



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale **INGEGNERIA MECCANICA**

**PROGETTAZIONE DI UNO SCAMBIATORE DI CALORE PER IL CONTROLLO
TERMICO DI CELLE A IONI DI LITIO PER LA TRAZIONE ELETTRICA**

**DESIGN OF A HEAT EXCHANGER FOR THE THERMAL MANAGEMENT OF LI-
THIUM ION CELLS FOR ELECTRIC TRACTION**

Relatore:

Prof. VALERIO D'ALESSANDRO

Tesi di Laurea di:

LORENZO PIERMARINI

A.A. 2023 / 2024

INDICE

INTRODUZIONE	3
CAPITOLO 1 BATTERIE PER VEICOLI A TRAZIONE ELETTRICA	6
1.1 GENERALITÀ E CARATTERISTICHE DEL PACCO BATTERIE	7
1.2 PROPRIETÀ DELLE CELLE	8
CAPITOLO 2 SISTEMI PER IL CONTROLLO TERMICO DELLE CELLE	10
2.1 TECNOLOGIE PER LA GESTIONE TERMICA	11
2.1.1 TMS ad aria	12
2.1.2 TMS a liquido.....	14
2.1.3 TMS a di base di pcm (phase change materials).....	17
2.1.4 TMS ibridi	18
CAPITOLO 3 CARATTERIZZAZIONE DEL PACCO BATTERIE OGGETTO DI STUDIO	20
3.1 PARAMETRI ELETTRICI E DIMENSIONALI DEL PACCO BATTERIE	21
3.2 MODELLAZIONE TERMICA DELLE CELLE.....	26
3.3 DETERMINAZIONE DEL CARICO TERMICO.....	27
CAPITOLO 4 PROGETTAZIONE DELLO SCAMBIATORE DI CALORE	33
4.1 DESCRIZIONE DELLA PROPOSTA PROGETTUALE	34
4.2 PROGETTAZIONE DELLE COLD-PLATES A LIQUIDO.....	37
CONCLUSIONI	51
APPENDICE	52
BIBLIOGRAFIA	53
SITOGRAFIA	54

INTRODUZIONE

Sin dalla sua origine l'ingegneria si pone come tramite per la progressione e lo sviluppo tecnologico, con lo scopo di migliorare lo svolgersi di attività riguardanti svariate discipline, andando difatti ad ottimizzare ciò che già esiste o ad ideare nuovi sistemi inediti.

Tra le nuove sfide, c'è sicuramente la sostenibilità ambientale, che al giorno d'oggi è un tema da non poter assolutamente trascurare in qualsiasi ambito di studio, né tantomeno dall'ingegneria, la quale si dedica sempre più a nuove tecnologie e soluzioni che mirino al perfezionamento di tale aspetto.

In merito a ciò, un argomento spesso ricorrente è quello relativo alle emissioni di CO₂ che, come ben noto, sono tra le cause principali del cambiamento climatico e la loro riduzione è certamente di cruciale importanza.

Dato che una buona fetta della CO₂ immessa nell'atmosfera è dovuta dal trasporto su strada, riguardante la circolazione di autoveicoli con motore a combustione interna, la transizione in direzione di una mobilità che sia più sostenibile e attenta a tali tematiche sta oramai diventando una meta imprescindibile da perseguire nel più breve tempo possibile.

L'Unione Europea si colloca indubbiamente come apripista a livello mondiale in materia di mobilità sostenibile, infatti secondo l'ultimo regolamento (UE) 2023/851 del parlamento europeo e del consiglio del 19 Aprile 2023, il vecchio continente punta a ridurre le emissioni di auto e furgoni del 55% e del 50% entro il 2030, rispetto a quelle del 2021, al fine di raggiungere, non più tardi del 2035, l'obiettivo di zero emissioni per veicoli leggeri nuovi.

Questo comporterà dunque che a partire dal 2035, solo auto elettriche o comunque dotate di altre tecnologie che consentono di azzerare le emissioni, potranno essere vendute, in modo tale da centrare la neutralità carbonica entro il 2050 con la progressiva sostituzione delle vetture a motore endotermico convenzionale.

I veicoli a trazione elettrica sembrano dunque destinati a trainare la transizione verso una mobilità a basse emissioni, per lo meno in questa fase iniziale, dove altre tecnologie come idrogeno e biocombustibili non sono ancora pronte a subentrare nel mercato dei trasporti su strada.

Attualmente l'elettrificazione dei mezzi su ruota prevede varie soluzioni in funzione del sistema propulsivo installato.

Tra le opzioni proposte dai costruttori, abbiamo due macrocategorie di veicoli:

- "Full-Electric" (BEV)
- Ibridi (HEV)

I primi sfruttano esclusivamente la potenza erogata da uno o più motori elettrici, inoltre hanno necessariamente bisogno di rifornirsi di energia elettrica presso stazioni di ricarica in quanto non sono provvisti di sistemi autorigenerativi di carica.

Per quanto riguarda gli ibridi ci sono 2 sottocategorie, Ibridi Plug-in (PHEV) e Mild Hybrid (MHEV). In entrambi si ha la coesistenza di un motore endotermico e di uno elettrico (o più di uno) e sono presenti sistemi di autoricarica delle batterie, con la differenza che, nel primo caso è possibile muoversi in modalità solamente elettrica per limitati tratti e si può rifornire l'auto anche dalla colonnina, mentre nei Mild Hybrid ciò non è previsto poiché il propulsore elettrico funge da supporto alla controparte endotermica.

Le varie soluzioni sopra descritte, pur avendo differenti sistemi di funzionamento, hanno in comune un componente a dir poco fondamentale, il pacco batterie, il quale assume caratteristiche dimensionali e tecniche a seconda della categoria di veicolo di cui prende parte.

Come verrà accuratamente approfondito nei capitoli successivi, il pacco batterie è costituito dalla composizione di singole unità elementari dette celle, che, nel loro ciclo di esercizio, sviluppano una certa quantità di calore la quale necessita di essere correttamente dissipata. Tale processo di asportazione del calore tramite appositi dispositivi è un tema imprescindibile per questi componenti, in quanto le celle devono rispettare un ristretto range di temperatura affinché venga garantita la sicurezza di utilizzo e la durata nel tempo delle stesse.

La presente attività si occupa proprio della gestione termica dei suddetti pacchi batterie, che sicuramente rappresenta un aspetto interessante da approfondire sia dal punto di vista del miglioramento della tecnologia nell'ambito della mobilità elettrica, sia nel campo della sostenibilità ambientale, dato che le batterie al litio, largamente impiegate nel settore, ancora non hanno un valido processo di smaltimento e recupero. Nonostante innumerevoli studi sulla gestione del fine vita delle celle, ancora non si è giunti ad una soluzione adeguata e definitiva, pertanto diventa ancor più significativa la progettazione di sistemi che permettano di prolungare il più possibile la durata nel tempo delle batterie, destinate oramai ad un incessante diffusione.

Nei primi capitoli verrà fatta una panoramica sullo stato dell'arte in merito alle batterie e ai loro relativi sistemi di controllo termico, trattando quelle che generalmente sono le soluzioni che meglio si adattano all'impiego nell'ambito automobilistico.

Successivamente saranno descritte le caratteristiche del pacco batterie oggetto di studio, definendone poi un modello termico sulla base del quale verrà calcolato il valore relativo alla potenza termica generata, avvalendosi dell'approccio a parametri concentrati.

In seguito si tratterà in maniera dettagliata la progettazione dello scambiatore di calore, incentrando l'attività sul tema del raffreddamento delle celle e sfruttando la potenza termica precedentemente ricavata come input progettuale.

In conclusione si valuteranno le soluzioni proposte sulla base dei dati ottenuti, per poi indicare quella che meglio si adatta alle condizioni imposte, andando ad esporre i possibili sviluppi del progetto ed eventuali criticità da prendere in considerazione.

CAPITOLO 1
BATTERIE PER VEICOLI A
TRAZIONE ELETTRICA

1.1 Generalità e caratteristiche del pacco batterie

Le batterie sono dispositivi in grado di immagazzinare energia chimica e di rilasciarla in forma elettrica, sfruttando reazioni di ossidoriduzione che avvengono tra il catodo e l'anodo; quest'ultimi rappresentano gli elementi fondamentali del sistema elettrochimico e prendono il nome di elettrodi.

Nell'ambito in cui si sviluppa tale studio, si fa riferimento alla categoria di batterie dette "secondarie", ovvero sono concepite per essere ricaricate in modo che possano compiere svariati cicli di carica e scarica, rendendole difatti idonee al riutilizzo nel tempo.

Le celle costituiscono le unità elementari che compongono tali dispositivi di accumulo energetico; mediante la loro connessione elettrica in serie e parallelo si ha la formazione dei moduli, i quali a loro volta sono collegati al fine di ottenere il definitivo pacco batterie.

Le caratteristiche delle singole celle influiscono naturalmente sulle proprietà del pacco batterie di cui fanno parte, le principali sono:

- Capacità [**Ah**]: corrente da erogare in un'ora per scaricare completamente una cella inizialmente carica al 100%
- C-Rate [**1/h**]: rapporto tra la corrente di scarica e la capacità massima
- Tensione nominale [**V**]: potenziale di riferimento della cella
- State of charge (SOC): livello di carica della batteria
- Open circuit voltage (U_{oc}) [**V**]: potenziale di circuito aperto
- Cicli di vita: numero di cicli effettuabili senza manifestare una percepibile perdita di prestazioni
- Self discharge: indice di autoscarica della batteria in condizione di riposo

1.2 Proprietà delle celle

In genere le celle che vengono impiegate nel campo dell'automotive possono assumere forma cilindrica, prismatica o a pouch, in quanto tali geometrie permettono un facile impacchettamento nella composizione dei moduli oltre a portare vantaggi in termini di gestione termica delle medesime.

Attualmente esistono varie proposte tecnologiche per quanto riguarda la composizione chimica degli elettrodi delle celle; da queste derivano infatti caratteristiche e proprietà differenti, che vanno ad influire in maniera significativa sulle prestazioni del pacco batterie.

Le principali soluzioni utilizzate nel settore dei veicoli elettrici sono rappresentate da celle a base di Nickel e a ioni di Litio.

Tra le batterie che rientrano nella prima categoria le più diffuse sono:

- Nickel-Cadmio (**NiCd**)
- Nickel-metallo idruro (**NiMH**)

Entrambe offrono ottime prestazioni rispetto alle temperature di esercizio, hanno buoni tempi di ricarica e consentono un numero considerevole di cicli.

