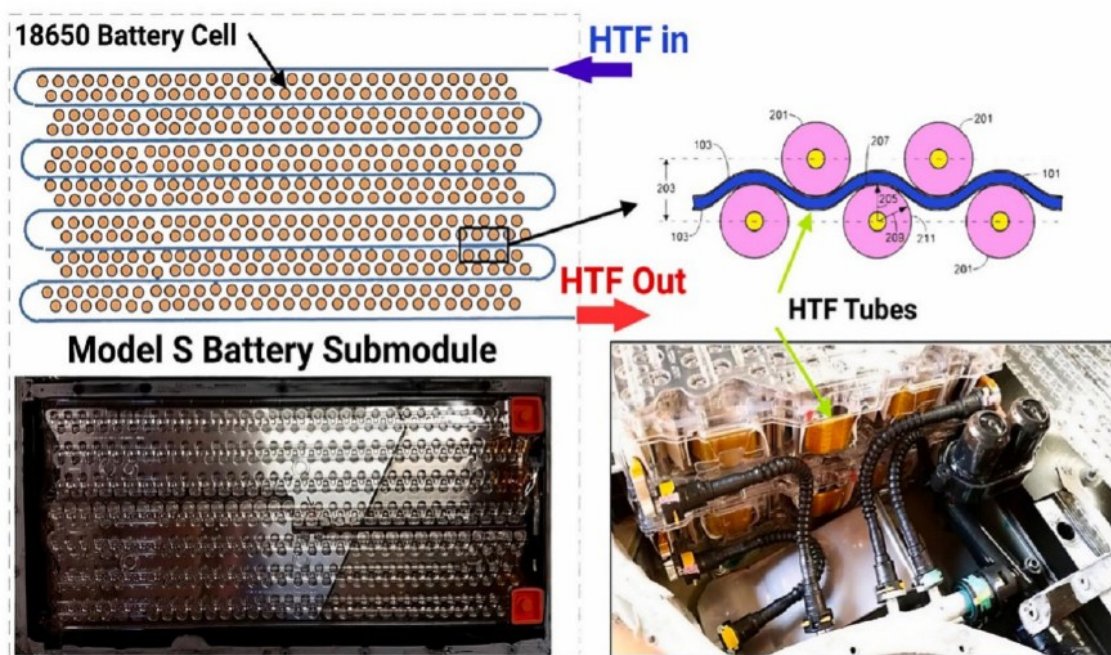


Figura 11: Sistema di raffreddamento di una Tesla Model S [4]

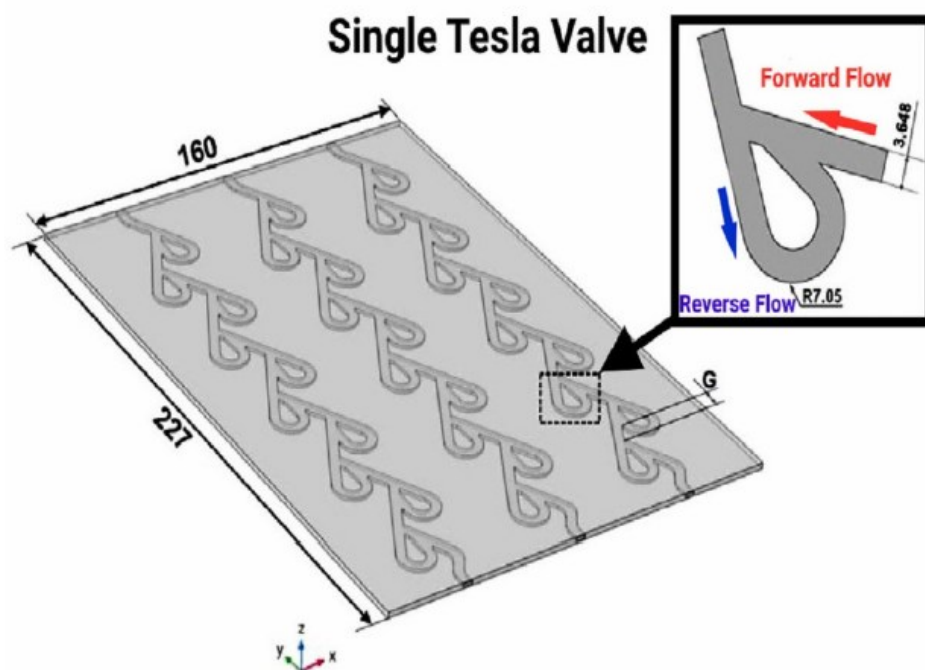


Figura 12: Schema della struttura delle piastre [4]

Data l'ampia diffusione di tali sistemi di raffreddamento esiste un elevato numero di pubblicazioni riguardanti i fluidi refrigeranti comunemente impiegati [4, 9]. Tra questi, acqua, nanofluidi e metalli liquidi rappresentano le soluzioni maggiormente adottate.

L'acqua è una risorsa molto abbondante ed economica. Inoltre, la sua elevata capacità termica specifica e la sua bassa viscosità la rendono un mezzo di raffreddamento ideale. Per quanto riguarda i BTMS dei veicoli elettrici, la maggior parte dei principali produttori, quali Tesla e BYD, utilizza l'acqua come fluido refrigerante [4]. Una delle principali criticità è il congelamento, ma l'aggiunta di sostanze antigelo rappresenta un metodo efficace per prevenire tale problematica. Composti come i glicoli, in particolare il glicole etilenico, sono ampiamente utilizzati grazie alla loro elevata miscibilità con l'acqua.

I nanofluidi, invece, nascono come concetto negli anni '90 tramite l'aggiunta di nanoparticelle metalliche ad alta conducibilità termica a un fluido base, allo scopo di migliorarne le proprietà di trasferimento del calore. Le loro capacità dipendono principalmente sia dalla frazione volumetrica sia dalle dimensioni delle nanoparticelle.

I metalli liquidi sono utilizzati nei sistemi di gestione termica grazie alle loro notevoli proprietà di raffreddamento rispetto ad altri fluidi refrigeranti e ai bassi valori di fusione. Presentano viscosità cinematica inferiore e punti di ebollizione più elevati rispetto all'acqua e all'aria, ampliando così il loro intervallo operativo. Sebbene siano corrosivi e richiedano adeguate misure di protezione, le loro proprietà fisiche uniche e la loro capacità di scorrere efficacemente, anche in pompe non meccaniche, offrono comunque un notevole potenziale nelle applicazioni ingegneristiche. La principale limitazione di questa tecnologia è la densità, circa sei volte superiore di quella dell'acqua. Pertanto, per compensare l'espansione volumetrica è fondamentale

il dimensionamento dei canali al fine di ridurre le quantità di refrigerante necessarie.

Attualmente, il raffreddamento a liquido indiretto è la soluzione maggiormente adottata nei veicoli elettrici. Difatti, i fluidi solitamente utilizzati nei sistemi a contatto diretto presentano una viscosità generalmente più elevata, comportando maggiori consumi energetici per il pompaggio. Inoltre, la stabilità a lungo termine del fluido rappresenta un ulteriore aspetto critico da considerare.

Tuttavia, la complessità progettuale dei sistemi di raffreddamento indiretto comporta spesso un aumento delle dimensioni complessive della struttura. Inoltre, lo scambio termico è fortemente influenzato dalla ridotta superficie e dalla resistenza termica di contatto che si ha all'interfaccia tra le celle e il sistema di raffreddamento. Al contrario, il raffreddamento per immersione prevede il contatto diretto della cella con un mezzo dielettrico, eliminando la necessità di complesse configurazioni di canali fluidodinamici. Questo metodo presenta vantaggi quali una struttura più compatta e semplice del sistema e una maggiore efficacia di raffreddamento rispetto ai sistemi indiretti.

Attualmente, la maggior parte delle ricerche relative ai sistemi diretti è ancora a livello teorico o di laboratorio, ma l'interesse verso questa tecnologia è in continua crescita dal 2022 [5].

L'applicazione di questi sistemi, inizialmente impiegata nei trasformatori riempiti d'olio, ha conosciuto una rapida diffusione in diverse applicazioni di gestione termica. Di conseguenza, essa è stata adottata anche nei data center, in altri dispositivi elettronici e nei pannelli fotovoltaici (PV).

Inoltre, questa tecnologia sta ricevendo crescente attenzione nei BTMS. L'applicazione alle batterie agli ioni di litio è motivata dai severi requisiti

termici di questi dispositivi, tra cui intervalli di temperatura ristretti, controllo preciso della temperatura e alta uniformità termica (Figura 13).

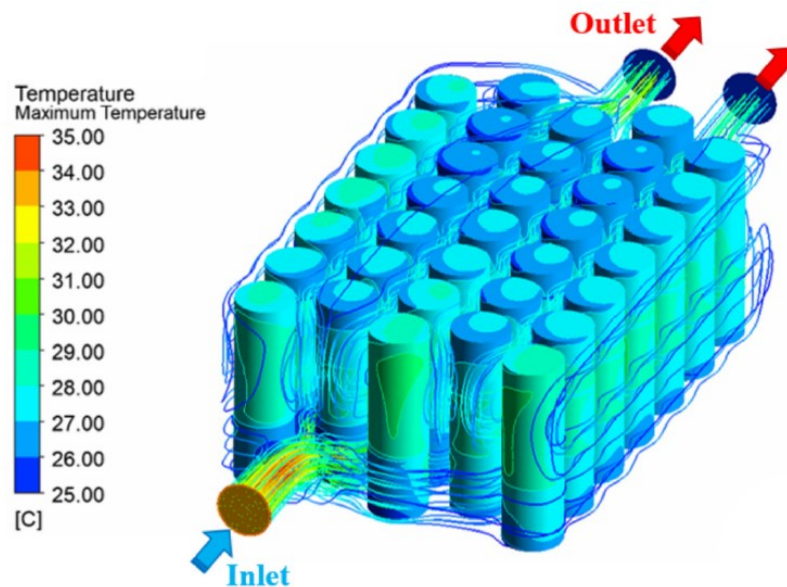


Figura 13: Esempio sistema a liquido diretto [10]

A livello applicativo, il contatto diretto tra batteria e fluido dielettrico riduce notevolmente la resistenza termica di contatto, creando un'interfaccia di scambio termico uniforme caratterizzata da un'elevata capacità di dissipazione del calore, con conseguente miglioramento delle prestazioni complessive. È inoltre evidenziato che la maggior parte dei fluidi impiegati per immersione sono non infiammabili, garantendo ottime proprietà ritardanti di fiamma e stimolando nuovi studi sul controllo del TR.

La principale classificazione di tale metodologia di raffreddamento riguarda il tipo di calore dissipato che può essere sensibile, nel caso di raffreddamento monofase, oppure latente, raffreddamento bifase. In uno studio, di Roe et al. [5], è stata proposta una categorizzazione in base al grado di immersione, al tipo di fluido utilizzato e allo stato del flusso (Figura 14). Si introduce, quindi, anche la possibilità che il fluido sia in movimento (convezione forzata) oppure sia statico (convezione naturale).

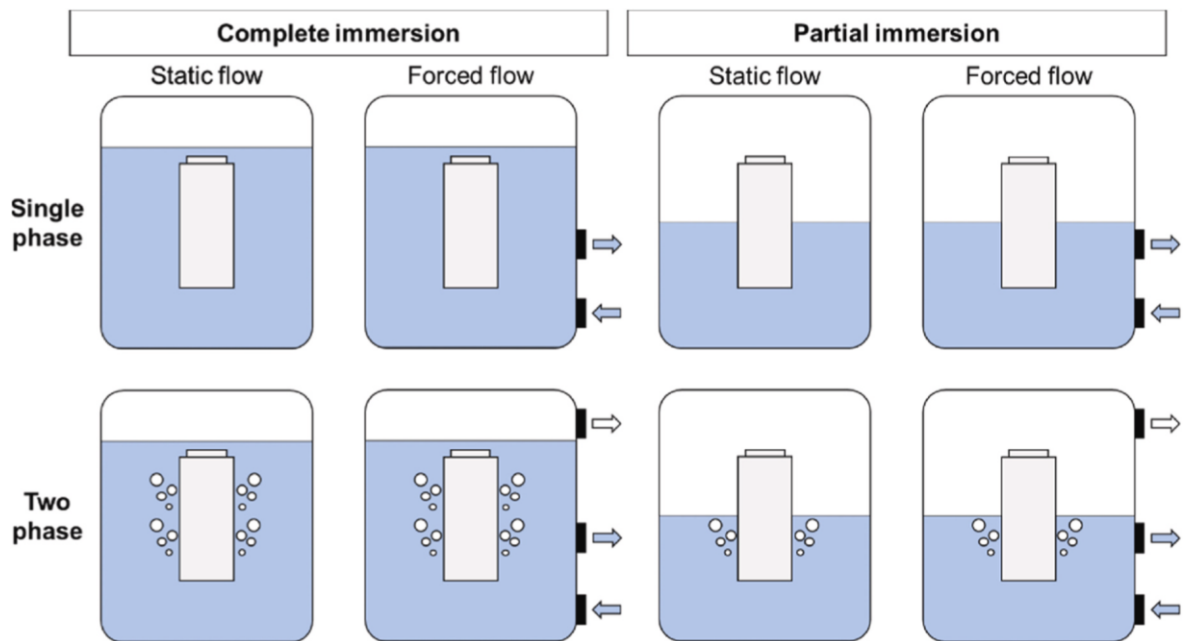


Figura 14: Tipologie di sistemi di raffreddamento diretto [5]

Il raffreddamento per immersione monofase SPIC (Single-Phase Immersion Cooling) utilizza fluidi con alto punto di ebollizione ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$), come MO (Mineral oil) o SO (Silicon Oil), garantendo prestazioni sicure e affidabili, senza cambiamenti di fase.

