# POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della produzione

> Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

# Analisi numerica FEM termo-fluidodinamica di celle agli ioni di litio



**Relatori** prof. Aurelio Somà

Candidato Riccardo Capuano S232589

Dicembre 2019

#### Abstract

In uno scenario globale dove l'attenzione alle emissioni e alla salute delle persone nelle città è in costante crescita, l'auto elettrica, con i suoi grandi vantaggi a riguardo, diviene protagonista della ricerca e degli obbiettivi nell'immediato futuro di car-makers e ricercatori. Uno dei più grandi limiti, nonché uno dei fulcri della ricerca, sono le batterie, le cui prestazioni oggigiorno non sono ancora comparabili a quelle delle fonti attualmente più utilizzate, come la benzina. In uno scenario del genere, dove l'automobile elettrica si sta affermando come principale competitor delle automobili con motori endotermici, lo studio e la comprensione delle batterie diviene di fondamentale importanza. Dopo un'approfondita introduzione, con analisi dello stato dell'arte delle batterie, del loro funzionamento, dei rischi e dei metodi di prevenzione di eventuali problemi, si passa ad un'analisi FEM di due modelli di cella agli ioni Litio. In particolare, si studiano i fenomeni termici che nascono durante il funzionamento della cella sotto diverse scariche, andando ad osservare gradienti di temperatura, temperature massime e minime con andamenti delle distribuzioni del calore in un modello prismatico ed in uno Pouch. I risultati ottenuti sono stati confrontati, analizzati criticamente e validati sperimentalmente con delle prove in laboratorio.

1. Stato dell'arte	1
1.1 Batterie al Litio	3
1.1.1. State of Charge	7
1.1.2. State of Health	10
1.1.3. State of available Power	11
1.2. Problematiche di sicurezza connesse al funzionamento delle batterie al Litio	12
1.2.1. Urti e impatti	13
1.2.2. Cortocircuiti interni alla cella	14
1.2.3. Fuoriuscita di bave	15
1.3. Prevensione e sistemi di raffreddamento	16
1.3.1. Sistemi di raffreddamento	17
1.4. Sensori	19
1.4.1. Termocoppie	20
1.4.2. Termoresistenze	21
1.4.3. Sensori a fibra ottica	22
1.4.4. Confronto tra le due tipologie di sensori	22
1.4.5. Sensori interni alla cella	24
2. Analisi FEM	27
2.1. Modello termico	29
2.2. Modello elettrico	30
2.3. Modello elettro-chimico	30
3. Modellazione e simulazione di un modello Prismatico	35
3.1. Case esterno	37
3.2. Collettori	38
3.3. Strato d'aria	39
3.4. Separatori cartacei	41
3.5. Parte attiva	42
3.6. Generazione Mesh	43
3.7. Analisi CFD	45
3.7.1. Definizione parametri modello MSMD	45
3.7.2. Identificazione ed assegnazione materiali	47
3.7.3. Condizioni al contorno	50
3.7.4. Impostazione e simulazione	52
3.7.5. Risultati	52

3.7.6. Analisi Post processing	54
3.8. Studio della temperatura interna alla batteria	57
3.9. Scarica 2C	59
3.10 Scarica 3C	64
3.11. Report risultati cella prismatica	68
4. Modellazione e simulazione di un modello Pouch	69
4.1. Modello geometrico	69
4.2. Generazione Mesh	70
4.3. Analisi CFD	72
4.3.1. Definizione parametri modello MSMD	72
4.3.2. Identificazione ed assegnazione materiali	73
4.3.3. Condizioni al contorno	73
4.3.5. Risultati	75
4.3.6. Analisi Post processing	76
4.3.7. Studio della temperatura interna alla batteria	78
4.4. Scarica 3C	79
4.5. Scarica 5C	84
5. Analisi sperimentali e validazione risultati	88
5.1. Strumentazione e setup	88
5.2. Test HPPC	89
5.3. Validazione dei risultati	93
5.3.1. Scarica 1C	93
5.3.2. Scariche 2C e 3C	97
6. Conclusioni	101
Bibliografia	103

# 1.Stato dell'arte

Con la crescente preoccupazione per l'ambiente, enti privati e statali si stanno attivando sempre maggiormente per trovare alternative ai motori a combustione interna e alle fonti energetiche a cui si attinge per la propulsione.

I piani di numerose nazioni, nell'immediato futuro, mirano a strade senza sovraffollamento dei veicoli, minore inquinamento acustico, riduzione delle emissioni nei centri abitati e aumento della sicurezza alla guida. Entro il 2030[1] si prevede che le più grandi metropoli europee si adeguino al modello di smart cities.

La principale motivazione che spingerà, invece, i produttori a adottare veicoli elettrici sono le ultime direttive provenienti dagli accordi per la salvaguardia del pianeta. Questi impongono un'emissione massima di 90g di CO2 per ogni kilometro percorso: obiettivo che ogni produttore deve raggiungere entro il 2020 per evitare ingenti sanzioni. L'attenzione si sta spostando, quindi, verso queste soluzioni che assicurano emissioni di CO2 e NOx ridotte senza compromettere le prestazioni.