Fra gli svantaggi c'è sicuramente una bassa tensione nominale e dei consistenti tassi di autoscarica, inoltre le NiCd presentano il problema dell'eccessiva tossicità del Cadmio e conseguente difficoltà nel suo smaltimento, provocandone un sempre più limitato utilizzo a favore delle NiMH.

Nei molteplici sistemi di accumulo che prevedono l'uso di celle a ioni litio, quelli di maggior tendenza sono:

- Litio-Ferro-Fosfato (**LFP**)
- Litio-Manganese (**LMO**)
- Litio-Nickel-Manganese (**NMC**)

Questa tecnologia permette di ottenere elevati cicli di vita garantendo anche interessanti tempi di ricarica, la tensione nominale è alta e il tasso di autoscarica è molto limitato, oltre a ciò manifesta un range termico di funzionamento adatto all'applicazione automobilistica.

Il maggior punto a sfavore è da riscontrare nella rapida decrescita delle prestazioni alle alte e alle basse temperature, che compromettono difatti le caratteristiche vantaggiose sopra citate, inoltre si ha anche lo sviluppo di calore derivante dalla carica-scarica e il costo rispetto ad altre tipologie di batterie, che si vanno ad aggiungere all'ancora poco sviluppata gestione del fine vita delle celle.

In questo elaborato si è scelto di prendere come oggetto di studio batterie a ioni di Litio, dal momento che si riscontra particolare interesse da parte delle grandi case costruttrici.



FIGURA 1- ESEMPI DI CELLE PRISMATICHE, CILINDRICHE E POUCH

CAPITOLO 2
SISTEMI PER IL CONTROLLO
TERMICO DELLE CELLE

2.1 Tecnologie per la gestione termica

Come illustrato nei paragrafi precedenti, le batterie sono fortemente influenzate dalle temperature a cui sono sottoposte durante il loro ciclo di vita, sia in termini prestazionali che di sicurezza della tecnologia stessa.

Le condizioni climatiche e la generazione interna di calore diventano dunque aspetti cruciali da dover curare, rendendo imprescindibile l'affiancamento di un sistema di controllo termico* (TMS) che garantisca un corretto funzionamento degli accumulatori energetici, sia alle basse che alle alte temperature.

L'esponenziale crescita del mercato della mobilità elettrica degli ultimi anni ha portato notevoli sviluppi in merito alle tecnologie applicabili nel settore, lasciando libera scelta alle aziende automobilistiche che possono adattare l'allestimento dei veicoli in funzione della regione climatica a cui saranno destinate alla vendita e alla circolazione.

Nei capitoli seguenti verrà proposta una panoramica generale sulle attuali tendenze riguardanti le tecnologie degli scambiatori di calore impiegati, ne verranno descritte le caratteristiche peculiari e saranno evidenziati quelli che, in funzione dei tipici parametri elettrici delle batterie, rappresentano i punti di forza e di criticità di ciascuna.

**TMS: Thermal management system, sistema di gestione termica*

2.1.1 TMS ad aria

Questi sistemi prevedono di effettuare lo scambio termico mediante l'utilizzo di aria atmosferica esterna come fluido di lavoro, la quale verrà riscaldata o raffreddata prima di essere direzionata verso il pacco batterie.

I vantaggi consistono in un semplificato schema d'impianto oltre a costi d'installazione limitati rispetto ad altre tecnologie.

Altri punti a favore sono riscontrabili nella facilità di manutenzione del sistema e nella natura del fluido termovettore stesso, che, dato il comodo approvvigionamento e la non pericolosità dei gas che lo compongono, garantiscono un'agevole impiego agli scopi preposti.

Tra gli aspetti negativi che contraddistinguono la scelta di tale TMS, vi è senza alcun dubbio la minore efficienza dello scambio termico tra fluido e celle a differenza di altre soluzioni.

Ciò è dovuto dalle proprietà termofisiche dell'aria, in particolare dalla bassa conducibilità termica e dallo scarso calore specifico che caratterizzano i gas costituenti la miscela.

Oltre a quanto, le condizioni ambientali esterne da cui viene convogliata l'aria per originare i flussi convettivi, potrebbero incidere negativamente sulle prestazioni dello scambiatore, con annessa la possibilità del manifestarsi di fenomeni di disuniformità delle temperature fra le celle e per giunta, nel caso di una consistente presenza di particelle inquinanti, anche il danneggiamento dell'impianto e/o delle batterie lambite dalla corrente.

In letteratura esistono varie classificazioni che fanno riferimento a diversi aspetti, tra cui la modalità con la quale viene generato il flusso e il trattamento subito dall'aria prima di investire le celle.

La circolazione del fluido di lavoro nell'impianto può avvenire attraverso due possibili tecniche:

- Convezione naturale, il flusso è generato dal solo spostamento del veicolo con l'ausilio di un accurato design di convogliatori e condotti; non sono necessari dispositivi di ventilazione.
- Convezione forzata, il flusso viene originato da un sistema di ventilazione elettricamente attuato, pertanto è previsto un assorbimento energetico per mantenerne il funzionamento.

Relativamente al processo che subisce l'aria aspirata dall'esterno, si hanno i seguenti meccanismi di trattamento termico:

- Configurazione passiva, il fluido in entrata è direttamente preso dall'ambiente esterno per poi essere sottoposto ad un'alterazione termica prima di attraversare le celle, infine verrà espulso nell'atmosfera.
- Configurazione attiva, il flusso d'aria "esausto" non viene totalmente reimpresso in atmosfera, bensì una parte di esso viene riportato all'ingresso e miscelato con nuova aria, riducendo il salto termico da far compiere al fluido prima di entrare a contatto con le batterie.

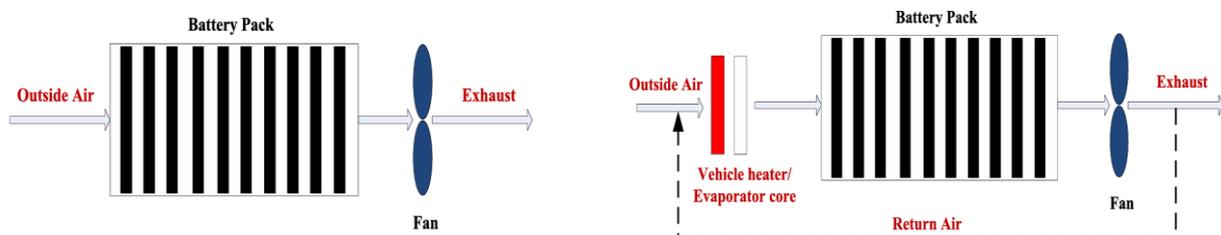


FIGURA 2- SCHEMI DELLE CONFIGURAZIONI PASSIVE E ATTIVE

2.1.2 TMS a liquido

Similmente a quanto accade per il TMS ad aria, anche per questa tecnologia si ha un fluido di lavoro che scambia calore per via convettiva con le celle del pacco batterie, ma stavolta si tratta di una miscela liquida composta principalmente da acqua e da altre sostanze additive che ne migliorano le proprietà.

Il meccanismo di funzionamento prevede la generazione del flusso tramite una pompa, successivamente il fluido verrà riscaldato o raffreddato da uno scambiatore dedicato e attraverserà le batterie con cui compie il trasferimento di calore, infine ritorna al punto di partenza ripetendo il ciclo di lavoro.

I liquidi impiegati sono caratterizzati da elevate conducibilità termiche e da alti calori specifici, in particolare se confrontati a quelli dei gas, naturalmente inferiori. Per questo motivo, l'efficienza della dissipazione o del riscaldamento da parte del fluido sarà notevolmente maggiore nei TMS a liquido rispetto a quelli ad aria, attribuendo ai primi un'considerabile vantaggio sotto un aspetto di cruciale importanza per l'applicazione in questione, che potrà dunque garantire prestazioni più spinte in termini di potenza elettrica e velocità di ricarica delle batterie i quali rappresentano temi chiave per lo sviluppo della mobilità elettrica.

Da evidenze sperimentali emergono anche distribuzioni più omogenee delle temperature fra le celle.

A questa tecnologia sono associate anche delle criticità, una su tutte è la complessità degli impianti. Vi è infatti previsto un maggior numero di componenti, da cui conseguono un aumento di peso del veicolo stesso e considerevoli costi di installazione e manutenzione.

Oltre a ciò, la gestione degli spazi occupati dall'impianto e dal suo relativo sistema di accumulo da controllare, è certamente argomento di un non banale studio.

Le varie tipologie possibili per tale TMS fanno riferimento alla modalità con la quale il fluido interagisce con il pacco batterie. In seguito sono riportate le tre tecniche di scambio termico esistenti.

- Per immersione: le celle sono immerse direttamente nel fluido di lavoro in modo da garantire un'efficiente scambio di calore ed un'eccellente uniformità delle temperature. Questa tecnica deve necessariamente avvalersi di una miscela liquida appositamente sviluppata affinché sia contraddistinta da proprietà dielettriche, senza le quali si potrebbe compromettere la sicurezza dell'impianto.



FIGURA 3-ESEMPIO TECNICA DI SCAMBIO TERMICO PER IMMERSIONE

- Diretto: a differenza della tecnica per immersione, il liquido è a diretto contatto solamente con le superfici esterne del pacco batterie, per tanto presentano le medesime caratteristiche viste sopra ma con una ristretta superficie di scambio a disposizione.

- Indiretto: il liquido non si trova a stretto contatto con la superficie delle celle, bensì è forzato a scorrere all'interno di tubazioni o piastre opportunamente installate a ridosso della batterie, innescando così un meccanismo combinato di scambio termico. Rispetto alle altre soluzioni, risulta meno complesso ed inoltre non vi è richiesto l'uso di particolari liquidi con specifiche proprietà dielettriche, comportando dunque un minor costo di realizzazione e manutenzione. Data la frapposizione di un terzo elemento tra fluido e parete, si ha l'introduzione di una resistenza termica conduttiva all'interfaccia, la quale non è assolutamente da trascurare in fase progettuale.