Al contrario, nel raffreddamento bifase TPIC (Two-Phase Immersion Cooling), il fluido presenta generalmente un basso punto di ebollizione ($<40\text{ }^{\circ}\text{C}$) e tende a bollire ed evaporare una volta assorbito il calore generato dalle celle.

Nel metodo TPIC, si è osservato che l'evaporazione avviene quando il fluido refrigerante si surriscalda, causando la rapida espansione e vaporizzazione di piccole bolle situate in prossimità della cella sulla superficie. Tuttavia, una piccola parte delle bolle condensa nuovamente nella fase liquida adiacente al refrigerante, mentre parte del vapore formato condensa nella parte alta del contenitore del pacco batteria, determinando la sua ricircolazione nel serbatoio liquido e completando il ciclo di trasferimento del calore.

La Figura 15 mostra la curva di ebollizione riportando il flusso termico in funzione del surriscaldamento della parete. Prima dell'inizio dell'ebollizione,

sia la densità di flusso termico sia il surriscaldamento della parete sono bassi. In questa fase, il trasferimento di calore avviene principalmente per convezione naturale nel liquido monofase, mediante il quale il calore viene trasferito dalla superficie riscaldata al volume del fluido, determinando un coefficiente di scambio termico convettivo relativamente basso.

Il punto A indica, invece, l'inizio della ebollizione nucleata. All'aumentare del surriscaldamento della parete, iniziano a formarsi nuclei di vaporizzazione che portano alla generazione di bolle, caratterizzando una evaporazione parziale e intensificando il moto del liquido. Questa perturbazione favorisce un miglior mescolamento del fluido, accelerando il moto relativo rispetto alla cella e incrementando lo scambio termico tra il liquido vicino alla superficie e il fluido più freddo nel volume, grazie a un coefficiente di scambio termico convettivo maggiore.

Con l'ulteriore aumento del flusso termico, si raggiunge un punto critico (punto B in Figura 15) in cui la ebollizione nucleata non è più in grado di sostenere l'elevato flusso termico, dando inizio alla fase di transizione. Durante questa fase si forma un elevato numero di bolle che tendono a unirsi in aggregati vicino alla superficie riscaldata, dando origine a condizioni locali di ebollizione a film.

Con l'ulteriore aumento del surriscaldamento della parete, fino al punto C (punto di Leidenfrost), si forma uno strato stabile di vapore sulla superficie riscaldata, noto come regime di ebollizione a film stabile. In questo caso, la superficie è completamente separata dal liquido da una pellicola di vapore stabile e il trasferimento di calore avviene principalmente per conduzione termica attraverso lo strato di vapore.

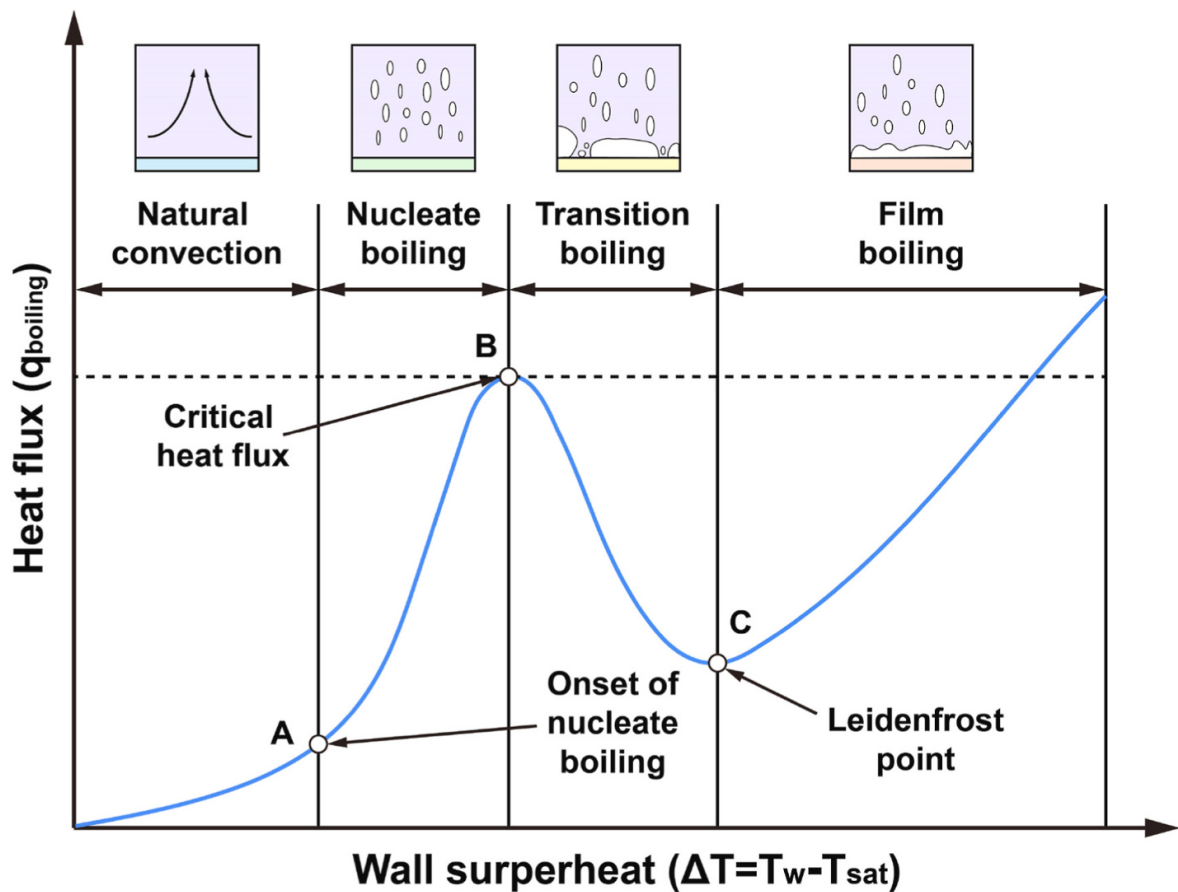


Figura 15: curva di ebollizione di una cella [5]

Dal punto di vista dei refrigeranti utilizzati, negli ultimi anni è cresciuto l'interesse verso l'impiego degli idrofluoroeteri (HFE). Nello specifico, i fluidi fluorurati Novec costituiscono una famiglia di prodotti HFE, caratterizzati da elevate prestazioni termiche, un punto di ebollizione adeguato e un'elevata entalpia di evaporazione.

È importante notare che la viscosità cinematica dei fluidi fluorurati considerati corrisponde ad un valore (0,32–0,79 cSt, centistokes [5]) di uno o due ordini di grandezza inferiore rispetto a quello di MO e SO. Al contrario, la conducibilità termica di questi fluidi è relativamente bassa, compresa nell'intervallo 0,057–0,075 W/(m·K) [5], significativamente inferiore rispetto ai refrigeranti monofase tipici.

Nonostante le loro buone proprietà termofisiche, presentano ancora costi elevati, che ne limitano l'adozione su larga scala. Inoltre, la complessità intrinseca della transizione di fase ne complica la commerciabilità.

1.5 Il progetto ELECTRA

Il progetto PRIN ELECTRA nasce con l'obiettivo di sviluppare una PSU (Power Supply Unit) innovativa per aeromobili elettrici basata su un sistema di gestione termica ad alta efficienza, tramite l'utilizzo di un fluido bifase. Lo studio è focalizzato sui modelli con MTOM (Maximum Take-Off Mass) inferiore a 600 kg, ad oggi ampiamente diffusi. In Italia questi aerei sono identificati come "Apparecchi per il volo da diporto o sportivo (VDS)", ma generalmente la categoria di riferimento è nominata LSA (Light Sport Aircraft). Nello specifico, la ricerca è rivolta ai velivoli destinati all'addestramento, che devono sostenere tempi di volo limitati e compatibili con le capacità di accumulo energetico delle batterie.

Si propone una PSU in cui le celle agli ioni di litio sono immerse in un fluido dielettrico a basso punto di ebollizione, che trasferisce il calore generato dalla batteria alla struttura di contenimento, che lo dissipa poi nell'ambiente circostante. Inoltre, dei PHP (Pulsating Heat Pipes) sono parzialmente inserite nel pacco batteria e immerse nel fluido principale. Sono dei dispositivi passivi di rimozione del calore che sfruttano un fluido bifase con circolazione capillare. Dal punto di vista tecnologico, i PHP presentano una struttura semplice ed economicamente vantaggiosa. In aggiunta, la loro compattezza, flessibilità, capacità di operare senza alimentazione elettrica e la possibilità di lavorare anche in condizioni di microgravità li rendono particolarmente adatti alle applicazioni aeronautiche, dove dimensioni, peso e forze d'inerzia

rappresentano delle variabili fondamentali. Il ruolo dei PHP è prevalentemente quello di smaltire picchi di potenza termica in condizioni di aumento eccessivo del carico.

Prendendo come riferimento il modello Alpha Electro della Pipistrel (Figura 16), l'alimentazione del veicolo è sostenuta da una batteria suddivisa in due blocchi collegati in parallelo, a loro volta composti da tre moduli ugualmente connessi. Il risultato finale è una potenza di 22 kWh, una tensione di 400 V e un peso totale di 116 kg.



Figura 16: Aereo elettrico Alpha Electro

Testare in laboratorio l'intera batteria sarebbe impraticabile sia da un punto di vista tecnologico che economico. Il singolo modulo è stato suddiviso in più sotto-moduli collegati in serie. Quest'ultimo sarà l'elemento che verrà testato nelle prove di laboratorio (Figura 17).

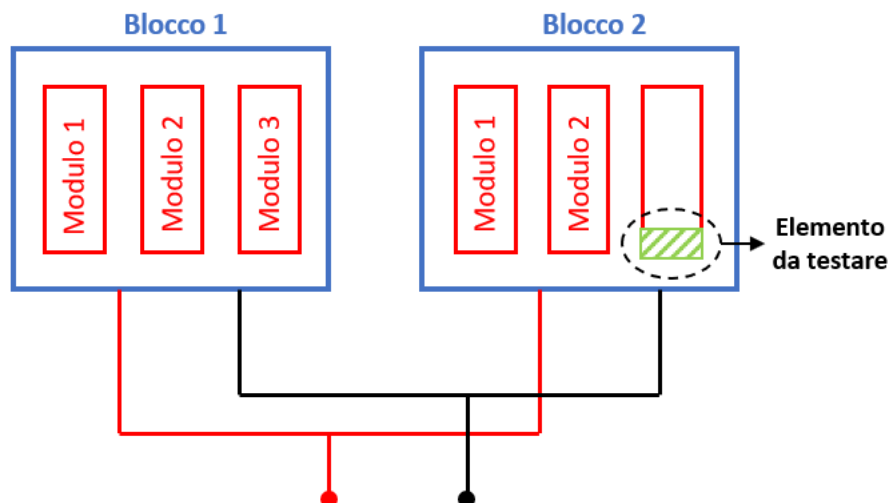


Figura 17: Schema della batteria

Ogni unità è realizzata con delle batterie con chimica NMC che hanno rispettivamente una tensione nominale di 3,7 V e una capacità di 4,5 Ah. Quest'ultime vengono collegate in modo da formare 14 celle in serie, ognuna composta da due batterie in parallelo. Il collegamento in parallelo permette di sommare le capacità, ricavando un valore di 9 Ah; mentre in serie si addizionano le tensioni, ottenendo un voltaggio nominale di 51,8 V. A pieno carico i parametri di riferimento sono 58,8 V e il C-rate massimo che si può testare è di 2,6C.

Il risultato finale raggiunto dalla progettazione della batteria è rappresentato dalla Figura 18 in sezione, in modo tale da osservarne i corrispettivi componenti, e dalla Figura 19 nella sua totalità.

La parte sperimentale di questa tesi si occupa di affrontare lo studio, tramite carico elettronico, della batteria nelle condizioni di raffreddamento passivo in aria per convezione naturale e con liquido diretto con metodo TPIC. Il fine è ottenerne un confronto e un'analisi preliminare delle due tipologie, prima dell'inserimento del sistema PHP.