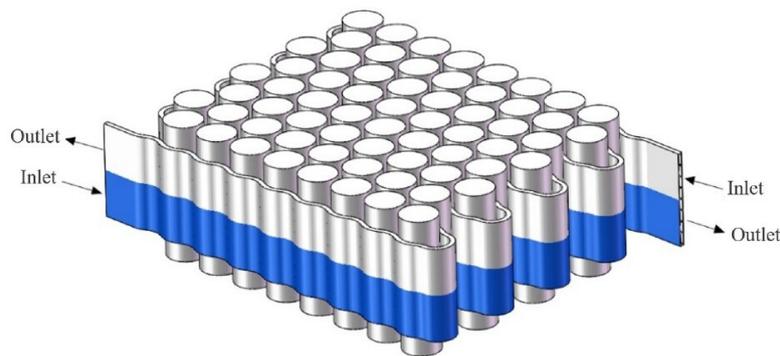


FIGURA 4-SISTEMA INDIRETTO CON TUBI PIATTI CORRUGATI A DOPPIA VIA



FIGURA 5-SISTEMA INDIRETTO A COLDPLATES PACCO BATTERIE BMW I3

2.1.3 TMS a di base di pcm (phase change materials)

Sono sistemi che sfruttano il cambiamento di fase di specifici materiali in modo da limitare le temperature raggiungibili dal pacco batterie.

Il principio di funzionamento è basato sull'assorbimento di energia sottoforma di calore da parte di apposite sostanze, mediante un loro passaggio di stato ad una determinata temperatura che risulti adatta allo scopo preposto.

Al fine di garantire un corretto funzionamento, è necessario che ci sia un contatto diretto tra celle e il PCM, in modo da poter garantire un facilitato scambio termico tra le due parti.

I principali vantaggi sono relativi alla natura della tecnologia stessa, infatti si tratta di un TMS detto "passivo" in quanto non sono previsti dispositivi che comportino assorbimenti di potenza dal motore; per di più, l'estrema semplicità di impianto permette bassi costi di installazione e manutenzione oltre alla riduzione del peso e dell'ingombro occupato.

Attualmente i PCM sono ancora TMS da considerarsi in via di sviluppo e ricerca; infatti ci sono ancora degli aspetti che necessitano approfondimenti prima di poter diventare una valida alternativa alle altre soluzioni viste sopra.

Le problematiche fanno riferimento alle proprietà dei materiali impiegati che riscontrano basse conducibilità termiche e alta infiammabilità, costringendo i ricercatori a studiare additivi che correggano tali caratteristiche che rendono i PCM poco adatti ad una seria applicazione su larga scala.

Le sostanze maggiormente utilizzate e in fase di ricerca sono: la paraffina, composti di sali idratati e solidi a base di acidi grassi.

Tra i parametri principali da dover considerare per la scelta del materiale c'è sicuramente la composizione, considerando anche eventuali additivi aggiunti, e la temperatura alla quale si verifica il cambiamento di fase.

2.1.4 TMS ibridi

Nei capitoli precedenti sono state trattate le soluzioni più diffuse e applicate nel settore, evidenziando per ciascuna i punti di forza e le criticità che, in funzione delle caratteristiche del veicolo e delle condizioni operative, possono risultare più o meno adatte alla causa.

Tra le proposte che l'odierno mercato dell'auto elettrica offre, hanno preso spazio anche i cosiddetti sistemi ibridi, ovvero quei TMS che sono frutto della combinazione di due o più tecnologie sopra descritte, ereditando tutti gli aspetti che le contraddistinguono.

Gli impianti che ne derivano saranno generalmente più complessi e strutturati, ma un'accurata progettazione e selezione tecnologica può certamente permettere il raggiungimento di un'efficiente controllo termico, mantenendo costi contenuti e ridotti assorbimenti energetici da parte dei dispositivi ausiliari.

Un dispositivo che spesso viene integrato ad altri sistemi, andando a realizzare un TMS ibrido, è l'Heat Pipe, il quale ha come scopo quello di trasferire efficientemente calore da una sua estremità all'altra.

Tale componente è costituito da una geometria tubolare in Rame o in Alluminio, al cui interno vi è una struttura porosa complessa detta Wick dove fluisce un fluido termovettore, in genere una soluzione a base d'acqua.

Il trasferimento energetico avviene sfruttando fenomeni di mutamento di fase da parte del fluido di lavoro, mentre attraversa in maniera ciclica la cavità interna del dispositivo.

In un primo tratto dell'Heat Pipe, la soluzione in fase liquida assorbe calore dall'esterno, provocandone la propria evaporazione e la sua progressione lungo il condotto per mezzo dell'incremento di pressione. Il vapore neoformato attraversa successivamente una zona adiabatica, per poi arrivare all'altra estremità dove ha luogo il processo di condensazione; qui avviene la cessione di calore verso

l'esterno ed infine, il fluido in fase liquida torna al punto iniziale per capillarità mediante il Wick, in modo da poter ripetere il ciclo.

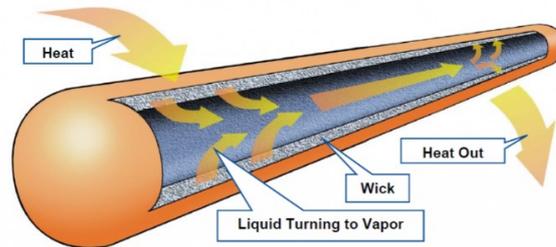


FIGURA 6-SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DI UN HEAT PIPE

I sistemi ibridi maggiormente diffusi per il settore automobilistico sono i seguenti:

- TMS A liquido + Heat pipe
- TMS ad aria + Heat pipe
- PCM + Heat pipe
- TMS ad aria + TMS a liquido

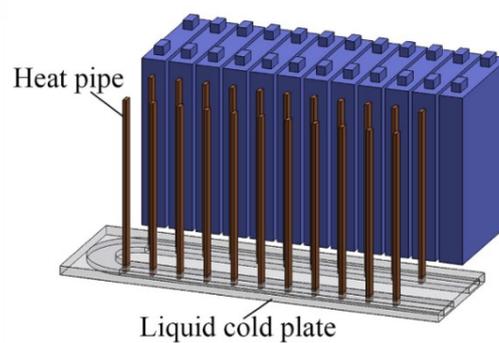


FIGURA 7-ESEMPIO DI UN TMS IBRIDO, COLD PLATE A LIQUIDO + HEAT PIPE

CAPITOLO 3
Caratterizzazione
del pacco batterie
oggetto di studio

3.1 Parametri elettrici e dimensionali del pacco batterie

Come ampiamente illustrato nei capitoli precedenti, le celle rappresentano le unità elementari che compongono le batterie in questione, definendone le proprietà elettriche e le dimensioni delle stesse.

Per lo scopo di tale studio si è ritenuto opportuno optare per celle a ioni di Litio, nello specifico della categoria LFP (Litio-Ferro-Fosfato), mentre per la forma si è preferita la geometria prismatica.

Le scelte fatte sono giustificate dalle caratteristiche descritte nel paragrafo dedicato del capitolo 1.2.

Nelle tabelle seguenti sono riportate i dati relativi ai parametri dimensionali ed elettrici delle singole celle, tenendo conto dei tipici valori che vengono solitamente utilizzati nell'industria degli autoveicoli a trazione elettrica.

Parametro dimensionale	Valore (mm)
Altezza	180
Lunghezza	70
Larghezza	27

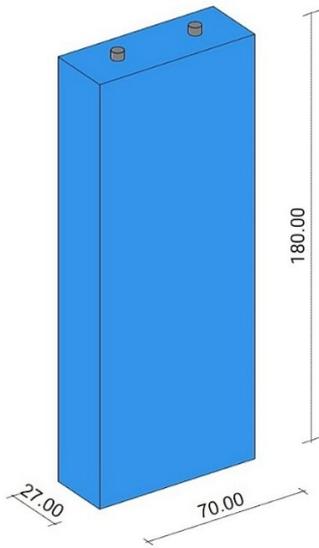


FIGURA 8-DIMENSIONE DELLA SINGOLA CELLA

Parametro elettrico	Valore
Tensione Nominale	3.2 V
Tensione di carica completa	3.6 V
Capacità	25 Ah
Energia specifica	95 $\frac{Wh}{kg}$

Al fine di raggiungere potenze elettriche adatte all'alimentazione di un propulsore generalmente applicato all'ambito trattato, si è scelto di collegare le singole celle e i conseguenti moduli secondo la seguente configurazione:

➤ **15S-16P**

Si ha dunque che ogni modulo è costituito da 15 celle collegate in serie tra loro, garantendo una tensione complessiva data da:

$$\text{Tensione nominale singola cella} \times \text{Numero di celle in serie} = 3,2 \times 15 = 48 \text{ V}$$

Tale potenziale elettrico rappresenta il rispettivo parametro nominale del pacco batterie nella sua totalità.

Il numero di celle collegate in serie è stato appositamente scelto pari a 15 al fine di ottenere la suddetta tensione, la quale risulta sia in linea con lo stato dell'arte in merito, sia largamente riscontrabile nella maggior parte dei veicoli a trazione elettrica.

La disposizione spaziale delle celle di ciascun modulo è stata scelta in modo tale da rispettare i volumi generalmente predisposti per l'alloggio delle batterie e dei loro relativi TMS. La scelta è ricaduta sulla sistemazione 3×5 come dimostrato in figura 9.

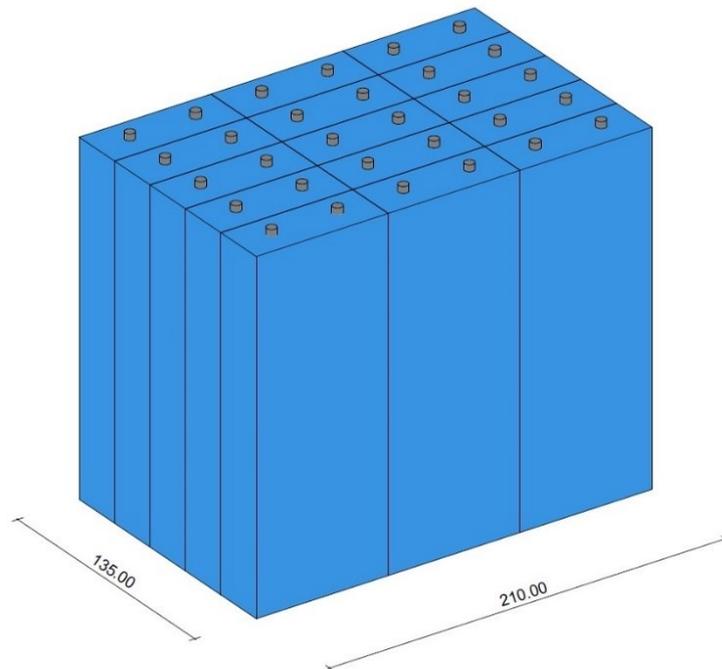


FIGURA 9-STRUTTURA 3×5 DEI MODULI

Il pacco batterie è frutto del collegamento in parallelo di 16 moduli, ottenendo così una capacità totale di 400 Ah, determinata come segue:

$$\text{Capacità totale} = \text{Capacità singola cella} \times \text{Numero di moduli in parallelo} = 25 \times 16 = 400 \text{ Ah}$$

In conclusione, i 16 moduli sono sistemati secondo uno schema 2×8 come illustrato nella successiva figura.

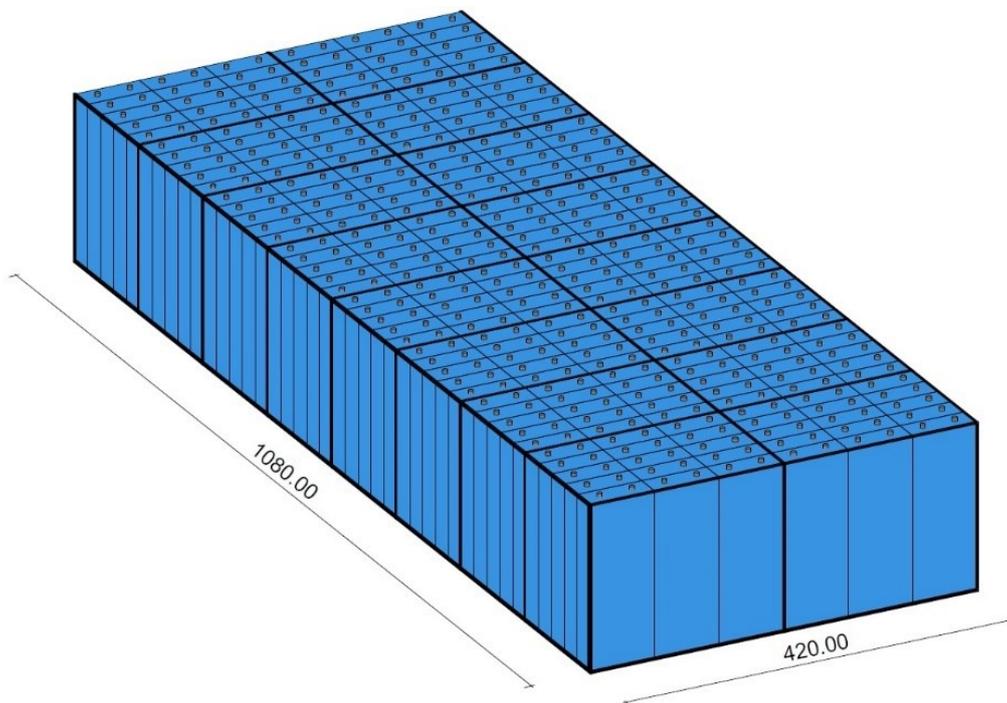


FIGURA 10-STRUTTURA 2×8 DEL PACCO BATTERIE

I parametri tecnici e dimensionali derivanti dalla configurazione adoperata, risultano congrui a quelli che sono gli standard costruttivi della maggior parte dei veicoli attualmente commercializzati, fornendo dunque una base progettuale adatta allo svolgersi della corrente attività.

I dati relativi al pacco batterie ideato sono riassunti ed esposti nella sottostante tabella.

Dato	Valore
N° di celle	240
Tensione nominale	48 V
Capacità	400 Ah
Altezza	180 mm
Lunghezza	1080 mm
Larghezza	420 mm
Superficie frontale	756 cm²
Superficie laterale	1944 cm²
Superficie di base	4536 cm²
Volume	81648 cm³
Massa	202,11 Kg

3.2 Modellazione termica delle celle

La valutazione della potenza termica sviluppata dalle celle rappresenta il dato di input per la progettazione di un TMS, pertanto la modellazione termica della batteria a cui ci si riferisce riveste un ruolo cruciale per la corretta realizzazione dell'opera.

In questa attività si è scelto di adoperare l'approccio a parametri concentrati per la determinazione del calore da dissipare.

Tale metodo risulta di semplice applicazione e fornisce valori prossimi a quelli ottenibili mediante prove sperimentali, garantendo dunque una buona approssimazione dei dati che vengono ricavati per mezzo dell'equazione di Bernardi, di seguito riportata:

$$\dot{Q} = I \cdot (V - U_{oc}) + I \cdot T \cdot \frac{\partial U_{oc}}{\partial T}$$

Con:

Termine	Definizione	Unità di misura
\dot{Q}	<i>Potenza termica singola cella</i>	W
I	<i>Corrente di carica/scarica, C-rate × Capacità cella</i>	A
V	<i>Tensione della cella</i>	V
U_{oc}	<i>Tensione di circuito aperto</i>	V
T	<i>Temperatura</i>	K
$\frac{\partial U_{oc}}{\partial T}$	<i>Contributo entropico</i>	$\frac{V}{K}$

3.3 Determinazione del carico termico

Sulla base del modello descritto nel capitolo precedente, in questa sezione verrà calcolata la potenza termica media sviluppata dalle celle, imponendo le condizioni per le quali si raggiunga il massimo valore che verrà assunto come dato di partenza per la successiva progettazione dello scambiatore di calore.

Le procedure risolutive e l'implementazione dei dati sono state svolte mediante l'ausilio di fogli di calcolo elettronici.

Al fine di ottenere valori in linea ai fenomeni termochimici reali, si è scisso il carico nei due contributi derivanti dagli elettrodi, perciò la potenza termica di ciascuna cella sarà data dalla somma tra la parte catodica e quella anodica, entrambe calcolate mediante l'equazione di Bernardi.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_A + \dot{Q}_C$$

Con:

- \dot{Q}_A Contributo anodico della potenza termica (**W**)
- \dot{Q}_C Contributo catodico della potenza termica (**W**)

$$\dot{Q}_A = I \cdot (V - U_{ocA}) + I \cdot T \cdot \frac{\partial U_{ocA}}{\partial T}$$

$$\dot{Q}_C = I \cdot (V - U_{ocC}) + I \cdot T \cdot \frac{\partial U_{ocC}}{\partial T}$$

In seguito si riportano i grafici relativi all'andamento dei vari termini contenuti nelle equazioni appena illustrate, ad eccezione della corrente e della temperatura che verranno arbitrariamente imposte al fine di considerare la peggiore condizione operativa possibile, dalla quale ricavare il carico per la progettazione.

I diagrammi realizzati derivano dalla consultazione della letteratura in merito all'argomento, opportunamente citata al termine di tale elaborato.