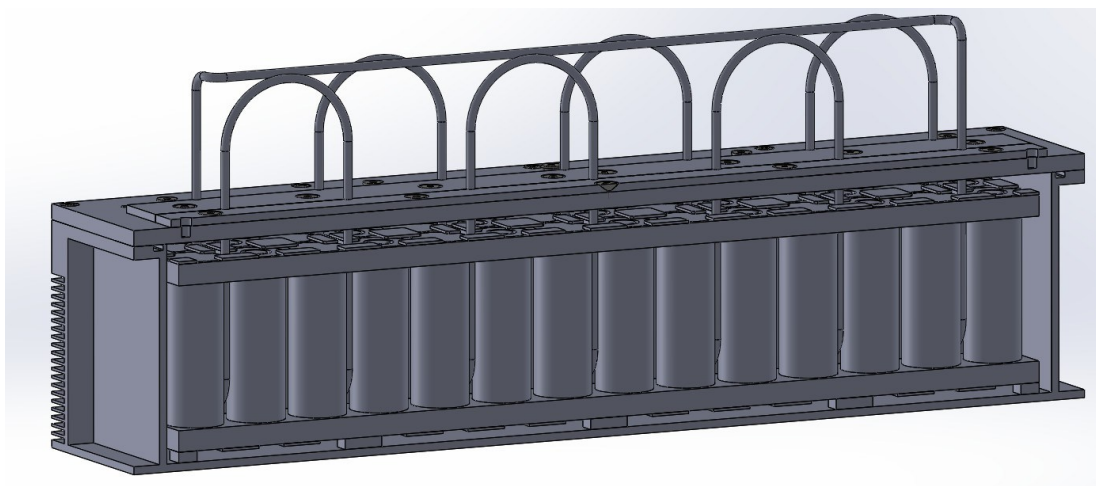


Figura 18: Sezione del progetto pacco batteria

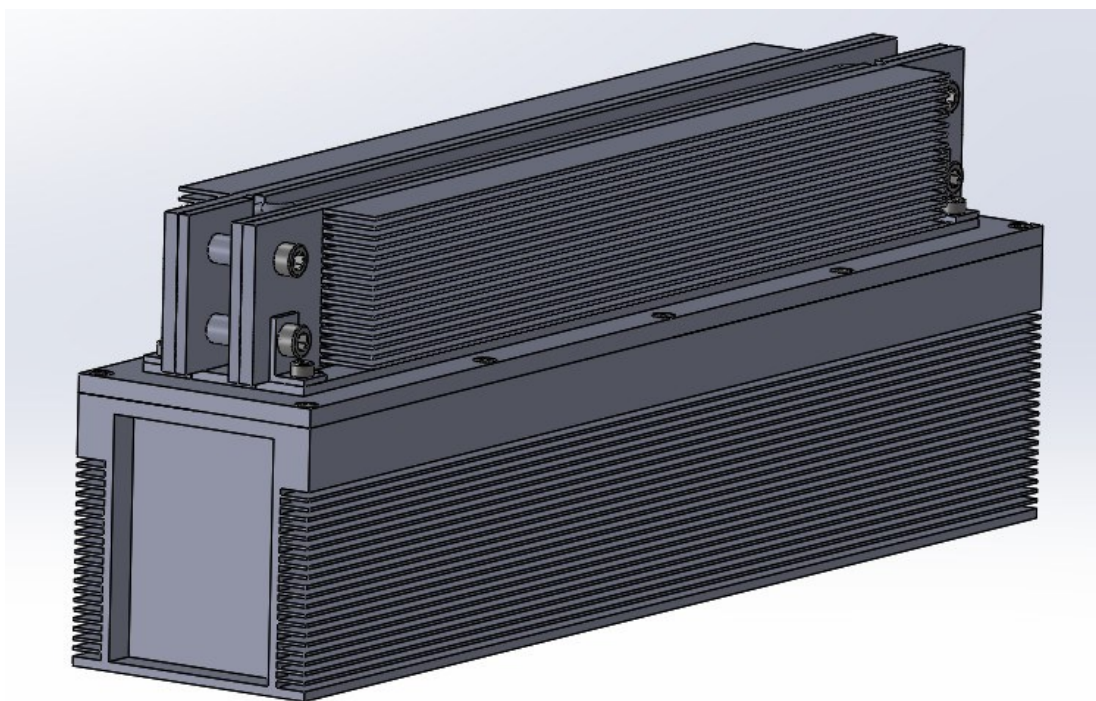


Figura 19: Progetto completo del pacco batteria

CAPITOLO 2: ALLESTIMENTO DEL SET UP SPERIMENTALE

2.1 Realizzazione del pacco batteria

Parte fondamentale per la realizzazione del pacco batteria è la creazione dei collegamenti tra le singole celle. Prima della saldatura si sono preparati i relativi sensori di temperatura e il supporto. Infatti, ogni coppia di batterie NMC presenta una termocoppia, incollata sull'involucro esterno di una delle due con un adesivo bicomponente ad alta conducibilità termica. In totale sono quindi 14 sensori, che consentono di acquisire la temperatura in più punti nella fase di scarica. Nello specifico le batterie cilindriche utilizzate sono delle Molicel 21700 (serie INR-21700-P42B) con diametro 21 mm e altezza 70 mm. La chimica NMC consente una tensione nominale di 3,6 V, che raggiunge i 4,2 V in condizione di massima carica. La capacità è di 4,5 Ah e la massa di una singola unità è di 70 g.

Il supporto, invece, è stato stampato in 3D ed è composto da due parti, una superiore e una inferiore, opportunamente modellate. Per consentire il corretto alloggiamento delle celle, il sostegno è stato limato e rifinito, oltre ad essere forato per garantire il passaggio delle termocoppie. Precedentemente all'inserimento è fondamentale verificare che ogni unità abbia una tensione di circa 3,53 V in condizioni di riposo (Figura 20).

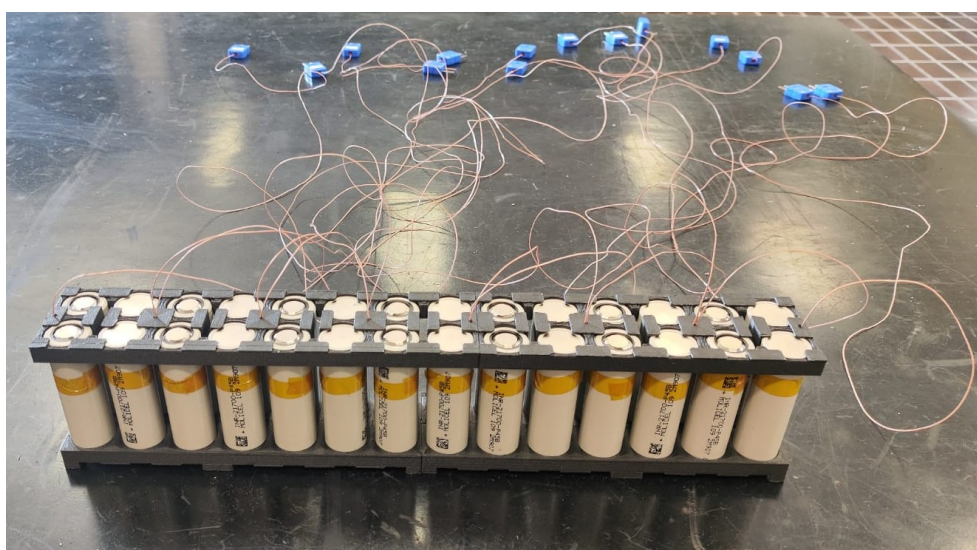


Figura 20: Pacco batteria con termocoppie

Per ottenere un unico pacco batteria è necessario che le unità siano saldate tra di loro in modo tale da poter collegarsi ad un unico polo positivo e negativo. Per consentire ciò sono state realizzate delle lamine metalliche utilizzate come ponti di collegamento, eseguendo prima le connessioni in parallelo e poi in serie. Successivamente, sono stati saldati a stagno i cavi per la carica (Figura 21). Per consentire una alimentazione più omogenea e completa del pacco batteria è fondamentale associare un conduttore ad ogni collegamento in serie, controllato da un sistema di ricarica esterno.

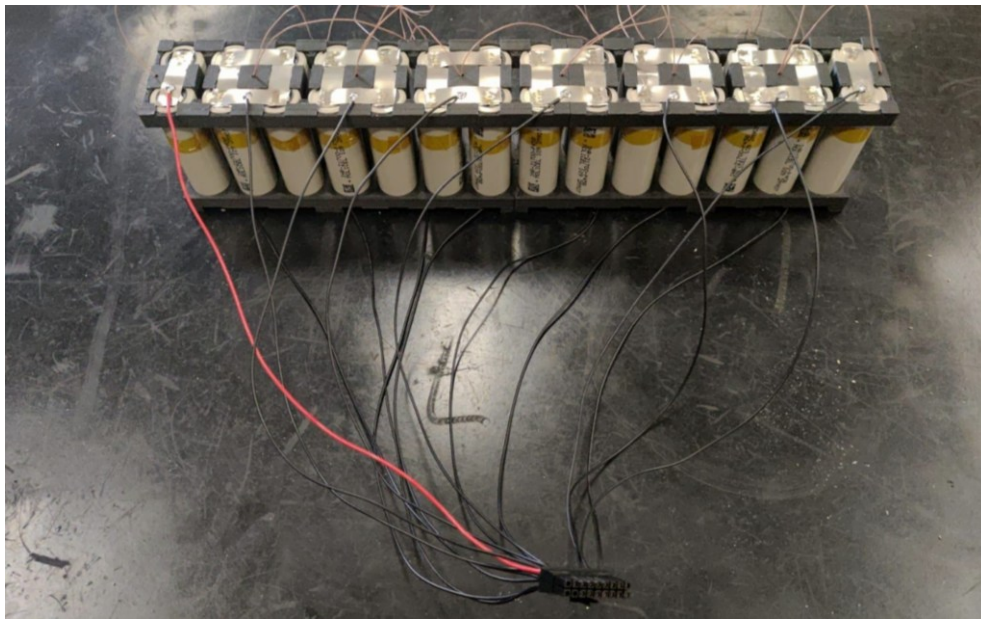


Figura 21: Pacco batteria completato

Di seguito è stato impostato il sistema di acquisizione associando ad ogni termocoppia un certo canale di riferimento. L'obiettivo era quello di fare una prima prova di scarica senza sistema esterno, per validare il corretto funzionamento dei sensori.

Il contenitore è realizzato in alluminio anodizzato per evitare che sia elettricamente conduttivo in modo da isolare l'insieme. Inoltre, ha una geometria opportunamente alettata lungo la dimensione maggiore per aumentare la dissipazione di calore verso l'esterno, che avviene per convezione. In aggiunta, presenta una scanalatura nella parte alta che permette

di posizionare una guarnizione lungo tutto il perimetro per limitare l'uscita del Novec sottoforma di vapore.

Prima di procedere con l'inserimento del pacco batteria nel contenitore sono stati saldati a stagno i cavi della scarica agli estremi del modulo. Inoltre, è stata collegata un'ulteriore termocoppia sul contenitore (la numero 15) utile per comprendere le proprietà dissipative del fluido. Scollegando i vari sensori e i sistemi di carica si è consentito il passaggio dei cavi nei tre fori presenti nel coperchio (Figura 22). Su ogni foro è avvitato un dado per ridurre il passaggio di vapore che si genera dal fluido di raffreddamento, tramite il metodo TPIC. La massa finale del pacco batteria a vuoto è di 4,295 kg.