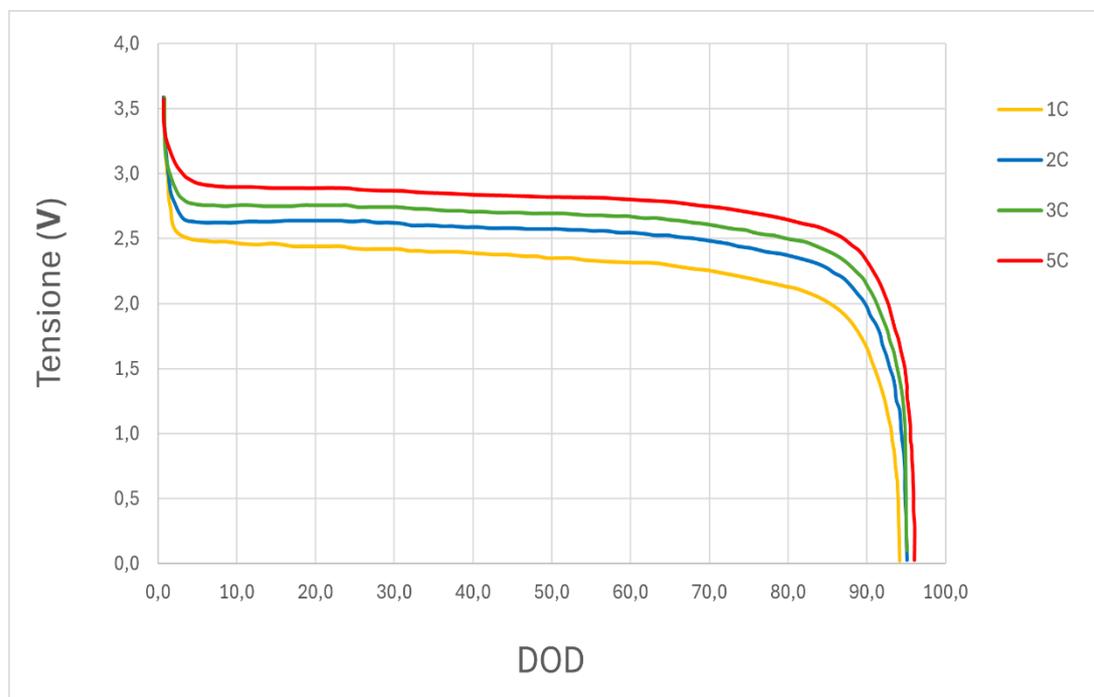


FIGURA 11-GRAFICO DELLA TENSIONE DELLA SINGOLA CELLA IN FUNZIONE DEL DOD E AL VARIARE DEL C-RATE

DOD: Depth of discharge, profondità di scarica, è il reciproco dell'SOC

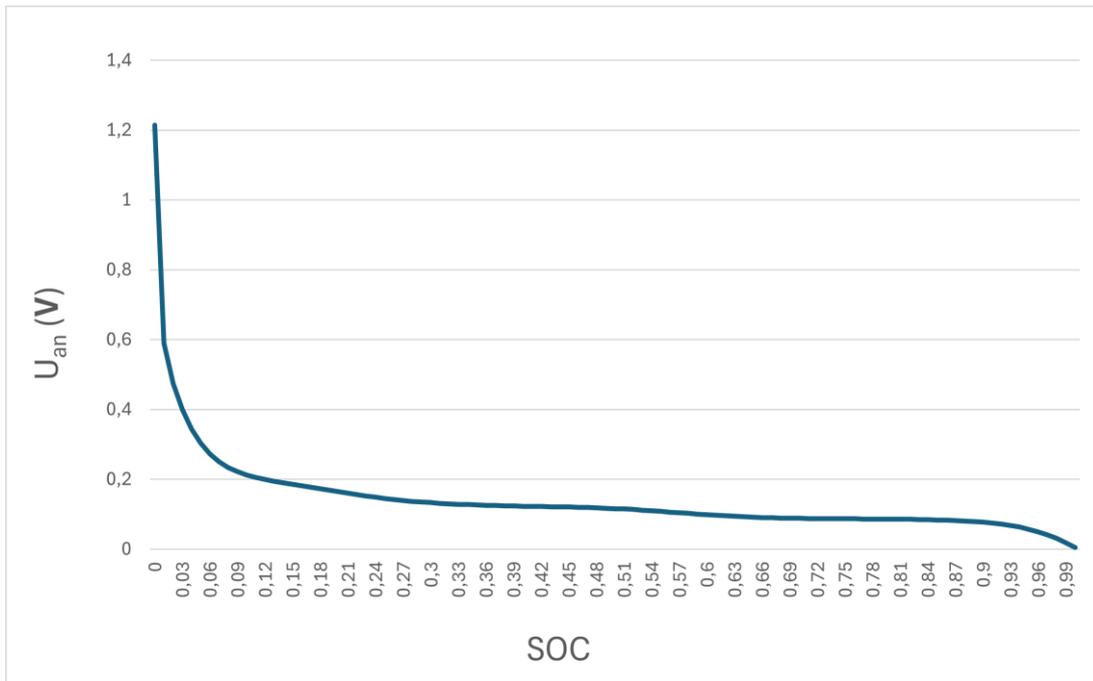


FIGURA 12-POTENZIALE DI CIRCUITO APERTO DELL'ANODO IN FUNZIONE DELL'SOC

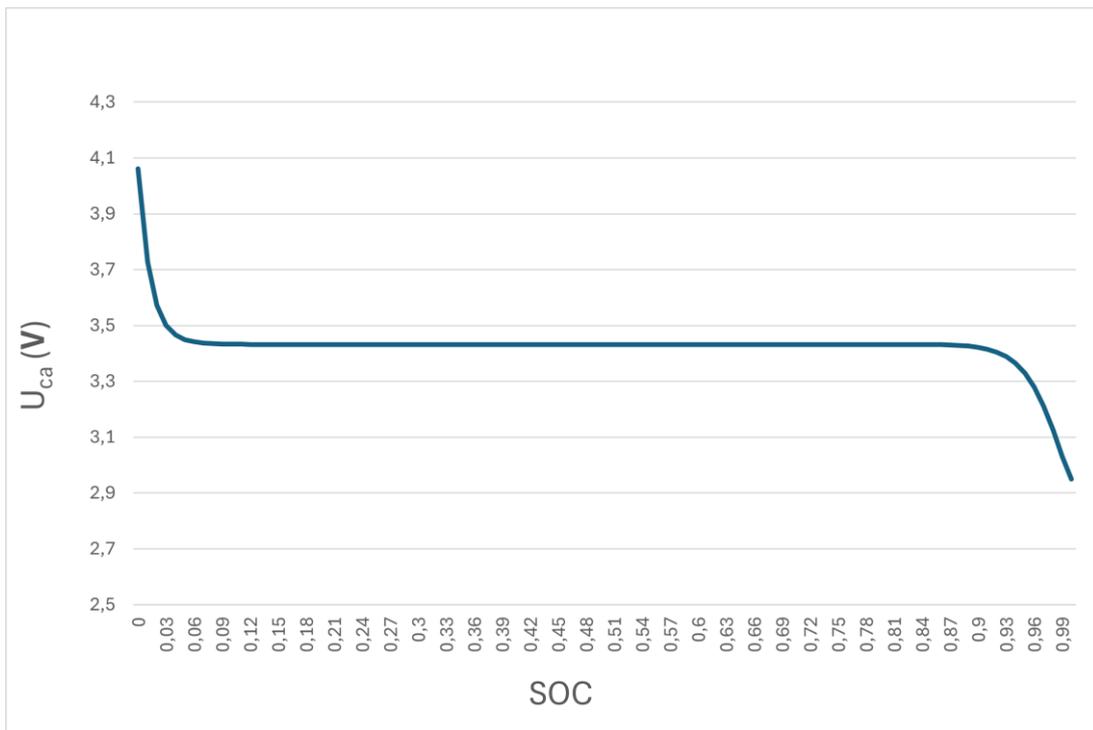


FIGURA 13-POTENZIALE DI CIRCUITO APERTO DEL CATODO IN FUNZIONE DELL'SOC

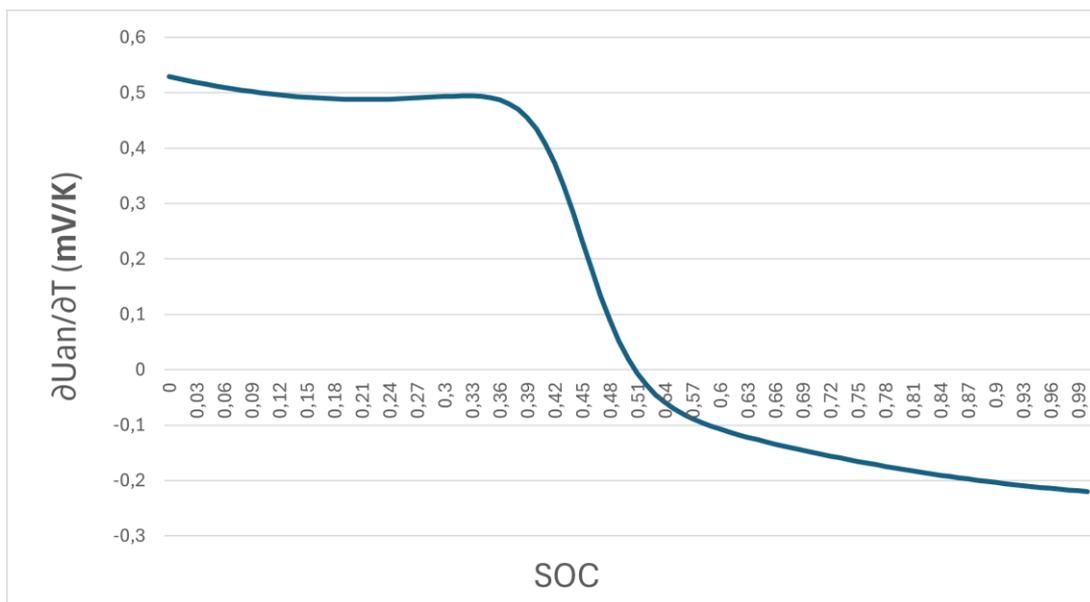


FIGURA 14-CONTRIBUTO ENTROPICO DELL'ANODO IN FUNZIONE DELL'SOC

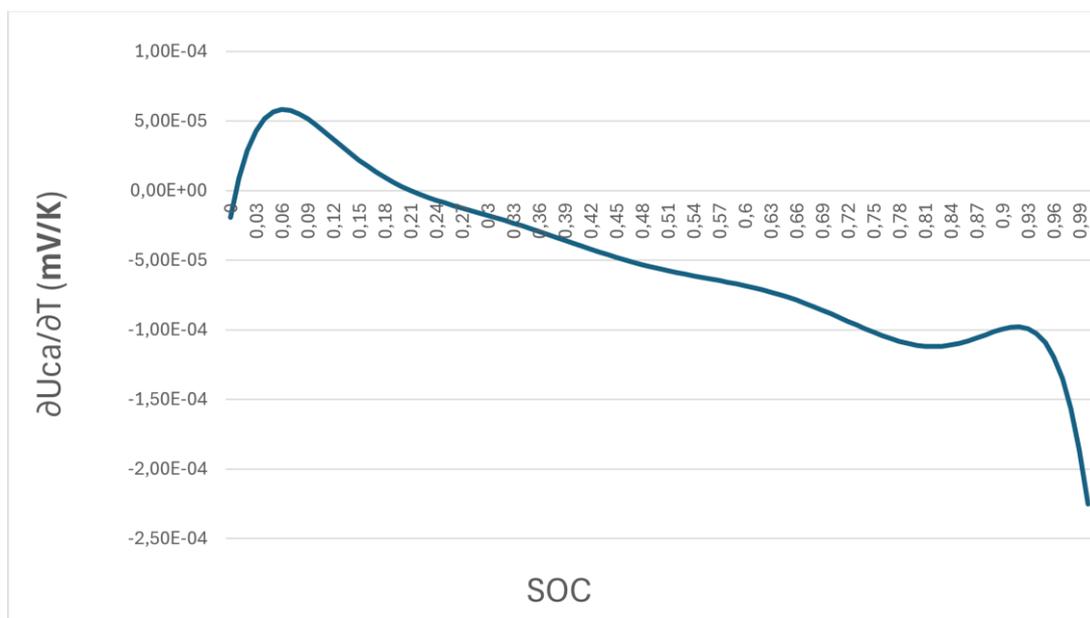


FIGURA 15-CONTRIBUTO ENTROPICO DEL CATODO IN FUNZIONE DELL'SOC

Le espressioni con le quali si sono graficate le funzioni riguardanti i potenziali di circuito aperto e i contributi entropici sono state riportate nell'appendice dedicata.

La potenza termica della singola cella è stata quantificata imponendo i sottostanti valori critici:

Parametri	Valore imposto
Temperatura	313,15 K
C-rate	5
Corrente	125 A

La corrente I erogata è ottenuta moltiplicando il c-rate per la capacità della cella, dove il primo termine è stato assunto in maniera tale da assicurare la massima corrente dalla quale deriva la peggior condizione in termini di sviluppo termico, di seguito il calcolo svolto:

$$I = \text{C-rate} \times \text{Capacità della cella} = 5 \times 25 = 125 \text{ A}$$

La temperatura è stata scelta in considerazione del range ottimale di funzionamento, che, per le decisioni prese, prevede un minimo di 20 °C e un limite massimo di 40 °C, corrispondenti ai 313,14 K riportati in tabella.

Questo intervallo permette una maggior numero di cicli da parte delle celle e consente il raggiungimento della massima potenza erogabile.

I dati ricavati sono stati graficati mantenendo la dipendenza rispetto allo stato di carica delle batterie.