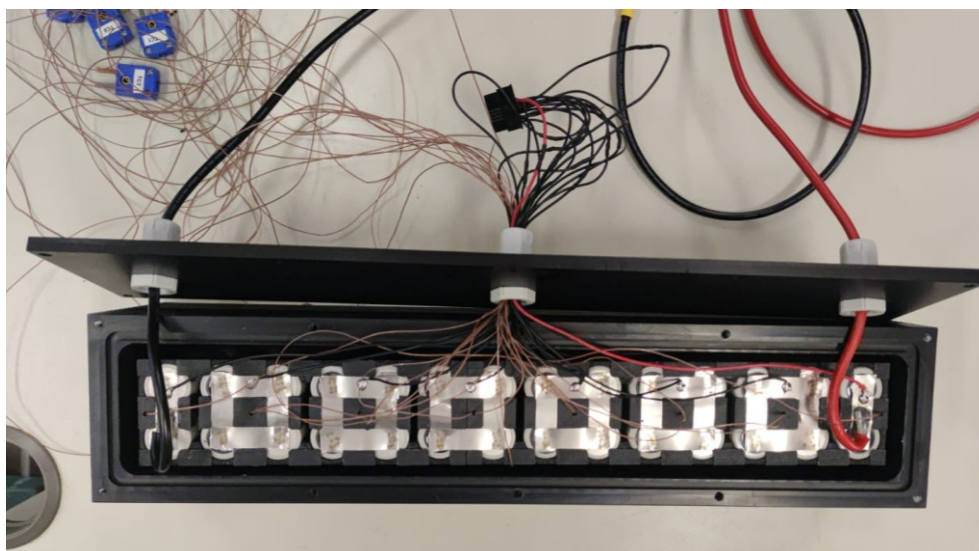


Figura 22: Pacco batteria pronto per le prove di scarica

Lo schema finale di posizionamento delle termocoppie (TC) è il seguente (Figura 23):

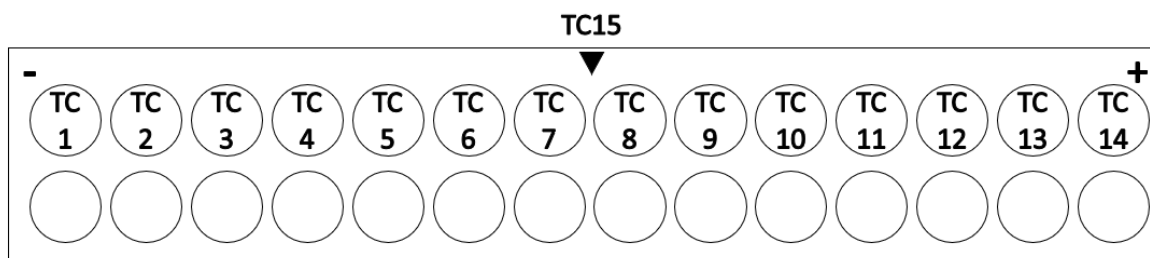


Figura 23: Schema posizionamento termocoppie

In conclusione va inserito il fluido dielettrico Novec 7000 fino a coprire completamente il pacco batteria all'interno del contenitore. Il Novec è caratterizzato da una temperatura di ebollizione di 34 °C e ha una conducibilità termica di 0,075 W/m·K. Inoltre, presenta un punto critico a 165 °C, oltre il quale non è più possibile ottenere una fase liquida distinta. La densità del liquido è di circa 1400 kg/m³.

2.2 Set-up di misura

Il set-up di misura (Figura 24) è composto da una serie di sensori termici e sistemi di monitoraggio dei parametri elettrici che permettono di ricavare l'andamento delle principali variabili durante la scarica.

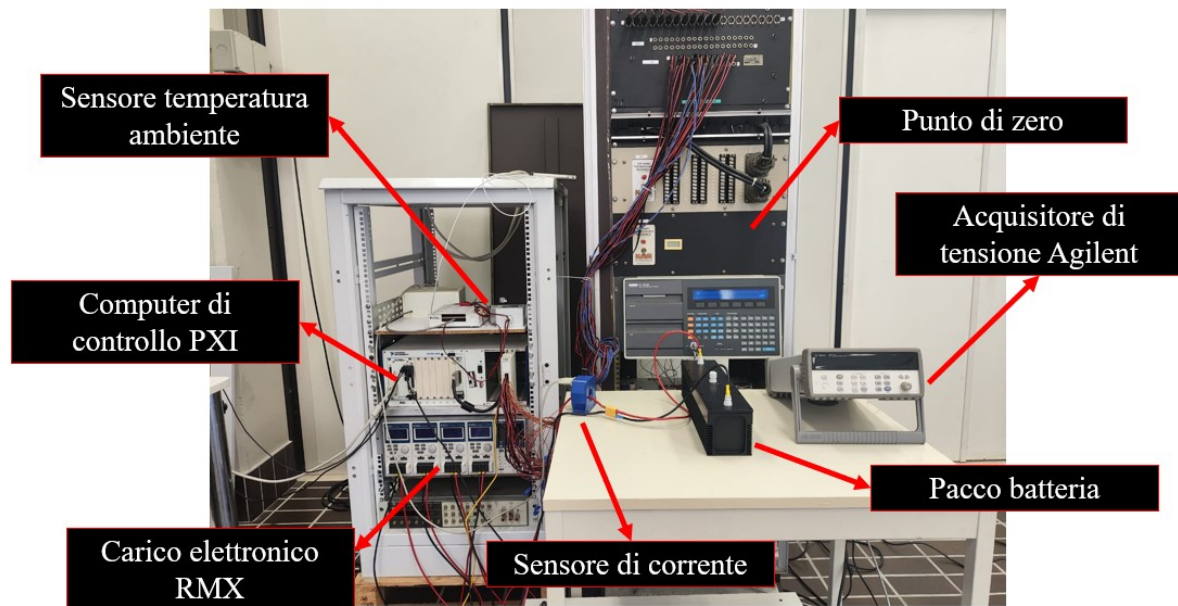


Figura 24: Set-up di misura e acquisizione

Dal punto di vista termico sono state posizionate 15 termocoppie, di cui 14 direttamente incollate sul pacco batteria e una fissata sul contenitore. Si tratta di termocoppie di tipo T con composizione rame-costantana che consentono un utilizzo continuo tra i -185°C e i 300°C. Dato il ruolo del rame di conduttore positivo e della costantana (rame-nichel) come conduttore negativo, il risultato della misurazione è una temperatura relativa, che viene resa assoluta tramite il

passaggio delle termocoppie nel punto di zero, generato da un apposito strumento. Infine, è fondamentale il collegamento alla scheda di acquisizione NI SCXI 1303 che invia i corrispettivi segnali elettrici al programma LabView, dove vengono convertiti in temperatura tramite un'opportuna matrice di calibrazione. Quest'ultima è stata ricavata tramite la precedente taratura delle termocoppie che ha permesso di descriverne la retta per ogni sensore e l'incertezza degli strumenti di $\pm 0,06$ °C.

La tensione invece è stata misurata tramite l'unità Agilent modello 34970A. Questo acquisitore consente un range di utilizzo da 0 a 100 V e una risoluzione di 0,22 mV (20 bit). Per le misure sperimentali fatte, l'incertezza è stata calcolata a $\pm 0,026$ V a partire dalla formula $\pm (0,045 \% \text{ della misura} + 0,06) \text{ V}$.

La misurazione della corrente durante la scarica è affidata al sensore LEM IT 75-S caratterizzato da un intervallo di misurazione di ± 85 A con un'incertezza di $\pm 0,02$ A. Contemporaneamente lo strumento OMEGA HX93BD quantifica la temperatura ambiente con un'incertezza di $\pm 0,6$ °C.

La scarica è gestita tramite il carico elettronico RMX 4005 che consente la scarica a corrente costante del pacco batteria tramite il collegamento ai due poli. È possibile combinare diversi moduli di carico elettronico (Electronic Load Devices) per personalizzare il sistema in base al numero di canali, alla potenza massima di carico e ai valori di tensione e corrente. Inoltre, è possibile collegare più dispositivi RMX 4005 in parallelo per ottenere una maggiore capacità di potenza durante le prove sulla batteria. Per ricreare un opportuno carico elettronico tale da raggiungere la massima scarica di 2,6C (23,4 A) sono state connesse in parallelo 4 unità identiche ognuna da 350 W, per un totale di 1400 W. Dal punto di vista della precisione di impostazione della corrente si ha $\pm 0,1$ % del fondo scala (F.S.) e una risoluzione di 2 mA. Per un singolo modulo l'intervallo di utilizzo è tra 0 e 70 A.

Per quanto riguarda la gestione della carica, invece, si è utilizzato un bilanciatore di batterie iSDT X16 in grado di rilevare la tensione lungo l'insieme e di compensare possibili differenze. Infatti, le celle non sono identiche tra di loro per varie motivazioni: invecchiamento, diverse capacità, lunghi periodi di inattività, problemi di connessione o scariche profonde. Inoltre, tale caricabatterie, consente di monitorare i principali parametri utili per verificare l'assetto dei collegamenti realizzati.

Tutti i sensori sono connessi ad un computer di controllo modello PXI 1050 configurato da un programma LabView. Questa unità è adatta per l'acquisizione dati con un elevato numero di canali con modalità operativa multiplex e parallela. Presenta 8 slot PXI che consentono l'alloggio di un'ampia gamma di moduli I/O multifunzione, I/O digitale, commutazione (switching) e strumentazione. Inoltre, ci sono altri 4 slot SCXI con cui è possibile ampliare le funzionalità di acquisizione implementando processi come filtraggio, isolamento, amplificazione, commutazione e linearizzazione.

Nello specifico, il sensore della corrente e della temperatura ambiente sono rilevati dalla scheda NI PXI 6289 che funziona con una risoluzione di 0,076 mV e in un range tra i 0 e i 10 V. L'incertezza è di $\pm 0,025$ mV. Lo strumento Agilent è ugualmente gestito tramite il computer di controllo con collegamento seriale (RS232).

2.3 Acquisizione ed elaborazione dati

In primo luogo vanno definite le tipologie di prove che sono state realizzate in laboratorio, essendo l'acquisizione e l'elaborazione delle conseguenze dirette. In totale sono stati fatti sei esperimenti di cui tre con raffreddamento ad aria e tre con il pacco batteria in immersione nel fluido. Tramite l'unità di controllo della scarica sono state impostate determinate correnti ottenute come multipli

della capacità di 9 Ah del sistema. Infatti, le tre prove si distinguono per un carico crescente di 1C, 2C e 2,6C. Tale impostazione influenza il tempo di esecuzione a partire da un'ora, per la prima prova, e scendendo a 23 minuti per la terza scarica (Tabella 1).

C-rate	Corrente di scarica [A]	Tempo di scarica [min]
1C	9	60
2C	18	30
2,6C	23,4	23

Tabella 1: Tempo teorico di scarica delle singole prove

L'acquisizione dei dati durante le prove è affidata a un computer di controllo modello PXI 1050 gestito da un programma su NI LabVIEW 2013 in grado di attivare e concludere la scarica. I parametri di riferimento rilevati sono la tensione del pacco batteria, la corrente, i valori misurati dalle termocoppie e la temperatura ambiente. La corretta procedura prevede una prima fase di avvio del programma in assenza di carico, in modo tale da definire le condizioni iniziali della prova e verificare l'operatività dei sensori. Una volta avviata la scarica, la tensione inizia a decrescere tramite un primo salto significativo, mentre la corrente raggiunge un valore pari a quello impostato. Una volta al di sotto dei 35 V la scarica viene interrotta, lasciando comunque attiva l'acquisizione, per monitorare la risposta della batteria. L'output finale della prova sono due file che riportano determinati valori per ogni istante di campionamento.

Nel primo file i parametri sono definiti ogni 0,04 s data una frequenza di acquisizione di 25 Hz. Dopo la prima colonna della matrice riferita al tempo si hanno in ordine la temperatura ambiente, la corrente e i valori misurati dalle termocoppie dalla 1 alla 15. Nel secondo file, invece, si associa ad ogni istante la tensione misurata dall'unità Agilent con un tempo simile di acquisizione.

L'elaborazione è stata portata avanti tramite MathLab considerando separatamente lo studio termico ed elettrico del sistema. Per quanto riguarda le temperature il file di riferimento è quello proveniente dall'unità PXI. Dopo il caricamento del file, il codice MathLab si occupa inizialmente di eliminare le parti dell'acquisizione superflue, cioè relative ai dati prima e dopo la scarica individuati tramite la corrente. Un passaggio fondamentale è poi quello della media ad 1 Hz. Infatti, con frequenza di campionamento a 25 Hz si ottiene una quantità significativa di dati che vanno riordinati in matrici con un minor numero di righe. Dunque, ogni 25 valori misurati per parametro si prende come riferimento il corrispettivo valore medio. Si ottiene così una matrice che caratterizza il sistema ogni secondo ricavandone un segnale più pulito, senza perdere informazioni significative, e consentendo di calcolare l'incertezza di tipo A.

La variabile tempo non risulta particolarmente utile per una successiva rappresentazione grafica dei risultati ottenuti. Infatti, non permetterebbe il confronto tra le corrispettive prove a causa di una durata differente. La soluzione è fare riferimento al SOC in modo tale da associare l'avanzare del test allo stato di carica della batteria partendo dal 100%.

Successivamente, si valutano le incertezze per ogni grandezza tramite la formula:

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$$

In cui U è l'incertezza standard combinata delle misure, U_A è l'incertezza ottenuta dall'analisi statistica delle misure e U_B è l'incertezza che dipende dalle caratteristiche dello strumento.

Quindi, una volta calcolata la deviazione standard σ e il numero dei campioni N si ottiene il termine di tipo A dal rapporto, $U_A = 2\sigma/\sqrt{N}$. U_B viene, invece, stabilita sulla base dei sensori scelti.

Essendo i valori termici delle temperature assolute, il confronto tra le varie prove potrebbe essere influenzato dalle condizioni iniziali. Quindi, ogni valore istantaneo delle termocoppie è stato sostituito con la relativa differenza di temperatura rispetto al primo valore acquisito. Inoltre, i sensori che tendono ad avere un andamento comune sono stati raggruppati in un valore medio.

Il codice si conclude con una valutazione degli scostamenti massimi e minimi delle temperature rispetto al valore medio, in modo tale da verificare la validità della semplificazione fatta. Infine è presente una parte dedicata alla temperatura ambiente utile ad individuare l'intervallo in cui oscilla.