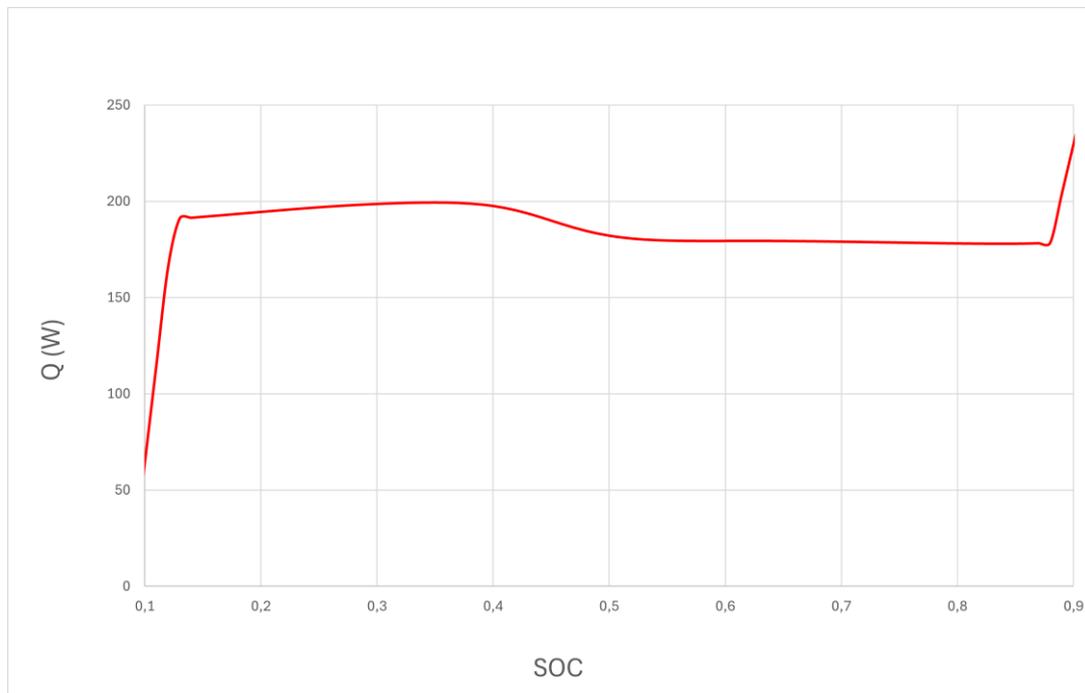


FIGURA 16-GRAFICO POTENZA TERMICA DELLA SINGOLA CELLA IN FUNZIONE DELL'SOC

Sulla base di tale andamento, tramite software si è calcolato il valor medio della potenza sviluppata da ogni cella:

$$\dot{Q}_{medio} = 161,45 \text{ W}$$

In conclusione si è giunti al carico termico totale del pacco batterie (\dot{q}):

$$\dot{q} = \dot{Q}_{medio} \times \text{numero di celle} = 161,435 \times 240 \cong 38,744 \text{ kW}$$

CAPITOLO 4

Progettazione dello scambiatore di calore

4.1 Descrizione della proposta progettuale

Nel capitolo 2 sono stati trattati i principali TMS adottati dalla maggior parte degli autoveicoli attualmente sul mercato, con lo scopo di porre in rilievo gli aspetti fondamentali che ciascun sistema possiede.

Alla luce di quanto emerso nelle sezioni sopracitate, si è deciso di seguire l'odierna tendenza tecnologica incentrando il progetto su un sistema a liquido indiretto basato sull'utilizzo di cold-plates a liquido.

Le coldplates sono piastre metalliche cave al cui interno scorre un fluido termovettore in convezione forzata (generalmente un liquido a base acquosa).

Il loro scopo è quello di dissipare il calore dei componenti che poggiano su una o entrambe le proprie superfici (nel primo caso viene denominata single side, mentre nell'altro caso si parla di double side), ma possono anche essere impiegate per il processo inverso di riscaldamento.

In riferimento alla loro struttura interna, esistono tre tipologie di cold-plates:

- A “serpentina”, il fluido di lavoro scorre all'interno di serpentine tubolari metalliche o su condotti ricavati direttamente sulle pareti interne del dissipatore chiuse da una piastra superiore.

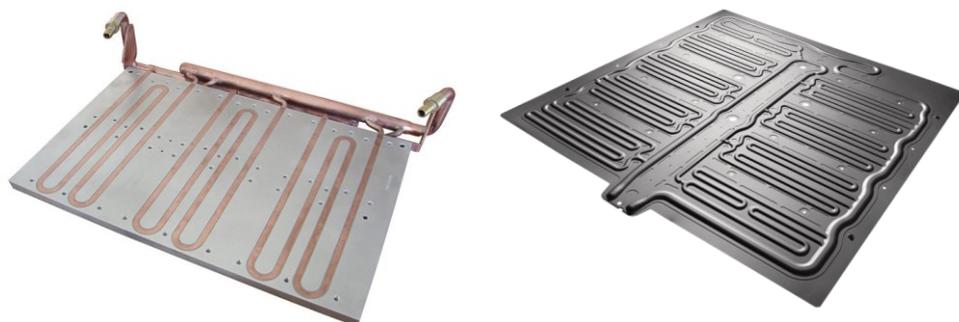


FIGURA 17-ESEMPI DI COLD-PLATES A SERPENTINA

- Plain fin, il fluido attraversa canali di varia geometria disposti parallelamente rispetto al flusso, godono di una maggiore superficie di scambio. Le caratteristiche fluidodinamiche e le prestazioni dello scambio termico sono fortemente influenzate dalla scelta dei canali.

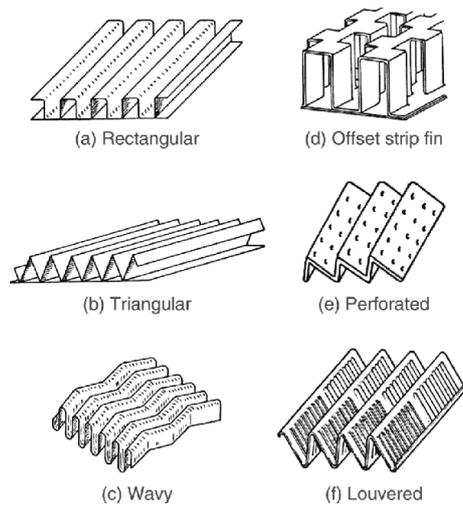


FIGURA 18-TIPICHE FORME DEI CANALI DELLE COLD-PLATES PLAIN FIN

- Pin fin, prevedono un'alettatura cilindrica sul lato interno della superficie in cui poggiano i componenti con i quali avviene il trasferimento di calore. L'efficienza del dispositivo è influenzata dai parametri geometrici delle alette.



FIGURA 19-ESEMPIO DI COLD-PLATE PIN FIN

La proposta progettuale trattata in questa attività, prevede la realizzazione di due cold-plates single side in Alluminio poste a contatto con le superfici laterali del pacco batterie.

L'impianto idraulico predisporrà di un'apposita macchina frigorifera che avrà lo scopo di raffreddare il fluido al termine del ciclo (non oggetto di tale elaborato), inoltre, affinché ci sia un'omogenea distribuzione delle temperature, i due scambiatori opereranno in controcorrente.

Data l'entità del carico termico da dissipare e l'applicazione considerata, si è scelto di utilizzare come fluido di lavoro una miscela composta dall'80% di acqua e dal 20% di glicole monoetilenico, le cui proprietà termofisiche sono riportate in seguito.

Substance and % by volume in mixture	Minimal working temperature [°C]	Temperature [°C]	Density [kg/m ³]	Specific heat [kJ/kg.K]	Thermal conductivity [W/m.K]	Dynamic viscosity X10 ⁻³ [N.s/m ²]	Cinematic viscosity X10 ⁻⁶ [m ² /s]
Monoethylenglycol C2H4(OH)2 20	-10	-10	1038	3.85	0.498	5.19	5
		0	1036	3.87	0.50	3.11	3
		20	1030	3.90	0.512	1.65	1.6
		40	1022	3.93	0.521	1.02	1.0
		60	1014	3.96	0.531	0.71	0.7
		80	1006	3.99	0.540	0.523	0.52
		100	997	4.02	0.550	0.409	0.41

FIGURA 20-PROPRIETÀ DEL FLUIDO DI LAVORO

4.2 Progettazione delle cold-plates a liquido

La simmetria della configurazione considerata consente di suddividere equamente il carico termico da dissipare negli scambiatori, pertanto nei paragrafi successivi verrà illustrato il procedimento per la progettazione di una delle due cold-plates in quanto le caratteristiche dell'una saranno perfettamente identiche all'altra.

La potenza termica p impiegata per l'obiettivo preposto è dunque data da:

$$p = \frac{\dot{q}}{2} = \frac{38744}{2} = 19372 \text{ W}$$

Al fine di garantire un corretto funzionamento dell'impianto, tenendo conto anche del processo di raffreddamento del fluido caldo in uscita dallo scambiatore, si sono imposti arbitrariamente i seguenti dati relativi alla miscela liquida circolante nei dissipatori:

Parametro	Simbolo	Valore (K)
Temperatura ingresso fluido	T_{in}	303,15
Temperatura uscita fluido	T_{out}	293,15
Salto termico	ΔT	10

Le proprietà termofisiche del fluido adottate fanno riferimento alla temperatura di bulk T_b :

$$T_b = \left(\frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right) = 298,15 \text{ K}$$

Dalla tabella di Fig. 20, si riportano dunque le proprietà della miscela liquida:

Proprietà	Simbolo	Valore	Unità di misura
Densità	ρ	1030	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Conducibilità termica	λ	0,512	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$
Calore specifico	c	3900	$\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$
Viscosità dinamica	μ	0,00165	$\text{Pa}\cdot\text{s}$

Da questi si determina il numero di Prandtl P_r :

$$P_r = \frac{\mu \cdot c}{\lambda} = 12,5684$$

Come visto nelle sezioni precedenti, il range ottimale di utilizzo delle celle scelte è tra 20 °C e 40 °C, di conseguenza, ponendoci alla condizione limite, si è imposta la seguente temperatura della superficie di appoggio T_s :

$$T_s = 313,15 \text{ K}$$

Al termine della progettazione tale parametro fornirà l'indicazione con la quale si valuteranno la bontà delle scelte conseguite nel corso della trattazione.