Il secondo file relativo alla tensione è stato elaborato con un codice differente seguendo lo stesso procedimento. Nella parte iniziale si va a impostare la corrente di scarica e il tempo su cui mediare le grandezze, anche in questo caso pari a un secondo. Si procede con il caricamento del file e l'eliminazione della parte finale dopo la scarica. Poi si mediano i valori ad 1 Hz. In tal caso, per la valutazione del SOC si utilizza la corrente precedentemente impostata, data l'assenza del valore istantaneo in questo file. Infine, si effettua il calcolo delle incertezze.

CAPITOLO 3: RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE

In questo paragrafo vengono riportati tutti i risultati sperimentali, con una determinata importanza rivolta al confronto finale tra i due metodi di raffreddamento. Saranno quindi rappresentati i grafici ottenuti dalle prove con C-rate di 1, 2 e 2,6C con l'utilizzo di aria o Novec, soffermandosi sulle temperature e le tensioni ricavate.

3.1 Prove in aria

Per ottenere una corretta revisione dei dati è fondamentale prendere in considerazione anche la variazione delle condizioni ambientali durante la prova, principalmente della temperatura. Per questo, in ogni scarica si valutano i valori all'inizio e alla fine e la differenza corrispettiva. Partendo dalle prove in aria si ha la seguente tabella (Tabella 2):

C-rate	1C	2C	2,6C
Max [°C]	23.88	24.75	26.22
Min [°C]	23.14	22.19	23.76
ΔT [°C]	0.74	2.56	2.46
Media [°C]	23.51	23.47	24.98

Tabella 2: Temperatura ambiente nelle prove in aria

Di seguito, invece, i grafici che rappresentano l'andamento delle termocoppie al variare del SOC, a partire dalla prova con C-rate pari a 1C, cioè a 9 A. Dalla Figura 25 si nota un andamento delle termocoppie centrali, cioè dalla 2 alla 13, sovrapponibile; mentre quelle agli estremi, numerate come 1 e 14, tendono a mantenere temperatura più basse. Questa è una delle conseguenze dei sistemi di raffreddamento ad aria, cioè una marcata disomogeneità termica tra le varie celle; influenzata anche da una maggiore superficie delle batterie laterali esposta verso il contenitore, lungo la quale non subiscono l'azione dell'irraggiamento delle altre celle. Dato che tale comportamento è stato riscontrato anche nelle prove a 2C e 2,6C, si è scelto di accumunare i valori delle celle centrali in un'unica media (Figura 26).

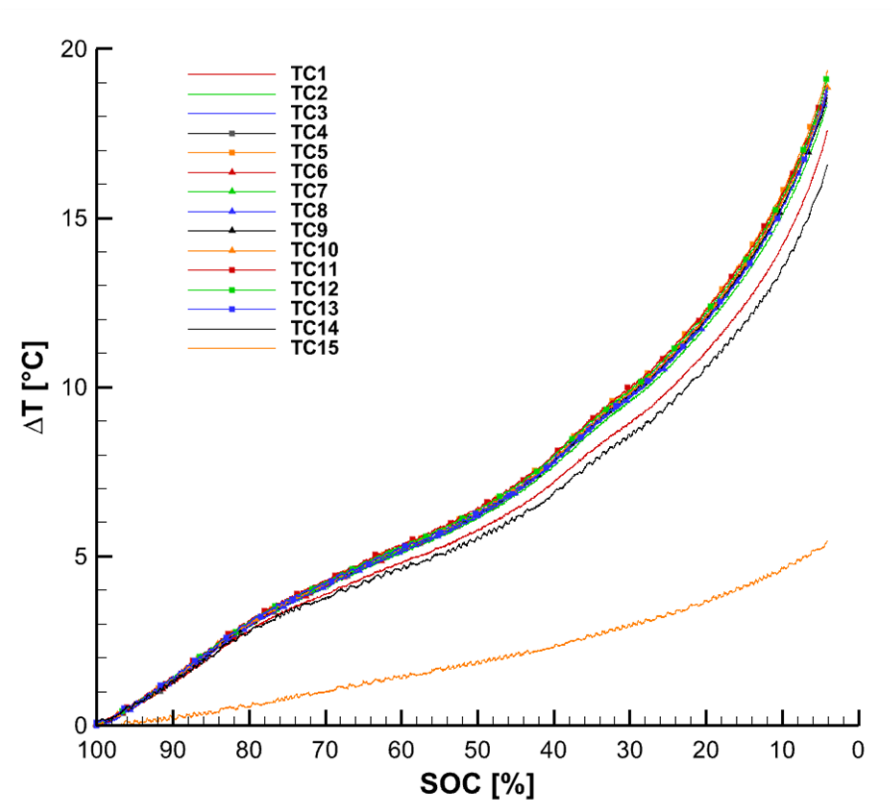


Figura 25: Andamento della differenza di temperatura per una scarica 1C

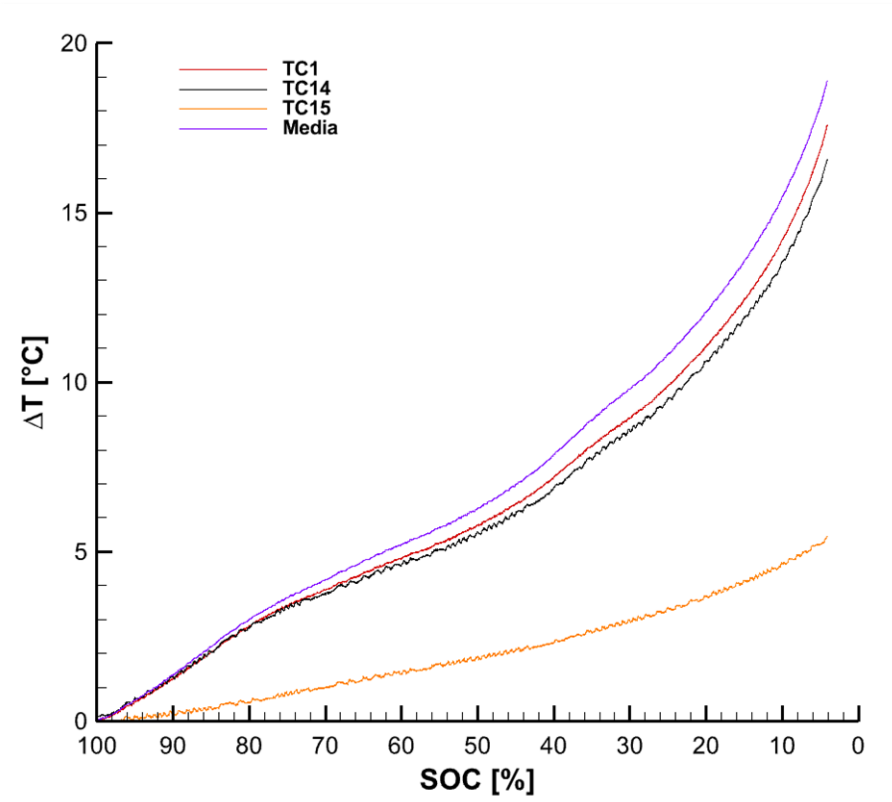


Figura 26: Andamento del valore medio per una scarica 1C

Per avere un'ulteriore verifica della semplificazione adottata, si è valutato il corrispettivo scostamento massimo e minimo delle temperature rispetto al valore medio. Non presentandosi variazioni eccessive, si è considerata accettabile la sostituzione fatta (Tabella 3):

C-rate	1C	2C	2,6C
Max [°C]	0.47	0.73	0.58
Min [°C]	-0.49	-0.72	-0.68

Tabella 3: Scostamenti massimi e minimi in aria

Per quanto riguarda, invece, la TC 15 si evidenzia che il contenitore risente molto meno della generazione di calore. Difatti, l'aria ha un'elevata resistenza termica tale da fungere come isolante, dissipando meno calore verso l'esterno rispetto ad altri fluidi termovettori. Scaricando la batteria a 2C, che corrisponde ad una corrente di 18 A, si denota, ovviamente, un aumento delle temperature, mantenendo comunque invariato l'andamento del contenitore (Figura 27).

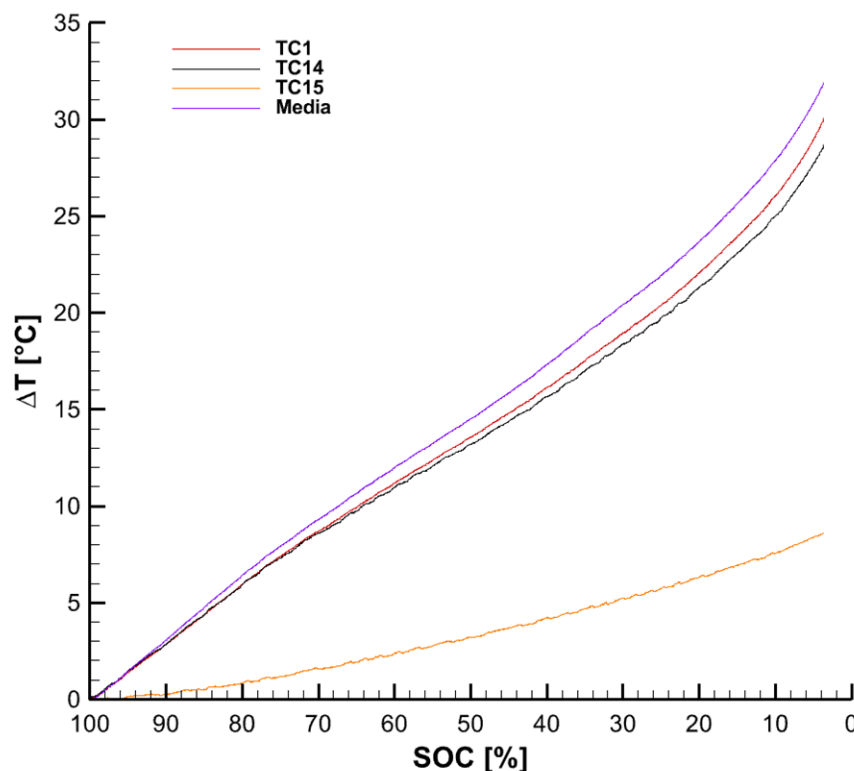


Figura 27: Andamento della differenza di temperatura per una scarica 2C

Inoltre, si sottolinea una crescita monotona della curva con diverse variazioni di pendenza. Risultati eguali si ottengono nella prova a 2,6C con corrente di scarica pari a 23,4 A (Figura 28).

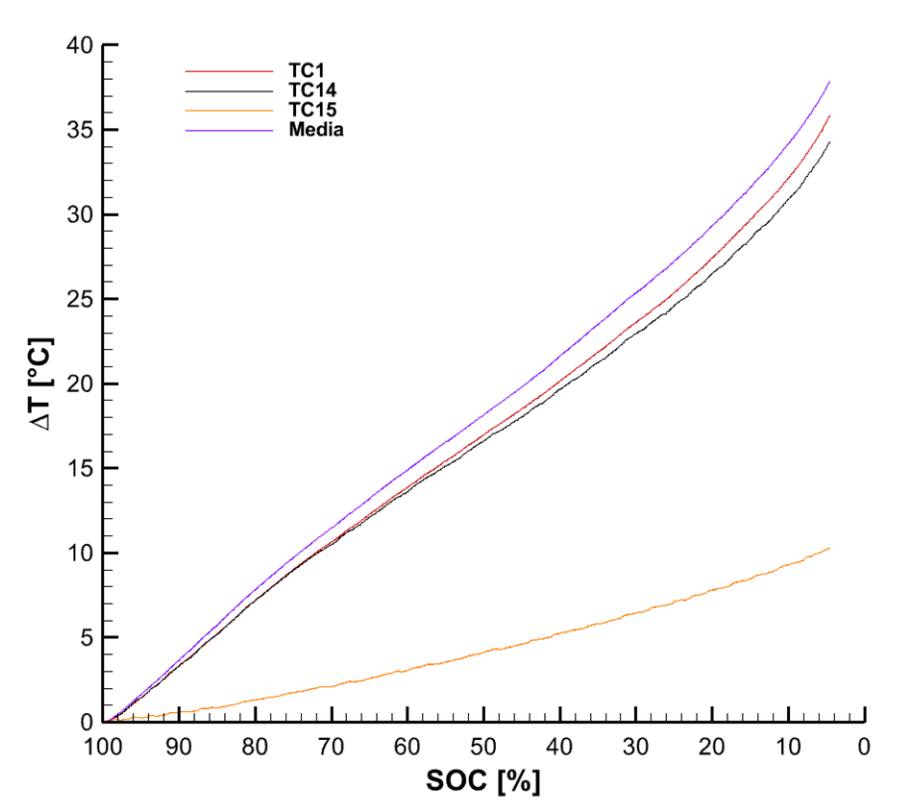


Figura 28: Andamento della differenza di temperatura per una scarica 2,6C

Volendo fare un confronto dei tre valori intermedi ottenuti (Figura 29), è evidente un comune andamento crescente che presenta un marcato aumento iniziale. L'incremento diminuisce poi nel tratto successivo in maniera ridotta, fino alla parte finale dove cresce più rapidamente. Inoltre, è evidente, alla fine della scarica, un aumento della temperatura al crescere del C-rate: dalla prova a 1C si ottiene un ΔT di 18,97 °C, la prova a 2C conclude con un ΔT di 31,92 °C, mentre con 2,6C si raggiunge un ΔT di 37,88 °C. A partire dalle considerazioni fatte per la temperatura ambiente, si nota come in tutte le prove la batteria tende a lavorare al di fuori dell'intervallo termico ideale per il corretto funzionamento. Difatti, solo nella prova con C-rate pari a 1C si rispetta il limite dei 40°C, che viene però superato nella parte conclusiva della scarica.