Prima di procedere alla fase successiva si definisce la portata massica \dot{m} :

$$\dot{m} = \frac{p}{c(T_{out} - T_{in})} = 0,49672 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Riguardo la tipologia di cold-plates si è optato per la categoria Pin fin, mentre per la superficie alettata si sono analizzate tre possibili configurazioni:

- AP-1
- PF-4
- PF-9

I dati relativi a tali alettature e alle caratteristiche delle stesse mostrate in seguito sono state estrapolate dal testo “Compact heat exchangers di W.M.Kays e A.L.London. McGraw-Hill”

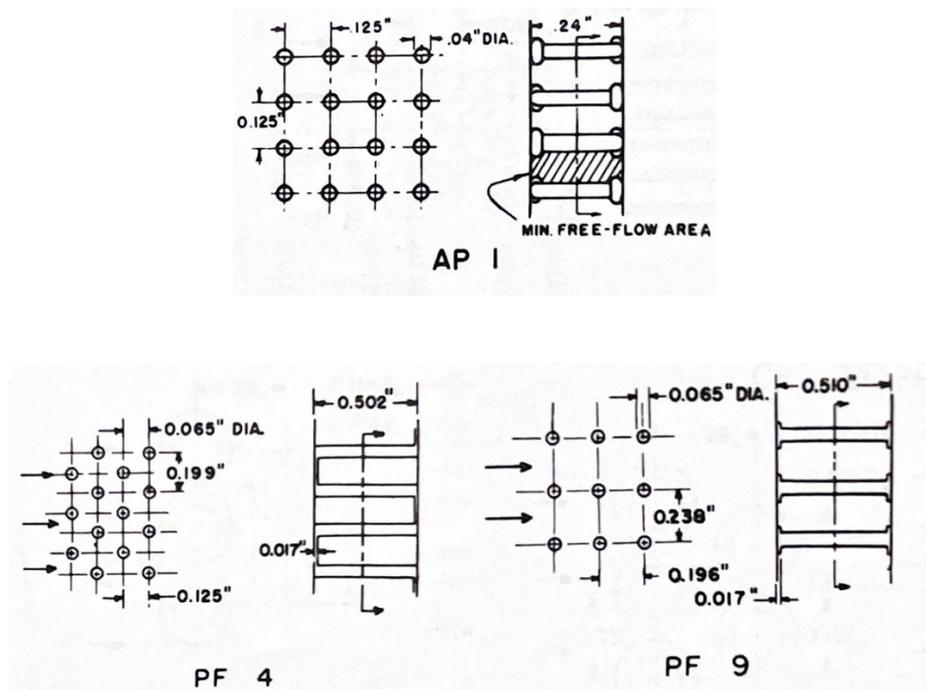


FIGURA 21-DISPOSIZIONE E DIMENSIONI DELLE SUPERFICI ALETTATE

AP-1		
Parametro	Simbolo	Valore
Distanza tra le piastre (altezza pin)	b	6,096 mm
Altezza sezione frontale cold-plate	H	183,38 mm
Lunghezza flusso	L_f	1080,26 mm
Numero pin	n_p	11051
Diametro pin	d	1,016 mm
Sup. alettata bagnata dal flusso	S_f	0,215 m ²
Sup. totale bagnata dal flusso	S	0,366 m ²
Diametro idraulico	D_h	4,401 mm
Area frontale libera	A₀	8,52×10 ⁻⁴ m ²
Conducibilità termica piastre (Al)	λ	200 $\frac{W}{mK}$

PF-4		
Parametro	Simbolo	Valore
Distanza tra le piastre (altezza pin)	b	12,74 mm
Altezza sezione frontale cold-plate	H	179,4 mm
Lunghezza flusso	L_f	1078,48 mm
Numero pin	n_p	6968
Diametro pin	d	1,651 mm
Sup. alettata bagnata dal flusso	S_f	0,461 m ²
Sup. totale bagnata dal flusso	S	0,818 m ²
Diametro idraulico	D_h	5,66 mm
Area frontale libera	A₀	1,74×10 ⁻⁴ m ²
Conducibilità termica piastre (Al)	λ	200 $\frac{W}{mK}$

PF-9		
Parametro	Simbolo	Valore
Distanza tra le piastre (altezza pin)	b	13 mm
Altezza sezione frontale cold-plate	H	183,06 mm
Lunghezza flusso	L_f	1085,57 mm
Numero pin	n_p	3749
Diametro pin	d	1,651 mm
Sup. alettata bagnata dal flusso	S_f	0,253 m ²
Sup. totale bagnata dal flusso	S	0,568 m ²
Diametro idraulico	D_h	9,04 mm
Area frontale libera	A₀	1,89×10 ⁻⁴ m ²
Conducibilità termica piastre (Al)	λ	200 $\frac{W}{mK}$

Il procedimento da ripetere per ciascuna delle tre superfici alettate, prevede in primis la determinazione della velocità del flusso v :

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A_0} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Dalla quale si ricava il Numero di Reynolds R_e :

$$R_e = \frac{\rho v D_h}{\mu}$$

Tramite tale parametro si ricerca il fattore di Colburn j_h , grandezza adimensionale dipendente dalla proprietà termofisiche del fluido di lavoro e dalle caratteristiche del moto.

Il valore assunto da questo fattore è reperibile dalle tabelle del sopracitato testo.

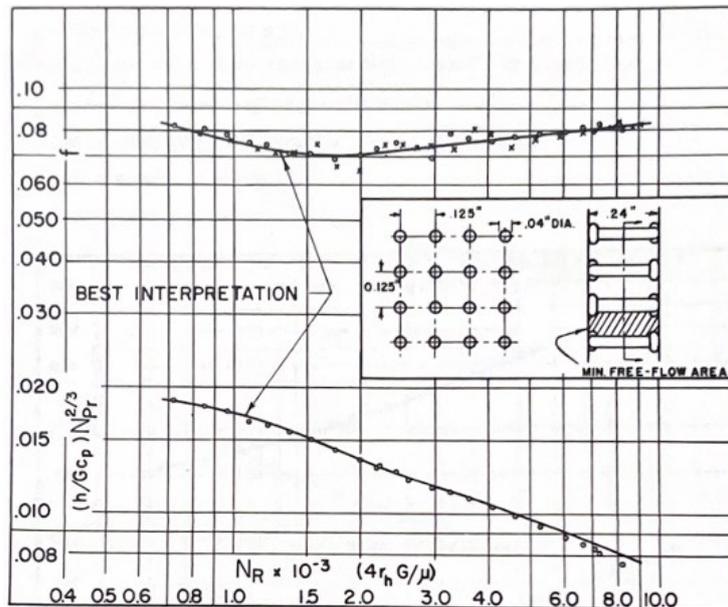


FIGURA 22-DIAGRAMMA SUP. AP-1 REYNOLDS/COLBURN

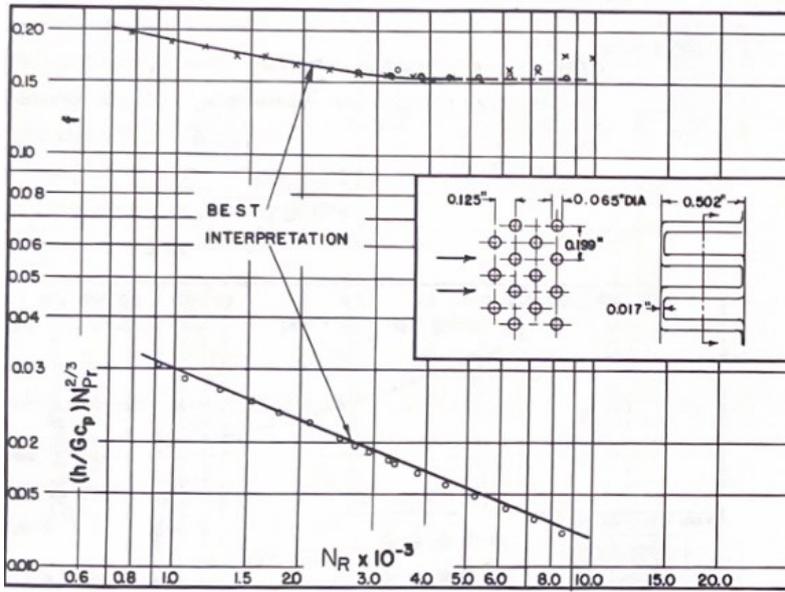


FIGURA 23-DIAGRAMMA SUP. PF-4 REYNOLDS/COLBURN

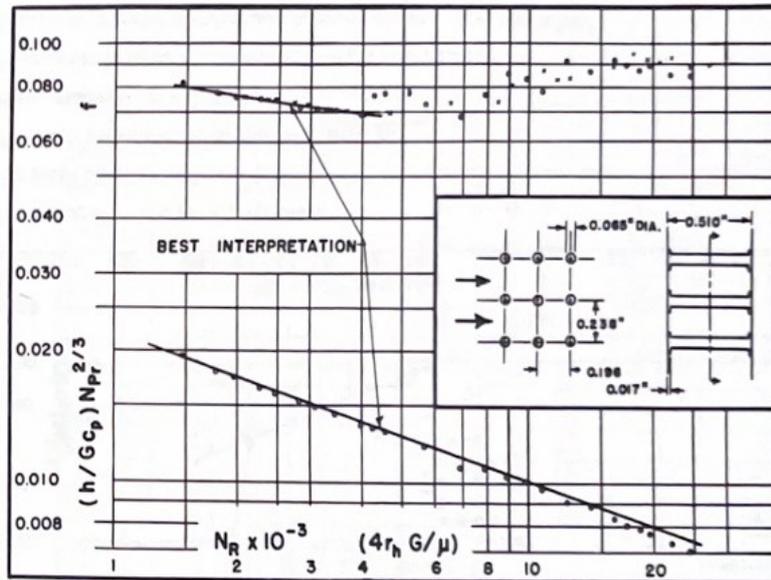


FIGURA 24-DIAGRAMMA SUP. PF-9 REYNOLDS/COLBURN

Stabilito il fattore di Colburn, si passa alla determinazione del coefficiente di scambio termico convettivo h :

$$h = \rho v c_j P_r^{-\frac{2}{3}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$$

A seguire si definiscono l'efficienza dell'aletta η e l'efficienza della superficie alettata η_f :

$$\eta = \frac{\tanh(mb)}{mb}$$

Con $m = \sqrt{\frac{4h}{\lambda D_h}} \left[\frac{1}{\text{m}} \right]$

$$\eta_f = \frac{1}{2} + \left(\eta - \frac{1}{2} \right) \frac{S_f}{S}$$

In questa fase è opportuno raggiungere un valore dell'efficienza dell'aletta superiore a 0,6.

Per verificare la procedura progettuale portata avanti, è necessario confrontare la potenza termica dissipata con quella assorbita dallo scambiatore:

$$\text{Potenza dissipata} \equiv h \eta_f S (\text{LMTD}) = \dot{m} c (T_{out} - T_{in}) \equiv \text{Potenza assorbita}$$

Con LMTD differenza di temperatura media logaritmica:

$$\text{LMTD} = \frac{T_{out} - T_{in}}{\ln(T_s - T_{in}) / (T_s - T_{out})}$$

Da questa comparazione si definiscono i parametri NTU ed F:

$$NTU = \frac{\eta_f Sh}{\dot{m}c}$$

$$F = e^{NTU}$$

Mediante la seguente espressione si calcola la temperatura superficiale garantita dalle scelte adottate nel corso della progettazione, che andrà poi confrontata con quella inizialmente ipotizzata.

$$T'_s = \frac{FT_{out} - T_{in}}{F - 1} \quad [T]$$

Lo scambiatore di calore è da considerarsi adeguatamente progettato se la T'_s è minore o prossima alla T_s , passando dunque alla fase finale dello studio che prevede la stima delle perdite di carico.

Se il valore ottenuto è maggiore della T_s imposta, la superficie alettata presa in considerazione non è adatta alla dissipazione del carico termico, perciò è necessario cambiare la geometria dell'alettatura oppure intervenire sulla temperatura di uscita del fluido.

Se invece è di gran lunga inferiore, allora lo scambiatore risulta sovradimensionato e anche in questo caso va ripetuta la progettazione per motivi legati all'aspetto economico dello studio.

Nelle sezioni successive sono riportate le tabelle contenenti i dati relativi alle superfici alettate analizzate.

Superficie alettata AP-1		
Parametro	Simbolo	Valore
Velocità del flusso	v	$0,565 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Numero di Reynolds	Re	1555,86
Fattore di Colburn	j_h	0,015
Coefficiente di scambio termico convettivo	h	$6312,145 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
Efficienza aletta	η	0,75
Efficienza superficie alettata	η_f	0,65
NTU	\	0,77
F	\	2,16
Temperatura superficiale	T'_s	311,75 K

Superficie alettata PF-4		
Parametro	Simbolo	Valore
Velocità del flusso	v	$0,277 \frac{m}{s}$
Numero di Reynolds	Re	979,17
Fattore di Colburn	j_h	0,01
Coefficiente di scambio termico convettivo	h	$2059,395 \frac{W}{m^2K}$
Efficienza aletta	η	0,73
Efficienza superficie alettata	η_f	0,63
NTU	\	0,548
F	\	1,73
Temperatura superficiale	T'_s	316,85 K

Superficie alettata PF-9		
Parametro	Simbolo	Valore
Velocità del flusso	v	0,255 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Numero di Reynolds	Re	1442,87
Fattore di Colburn	j_h	0,009
Coefficiente di scambio termico convettivo	h	1710,006 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
Efficienza aletta	η	0,83
Efficienza superficie alettata	η_f	0,65
NTU	\	0,324
F	\	1,382
Temperatura superficiale	T'_s	329,27 K

In relazione alle evidenze emerse al termine dell'esercizio progettuale svolto, si può concludere che tra le possibili configurazioni esaminate la superficie alettata denominata AP-1 sia l'unica proposta in grado di garantire una temperatura superficiale prossima a quella imposta inizialmente.

Gli scambiatori con superficie PF-4 e PF-9 manifestano valori di T'_s che non rispettano il vincolo sulla T_s e pertanto non possono essere impiegati al fine preposto.

Per completare lo studio si sono calcolate le perdite di carico relative alla superficie alettata scelta.

$$\text{Perdita in ingresso} \rightarrow \Delta P_{in} = \frac{\rho v^2}{2}(1 - \sigma^2) + \frac{\rho v^2}{2}K_c = 359,69 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Perdita in uscita} \rightarrow \Delta P_{out} = \frac{\rho v^2}{2}(1 - \sigma^2) + \frac{\rho v^2}{2}K_e = 356,88 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Perdita distribuita} \rightarrow \Delta P_d = \frac{\rho v^2}{2}f \frac{4L_f}{D_h} = 1,13 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Con:

$$\sigma = \frac{A_0}{Hb} = 0,761$$

$$K_c = 0,42(1 - \sigma^2) = 1,767$$

$$f = 0,07 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$K_e = (1 - \sigma^2)^2 = 1,75$$

Il fouling factor f è stato estratto dal grafico illustrato in Fig-22

CONCLUSIONI

In tale attività è stato trattato il tema del controllo termico delle celle a ioni di Litio destinate alla trazione elettrica, ponendo come obiettivo la progettazione di uno scambiatore di calore per un generico pacco batterie caratterizzato dai tipici parametri tecnico-dimensionali adottati dai veicoli in questione.

Dopo aver valutato il carico termico da dissipare è stata presentata la proposta progettuale, la quale prevede un TMS a liquido indiretto costituito da due cold-plates single side laterali perfettamente simmetriche operanti in controcorrente e realizzate in lega di Alluminio.

La tipologia di cold-plates scelta è ricaduta sulla struttura Pin fin, proponendo tre possibili superfici alettate singolarmente analizzate dal punto di vista delle loro prestazioni termiche.

Tra le possibili configurazioni studiate, la superficie alettata AP-1 risulta una valida soluzione per la corretta gestione termica del pacco batterie, assicurando un range ottimale di temperatura per l'erogazione della massima potenza elettrica e per l'estensione del ciclo vita delle celle.

Il dissipatore ideato presenta degli aspetti critici che necessitano approfondimenti futuri, come ad esempio la resistenza termica di contatto che si genera all'interfaccia tra le piastre dello scambiatore e le superfici laterali del pacco batterie.

Tale fenomeno è innescato dalle asperità che inevitabilmente caratterizzano le superfici a contatto; infatti queste irregolarità non consentono una perfetta aderenza tra le parti e di conseguenza, pur avendo progettato in maniera egregia lo scambiatore, il trasferimento di calore viene sfavorito, penalizzando se non compromettendo totalmente la dissipazione della potenza termica sviluppata dalle celle.

Un possibile miglioramento della distribuzione delle temperature all'interno del pacco batterie può essere raggiunto mediante l'integrazione di altre tecnologie, virando dunque la proposta su un sistema ibrido ottenibile per esempio con l'introduzione di heat pipes tra le celle.

Appendice

Di seguito vengono riportate le espressioni matematiche adottate per il tracciamento dei grafici illustrati nel capitolo 3.3

$$U_{ca,ref} = 3.4323 - 0.4828 \exp(-80.2493(1-y)^{1.3198}) - 3.2474 \times 10^{-6} \exp(20.2645(1-y)^{3.8003}) + 3.2482 \times 10^{-6} \exp(20.2646(1-y)^{3.7995})$$

$$U_{an,ref} = 0.6379 + 0.5416 \exp(-305.5309x) + 0.044 \tanh\left(-\frac{x-0.1958}{0.1088}\right) - 0.1978 \tanh\left(\frac{x-1.0571}{0.0854}\right) - 0.6875 \tanh\left(\frac{x+0.0117}{0.0529}\right) - 0.0175 \tanh\left(\frac{x-0.5692}{0.0875}\right)$$

$$\frac{dU_{ca}}{dT} = -0.35376y^8 + 1.3902y^7 - 2.2585y^6 + 1.9635y^5 - 0.98716y^4 + 0.28857y^3 - 0.046272y^2 + 0.0032158y - 1.9186 \times 10^{-5}$$

$$\frac{dU_{an}}{dT} = 344.1347148 \times \frac{\exp(-32.9633287x + 8.316711484)}{1 + 749.0756003 \exp(-34.79099646x + 8.887143624)} - 0.8520278805x + 0.362299229x^2 + 0.2698001697$$

▪ x e y corrispondono allo stato di carica degli elettrodi, sono pertanto uno il reciproco dell'altro.

Riferimento: “3D simulation on the internal distributed properties of lithium-ion battery with planar tabbed configuration”

by Jie Li, Yun Cheng, Lihua Ai, Ming Jia, Shuanglong Du, Baohua Yin, Stanley Woo, Hongliang Zhang

Bibliografia

“Electrochemical-thermal Modeling to Evaluate Active Thermal Management of a Lithium-ion Battery Module” di Farid Bahiraei, Amir Fartaj, Gholam-Abbas Nazri

“Novel battery thermal management system for electric vehicles with a loop heat pipe and graphite sheet inserts” di Marco Bernagozzi, Anastasios Georgoulas, Nicolas Miché, Cedric Rouaud, Marco Marengo

“Investigation on liquid cold plate thermal management system with heat pipes for LiFePO₄ battery pack in electric vehicles” di Yuan Li, Hao Guo, Fei Qui, Zhiping Guo, Meiyang Li, Lina Bertling Tjernberg

“3D simulation on the internal distributed properties of lithium-ion battery with planar tabbed configuration” di Jie Li, Yun Cheng, Lihua Ai, Ming Jia, Shuanglong Du, Baohua Yin, Stanley Woo, Hongliang Zhang

“A review on thermal management of battery packs for electric vehicles” di Angelo Maiorino, Claudio Cilenti, Fabio Petruzzello, Ciro Aprea

“VDI-Heat Atlas” di Peter Stephan

“An electrochemical-thermal coupling model for heat generation analysis of prismatic lithium battery” di Honglei Ren, Li Jia, Chao Dang, Zhuoling Qi

“Advancements in battery thermal management for electric vehicles: Types, technologies, and control strategies including deep learning methods” di Ziad M. Ali, Francisco Jurado, Foad H. Gandoman, Martin Calasan

“Compact heat exchangers” di W. M. Kays, A. L. London, McGraw-Hill

“La resistenza termica di contatto nei componenti elettronici di potenza” di P. Cutrì, R. Ricci, E. Ruffini

Dispense del corso “Termotronica 2023/2024” docente Prof. Renato Ricci

Sitografia

<https://www.europarl.europa.eu>

<https://npplithium.com>

<https://it.jingsun-power.com>

<https://www.kautex.com>

<https://vasa.org.au>

<https://serckglobal.com>

<https://www.baknorthermal.com>

<https://www.mersen.co.uk>

<https://www.valeo.com>

<https://hedhme.com>

<https://www.bmw.com>