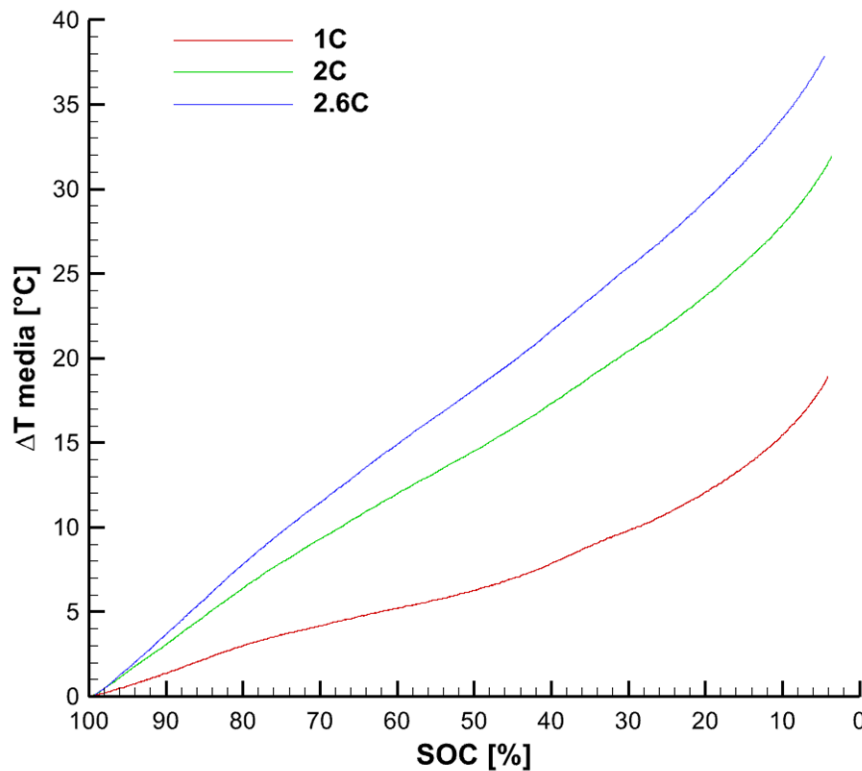


Figura 29: Confronto andamenti valore medio delle tre prove

Concludendo con le prove in aria, si è osservata la tensione. In tal caso le condizioni iniziali sono uguali per ogni prova con circa 58,6 V data la piena carica della batteria (Figura 30). È interessante notare come l'andamento del grafico sia caratterizzato da una caduta iniziale significativa e quasi istantanea, seguita poi da un tratto a pendenza quasi costante e da una ricaduta finale a partire da un SOC di circa il 25 %. Le tre prove si distinguono perché, ad un aumentare della corrente di scarica, cresce la caduta di tensione nella parte iniziale, seppure l'andamento sia per il resto lo stesso.

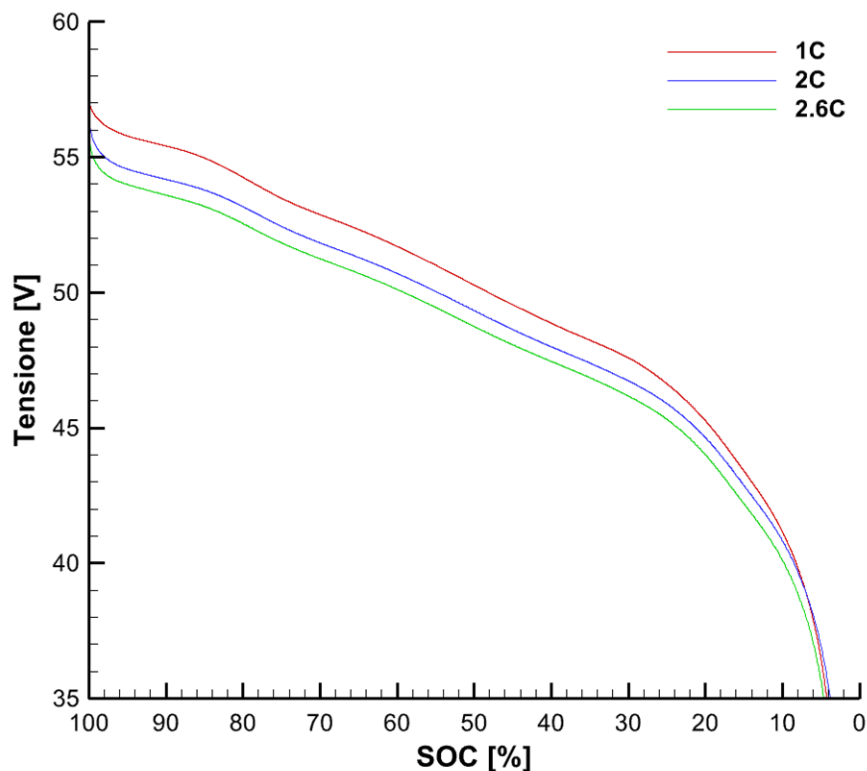


Figura 30: Andamento delle tensioni nelle tre prove

3.2 Prove con Novec

Nel caso delle prove con fluido Novec, a contatto diretto con le celle, le considerazioni preliminari fatte sono identiche a quelle in aria. Dunque, si riporta la corrispettiva tabella della temperatura ambiente per le varie scariche (Tabella 4):

C-rate	1C	2C	2,6C
Max [°C]	22.05	24.27	23.94
Min [°C]	19.43	23.48	22.98
ΔT [°C]	2.62	0.79	0.96
Media [°C]	20.74	23.87	23.46

Tabella 4: Temperatura ambiente con Novec

Partendo dalla prova a 1C (Figura 31) si nota come in questo caso le termocoppie sulle batterie tendono tutte ad assumere gli stessi valori a

differenza del caso in aria. La motivazione sta proprio nella variazione del fluido di raffreddamento che è in grado di condurre il sistema ad una condizione di maggiore uniformità termica. Inoltre, il liquido riesce a dissipare maggior calore verso l'esterno, innalzando di più la temperatura del contenitore.

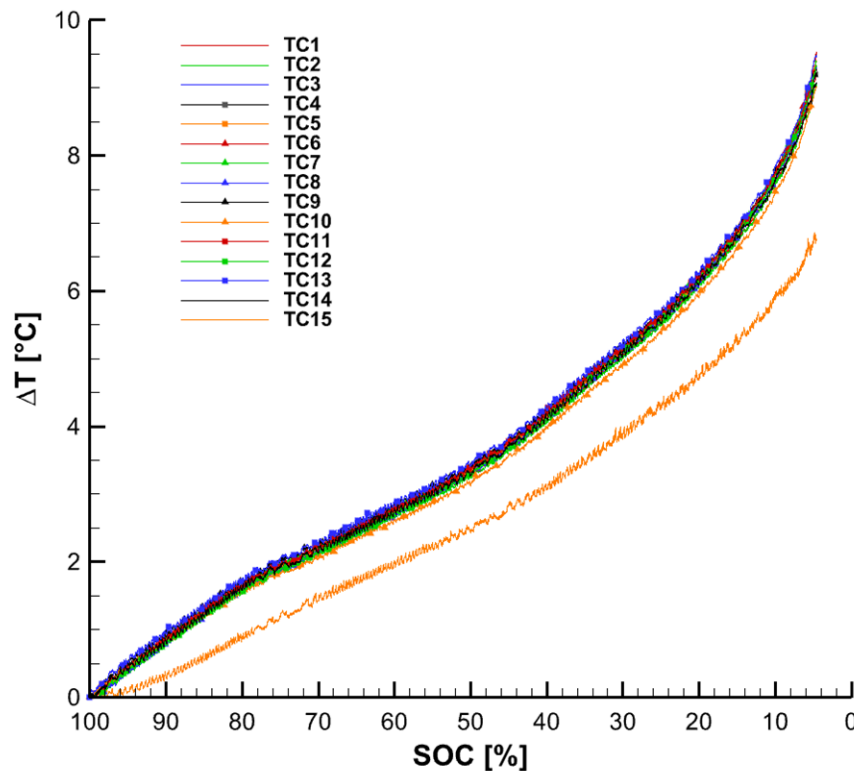


Figura 31: Andamento della differenza di temperatura per una scarica 1C

In queste condizioni è utile ampliare la valutazione del valor medio a tutte le termocoppie, in modo tale da ottenere un grafico più chiaro e definito (Figura 32). Soffermandoci sulla pendenza delle curve, si nota l'assenza di specifiche variazioni di pendenza per valori ridotti del SOC, ciò significa che il fluido non ha subito l'ebollizione. Difatti, quest'ultima avrebbe portato ad un coefficiente di scambio termico convettivo maggiore e ad una minor variazione di temperatura del fluido, dato il passaggio di stato. A confermarlo anche la scala dell'asse delle ordinate che, a partire dalla temperatura ambiente della prova, non raggiunge mai i 34°C, che definiscono l'inizio dell'evaporazione.

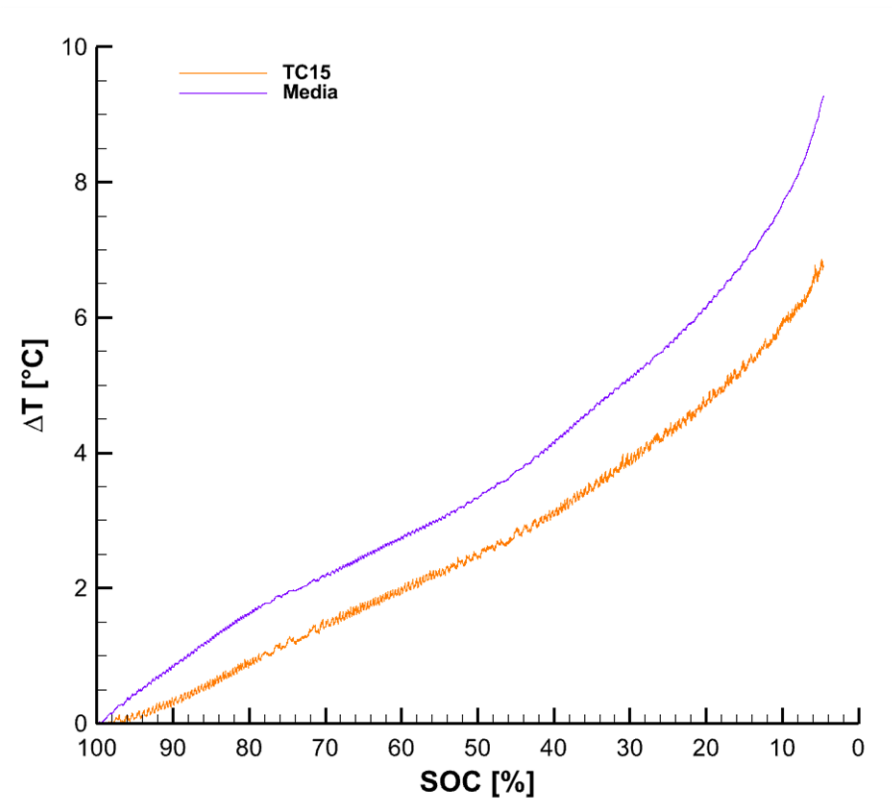


Figura 32: Andamento del valor medio per una scarica 1C

Osservando, invece, la prova con C-rate pari a 2C (Figura 33) si ha, anche in questo caso, una temperatura del contenitore più elevata rispetto al caso in aria e, soprattutto, un evidente variazione della pendenza verso la fine della prova. La causa è il corrispettivo aumento di temperatura rispetto alla scarica di 1C.

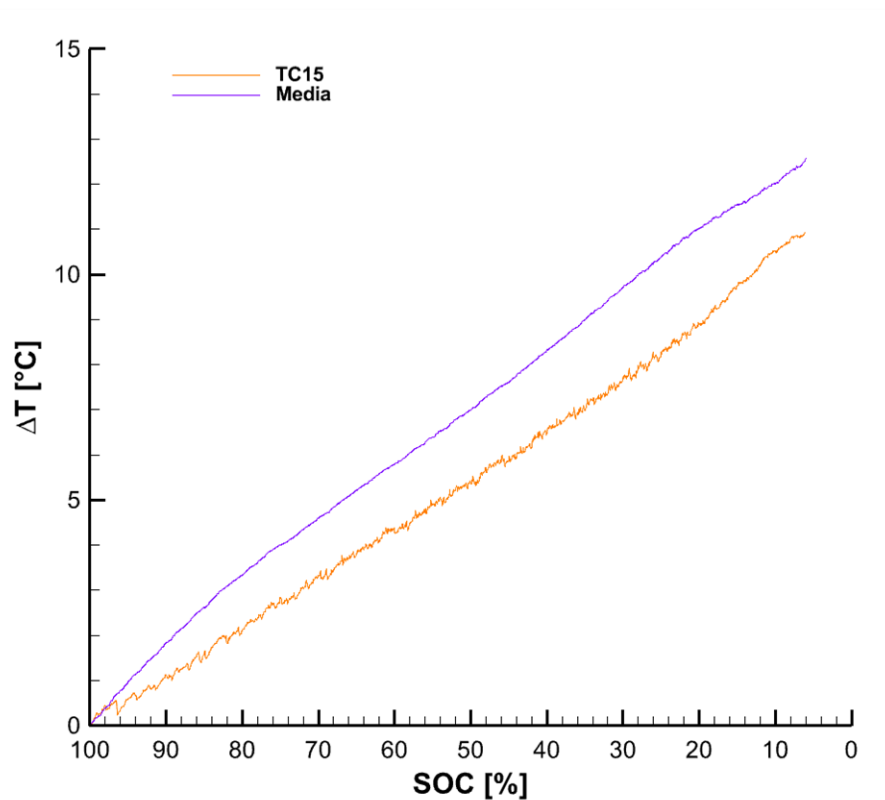


Figura 33: Andamento della differenza di temperatura per una scarica 2C

Nel caso della prova a 2,6C (Figura 34) vi sono stati problemi relativi alla termocoppia 10 che ha rilevato dei valori anomali all’inizio della scarica, mentendosi poi a delle temperature più basse rispetto alla media. Dunque, è stato scelto di eliminare direttamente il sensore dall’elaborazione dati, in modo tale da mantenere valido l’esperimento.

Inoltre, con la massima corrente di scarica si è generata una quantità rilevante di vapore che è stata approssimativamente valutata misurando la differenza di massa prima e dopo la prova. Il totale dell’insieme pacco batteria e liquido ammontava a 5,370 kg, di cui circa 1,075 kg di fluido di raffreddamento. Successivamente alla scarica si è misurato 5,285 kg, ottenendo quindi la formazione di 85 g di vapore.

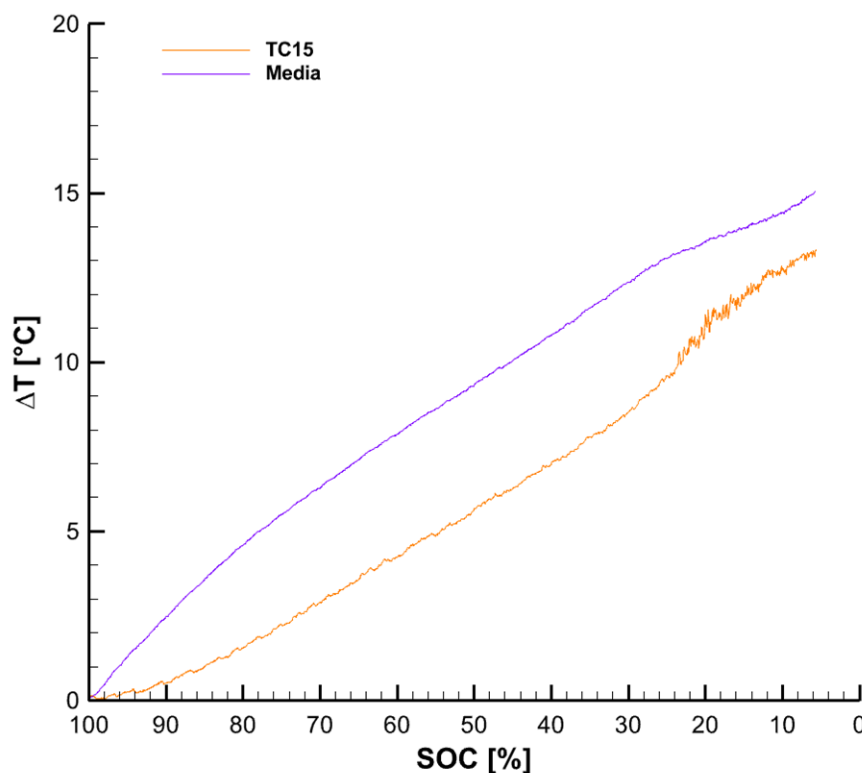


Figura 34: Andamento della differenza di temperatura per una scarica 2,6C

Per quanto riguarda gli scostamenti massimi e minimi rispetto al valore medio è stata ricavata la corrispondente tabella, escludendo nuovamente la termocoppia 10 dalla prova a 23,4 A (Tabella 5).

C-rate	1C	2C	2,6C
Max [°C]	0.23	0.37	0.58
Min [°C]	-0.29	-0.63	-0.56

Tabella 5: Scostamenti massimi e minimi con Novec

Concludendo l'analisi degli andamenti delle temperature con Novec a contatto, si è realizzato un confronto dei valori medi delle varie prove (Figura 35) al fine di dimostrare che più aumenta la corrente di scarica, più il punto di variazione di pendenza avviene a SOC maggiori. Inoltre, si sono valutati le corrispondenti differenze di temperatura alla fine della scarica: nel caso di 1C si ha un ΔT di 9,31 °C, nel caso 2C si ottiene 12,58 °C e con 2,6C si arriva a un ΔT di 15,06

°C. Dunque, in tutte e tre le prove il sistema di raffreddamento è stato in grado di mantenere il pacco batteria al di sotto della massima temperatura di lavoro.

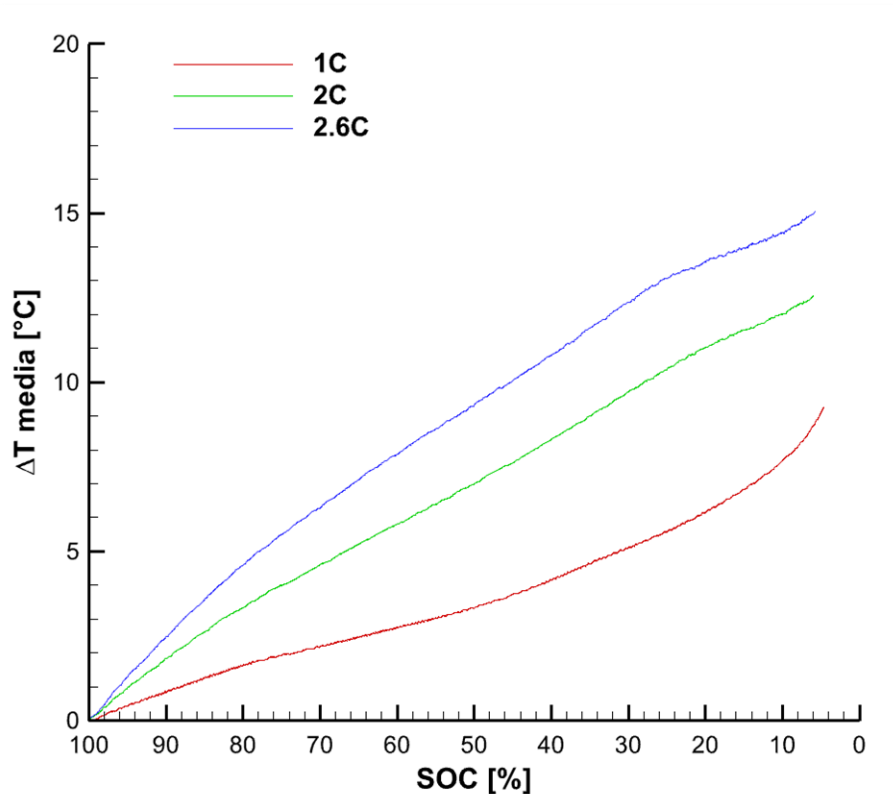


Figura 35: Confronto andamenti valore medio delle tre prove

La tensione nelle prove con fluido risulta seguire le stesse curve delle prove in aria, fatta eccezione per una decrescita più marcata nella prova a 2C per valori bassi di SOC (Figura 36).

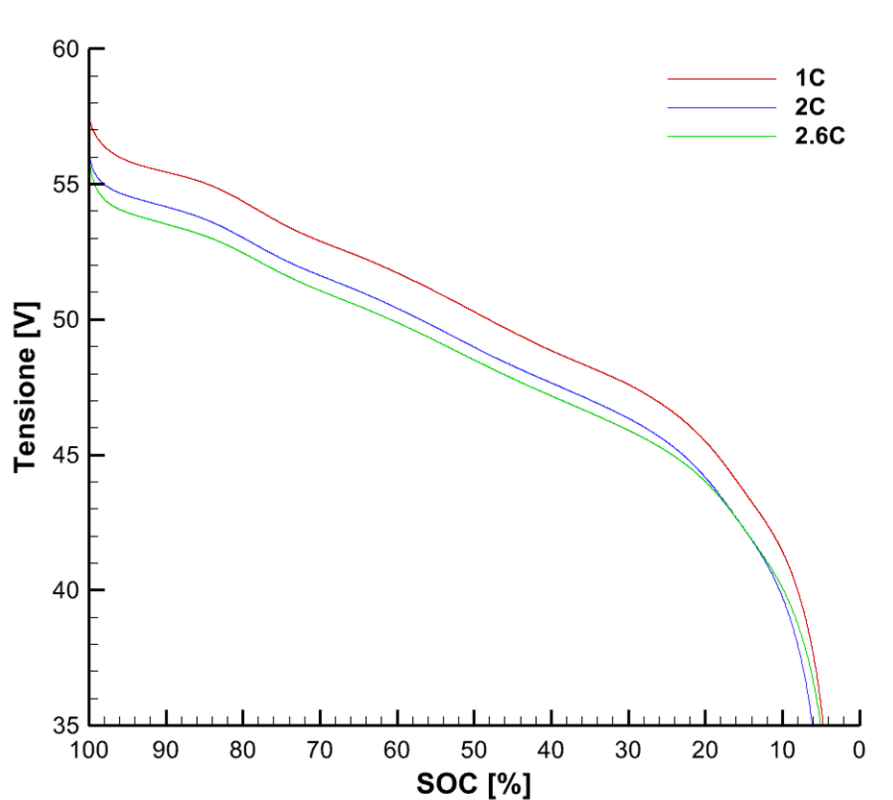


Figura 36: Andamento delle tensioni nelle tre prove

3.3 Confronto tra le prove

Le informazioni principali, relative ai due sistemi di raffreddamento, si ricavano una volta messe a confronto le corrispettive prove sia dal punto di vista termico che elettrico. Per quanto riguarda le termocoppie (Figura 37), si denota un evidente abbassamento delle temperature nel caso di utilizzo del fluido bifase. Infatti, facendo riferimento alla prova più gravosa con corrente massima (curve blu in Figura 37), si ottiene una temperatura maggiore di 22,75 °C nella prova in aria rispetto a quella con fluido, considerando i valori medi. Dunque, si dimostra uno dei principali vantaggi del metodo TPIC, cioè una migliore capacità di controllo termico della batteria; oltre ad una maggiore omogeneità termica già osservata nello studio totale delle singole prove.

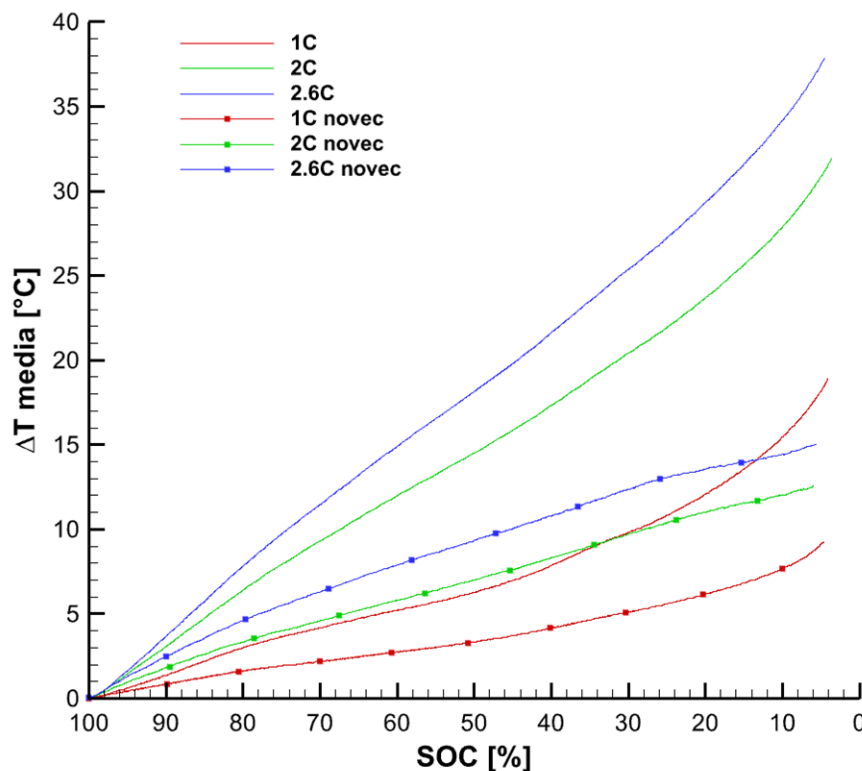


Figura 37: Confronto degli andamenti delle temperature medie

Altrettante osservazioni si possono ricavare dal grafico della temperatura del contenitore (Figura 38). Difatti, in questo caso, il fluido risulta dissipare maggiore calore verso l'esterno, in parte immagazzinato dalla struttura attorno del pacco batteria. Il contenitore lo cede poi all'ambiente esterno semplicemente per convezione naturale, dunque con un coefficiente di scambio termico convettivo non sufficiente per compensare l'aumento della temperatura. L'aria da questo punto di vista ha un comportamento più isolante (conducibilità termica di circa $0,026 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ a 20°C), a discapito di un maggior rischio di surriscaldamento delle celle stesse. Tuttavia, la differenza non è dovuta solo alla conducibilità termica maggiore ($0,075 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ per il Novec), ma soprattutto dall'attivarsi di moti convettivi a cause dell'ebollizione, che aumentano il coefficiente di scambio termico convettivo.

Facendo riferimento al caso più gravoso, cioè con C-rate di 2,6C, si ottiene una differenza di circa 3 °C tra la prova con Novec e con aria. (curve blu in Figura 38)

Nonostante questo grafico sia un riferimento utile, presenta comunque delle problematiche, nello specifico per le curve ricavate nella prova con Novec. In effetti, sono evidenti dei rumori del segnale che si ripetono in determinati intervalli. Una valutazione più approfondita ha permesso di definire la frequenza del disturbo a circa 1 Hz, dunque probabilmente non si tratta di un problema elettrico essendo tale valore troppo basso. La causa è probabilmente legata al fissaggio della stessa termocoppia che non è stata incollata, ma attaccata tramite del nastro.

In altri casi, prove del genere possono essere influenzate dalla stessa evaporazione del fluido, le cui bolle possono scorrere sulla termocoppia e portare a delle oscillazioni. Tuttavia, non è questo il caso dato che il rumore è presente anche nella prova a 1C, priva del passaggio di fase.

Inoltre, la curva verde in Figura 38, nel caso della batteria immersa, mostra un evidente salto iniziale non previsto, che rende la curva non valida per una corretta analisi del sistema.

Dal punto di vista elettrico, invece, non si riscontra una differenza così netta. Nella Figura 39 le tensioni, soprattutto nella parte iniziale, tendono tutte ad assumere gli stessi valori; mentre per valori più bassi di SOC si distinguono, ma non in maniera così significativa.

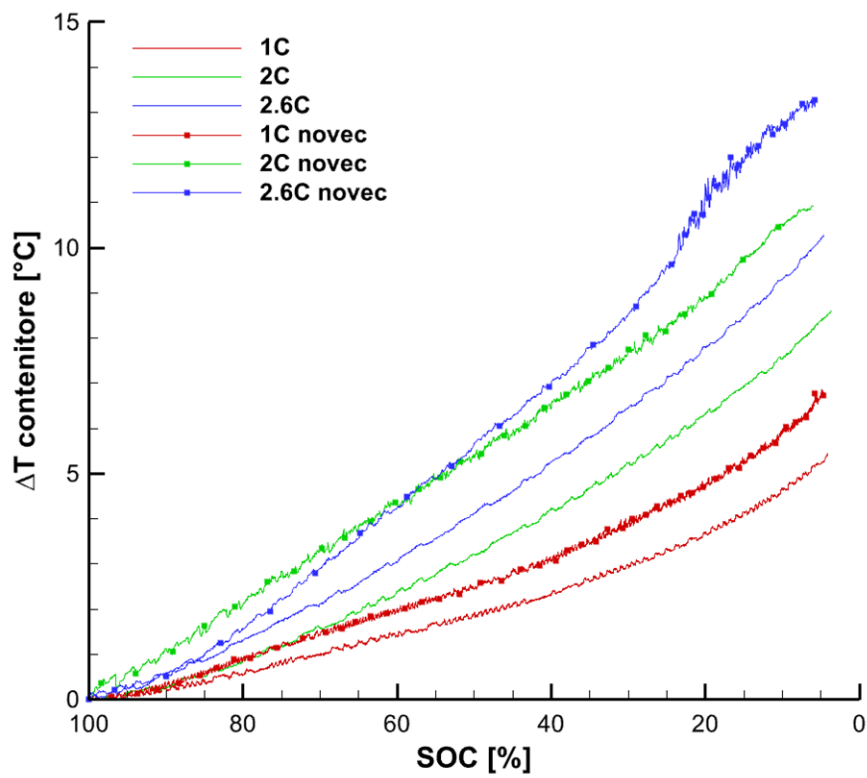


Figura 38: Confronto degli andamenti temperature del contenitore

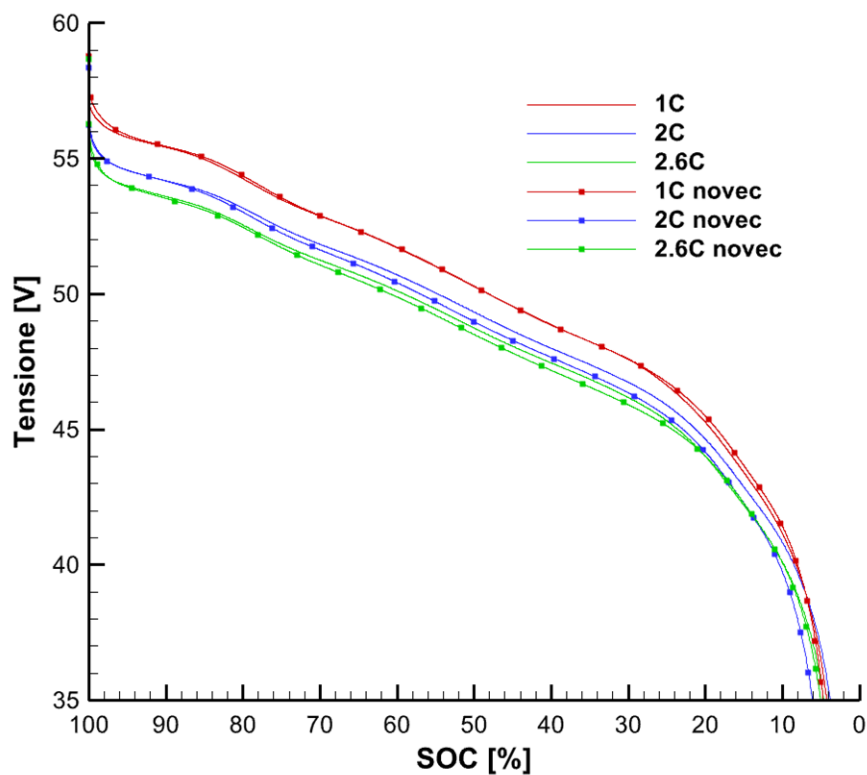


Figura 39: Confronto degli andamenti delle tensioni

CONCLUSIONI

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di confrontare sperimentalmente un sistema di raffreddamento passivo in aria, per convezione naturale, e uno a immersione bifase (TPIC), applicati ad un pacco batteria a ioni di litio per alimentazione di un aereo elettrico (AEA).

Nello specifico sono state utilizzate delle celle NMC collegate tra di loro per ricreare una singola unità di alimentazione di uno specifico velivolo elettrico, l'Alpha Electro della Pipistrel. La ricerca ha come fine lo studio termico ed elettronico di tale modello prima dell'implementazione dei Pulsating Heat Pipes (PHP). Il prototipo è stato strumentato mediante termocoppie e sottoposto a test di scarica a differenti C-rate in laboratorio (1C, 2C e 2,6C). Le prove sono state eseguite sia in aria sia in fluido dielettrico Novec, consentendo una valutazione diretta delle relative prestazioni.

I risultati hanno dimostrato una maggiore efficienza nel sostenere il carico termico da parte del sistema di raffreddamento con immersione del pacco batteria. In particolare, il fluido Novec ha permesso di ridurre l'innalzamento della temperatura delle singole celle e di mantenere una maggior uniformità termica, limitando le differenze di temperatura tra i punti dell'insieme. Dal punto di vista elettrico, invece, le tensioni tendono tutte ad avere lo stesso andamento decrescente nelle varie prove.

Tali vantaggi sono stati particolarmente riscontrati negli esperimenti con correnti di scarica elevate. Facendo riferimento al caso più gravoso, corrispondente a una scarica di 2,6C, alla fine delle prove si è ottenuto un ΔT di 22,75 °C tra il sistema di raffreddamento in aria e con Novec, dimostrando un netto divario tra le due soluzioni. Inoltre, il fluido dielettrico dimostra maggiori capacità dissipative portando ad un aumento della temperatura del contenitore, mentre l'aria si comporta da isolante impedendo al pacco batteria di cedere il calore verso l'esterno.

Bisogna inoltre osservare che il sistema di raffreddamento ad immersione ha sempre consentito di mantenere la temperatura della batteria all'interno dell'intervallo ideale di funzionamento, non superando i 40 °C. Al contrario, le prove in aria hanno sempre raggiunto condizioni critiche. Nello specifico, con un C-rate di 2,6C si è raggiunto un ΔT di 37,88 °C, che corrisponde ad una temperatura assoluta di circa 64 °C; mentre con 1C la soglia limite di lavoro è stata superata solo alla fine della scarica.

L'analisi sperimentale ha inoltre mostrato che fenomeni legati al cambiamento di fase, nel metodo TPIC, si sono manifestati per C-rate pari a 2C e 2,6C e hanno comportato un aumento delle capacità di gestione del carico termico. Tuttavia, questa tecnologia può avere determinati svantaggi proprio a causa della formazione di vapore, che richiede, in primo luogo, una corretta impermeabilizzazione del pacco batteria, in modo tale da impedirne la fuoriuscita.

Nel complesso, i risultati ottenuti confermano le potenzialità del metodo TPIC descritte dalla letteratura scientifica. Dunque, risulta particolarmente interessanti per applicazioni aeronautiche elettriche, garantendo omogeneità termica, capacità di gestire elevati carichi, sicurezza e controllo di condizioni di emergenza come thermal runaway.

Sviluppi futuri nel campo dell'aviazione presentano da un lato l'ottimizzazione del peso e dell'aerodinamica del velivolo, con l'obiettivo di ridurre i carichi richiesti mantenendo un numero ristretto di passeggeri. Dall'altro, lo studio dei sistemi di gestione termica rivolto a carichi maggiori tramite la valutazione di fluidi dielettrici differenti, di diverse configurazioni geometriche del contenitore e di sistemi ibridi di raffreddamento, tramite l'integrazione di più dispositivi di trasporto del calore.

Bibliografia

- [1] B. A. Adu-Gyamfi, C. Good, “Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies”, *Transportation Engineering*, vol. 9, Art. no. 100134, 2022.
- [2] A. Osman, A. Al Tahhan, T. Younes, M. Ramadan, M. Ghazal, M. Alkhedher, “Battery management in electric aviation: A bibliometric review of technologies, regulations, and international collaborations”, *Journal of Energy Storage*, vol. 142, Art. no. 119523, 2026.
- [3] V. Kanna, P. Selvaraj, R. K. Velamati, “Thermal management innovations for solid-state batteries in electric vehicle applications: a comprehensive review of heat generation, cooling technologies, and sustainability pathways”, *Journal of Energy Storage*, vol. 151, Art. no. 120517, 2026.
- [4] L. Zhou, S. Zhang, A. Jain, X. Li, “Recent advances in indirect liquid cooling of lithium-ion batteries”, *Journal of Energy Storage*, vol. 132, Art. no. 117750, 2025.
- [5] J. Liu, L. Tao, Q. Yang, J. Wang, “Recent advances in immersion cooling for thermal management of lithium-ion batteries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 226, Art. no. 116492, 2026.
- [6] D. Bernardi, E. Pawlikowski, J. Newman, “A general energy balance for battery systems”, *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 132, pp. 5-12, 1985.
- [7] E. Tosun, P. Ilincic, S. Keyinci, A. C. Yakaryilmaz e M. Ozcanli, “A Review on air and Liquid Cooling Strategies for lithium-ion batteries”, *Applied Sciences*, vol. 15, Art. no. 12617, 2025.
- [8] B. Yazhinia, S. Ramabalanb, R. Senthilc, “Experimental study of forced-air cooling with heat spreaders for lithium-ion battery thermal management”, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 76, Art. no. 107347, 2025.

- [9] N. Yerumbu, “Recent advances and challenges in electric vehicle Li-ion battery cooling systems”, *Next Energy*, vol. 12, Art. no. 100720, 2026.
- [10] T. D. Le, M. Y. Lee, “Optimization of thermal performance characteristics for 21,700 lithium-ion battery pack utilizing single-phase immersion cooling: A multi-parameter numerical investigation”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 172, Art. no. 110651, 2026.