Soluzioni ibride ed elettriche sono le migliori per rientrare senza sforzo in questi obiettivi. Il grande problema, che rappresenta anche la grande sfida dell'ingegneria oggigiorno, è riuscire a realizzare dei sistemi elettrici che siano competitivi con quelli endotermici attualmente in uso. In particolare, il punto debole dei veicoli elettrici è rappresentato dal sistema di immagazzinamento e fornitura energetica durante il moto. Attualmente i principali competitors dell'alimentazione a benzina sono le batterie, gli ultracapacitori e il Fuel Cells. La soluzione più utilizzata oggi è rappresentata dalle batterie, che rappresentano il giusto compromesso tra densità di energia e potenza, tra queste in particolare le batterie con tecnologia a Litio è quella che per caratteristiche e costi è la soluzione più adottata.



Figura 1- Relazione tra densità di potenza ed energia tra diversi tipi di celle

## 1.1Batterie al Litio

La batteria è composta da una o più celle dotate di due elettrodi, un anodo ed un catodo, immersi in un elettrolita che permette la migrazione degli ioni e un separatore fisico poroso tra i due elettrodi.



Figura 2- Migrazione degli ioni Litio in una cella LiFePO4

L'energia viene fornita quando un utilizzatore viene attaccato al circuito esterno della batteria, dando il via ad un processo di ossidoriduzione che genera contemporaneamente la migrazione degli ioni da un elettrodo all'altro e il passaggio di elettroni all'utilizzatore fornendo così energia elettrica. Il moto degli ioni è un moto reversibile tra anodo e catodo e questo permette il rigenerarsi dello stato della batteria. I materiali solitamente utilizzati nelle batterie agli ioni Litio sono generalmente grafite, costituente l'anodo ed un ossido metallico costituente il catodo, in questo caso LiFePO4. L'elettrolita permette la migrazione degli ioni tra i due elettrodi.

Durante la scarica, Li allo stato solido si disperde dalla superficie anodica per fornire ioni Li+ alla soluzione elettrolitica e per fornire elettroni al circuito esterno.

In particolare, affinché gli elettroni vengano raccolti ed inviati al circuito, anodo grafitico e catodo di ossido metallico sono costituiti anche da due zone dette collettori. Generalmente il collettore anodico è costituito da Rame (Cu), invece il collettore catodico è costituito da Alluminio (Al) [2]



Figura 3- funzione dei collettori

La batteria in esame studiata e analizzata utilizza come materiale Catodico il Litio Ferro Fosfato (LiFePO4).

Una caratteristica importante delle batterie LFP è il plateau di scarica piatto, cioè tendono a non formare composti non stechiometrici durante carica e scarica, favorendo la vita della batteria. Sono non tossiche e tendono a mostrare un piccolo declino della capacità durante la vita della batteria stessa [3].

Una batteria, con una determinata tecnologia e costruzione, è caratterizzata da valori di funzionamento differenti:

- Tensione nominale
- Capacità nominale
- Numero di cicli
- Scarica massima

Sfortunatamente, questi valori non sono costanti, come non lo sono neanche le prestazioni di una batteria. È importante quindi studiare il funzionamento delle batterie anche al di fuori delle condizioni ideali, in quanto scenario ricorrente nel funzionamento quotidiano.

Quando la tensione nominale della singola cella non è sufficiente per l'applicazione specifica, configurazioni in serie ed in parallelo possono ovviare a questo problema.

Ad oggi tutte le soluzioni di immagazzinamento di energia per veicoli elettrici sono agglomerati di celle in serie e parallelo che compongono il pacco batterie.

Purtroppo, il processo di ricarica delle batterie non è totalmente reversibile, hanno quindi una vita limitata e ci sono svariati fattori che tendono ad accorciarne la vita [3]. Ad esempio, soffrono il processo di carica e scarica, soffrono sia la sovraccarica che le scariche molto profonde. Hanno, a seconda delle loro caratteristiche, valori di carica e scarica ideali e per la loro salvaguardia, è necessario cercare di mantenere il tutto sotto controllo. Per questo nelle configurazioni automobilistiche, l'insieme di batterie in serie e parallelo, viene gestito da un dispositivo chiamato Battery Management System (BMS) [4]. Questo provvede a fornire cariche e scariche omogenee alle varie batterie, senza che una venga più usurata dell'altra.



Figura 4- funzionamento del Battery Management System

Inoltre, le batterie soffrono il calore e al di fuori di determinati intervalli di temperature, le loro caratteristiche ed il loro funzionamento peggiora mostrando degradamenti sia reversibili che irreversibili. In particolare, si è studiato che il range ottimale di funzionamento delle batterie è tra i 15 °C e 35°C [5]. Al di fuori di questi intervalli si ha, per temperature inferiori, un'efficienza minore e per temperature maggiori i 35° C una degradazione della batteria stessa. A questo, va aggiunto che la batteria, da un punto di visto elettrico, può essere considerata come un circuito con una determinata resistenza interna. Questo implica che quando è in funzionamento, si riscalda inevitabilmente, generando calore.

Per questo è di vitale importanza che le batterie siano collegate ad un Battery Thermal Management (BTM) system, un sistema che controlli e gestisca i flussi di calore per avere un funzionamento ottimale delle batterie.

Basti pensare ad un insieme di batterie per un veicolo puramente elettrico, quanto sia importante l'asportazione del calore soprattutto da quelle centrali impacchettate tra altre batterie.

Tra le batterie al litio vi sono tre possibili modelli:

- Cilindriche
- Prismatiche
- Pouch



Figura 5- esempi di tipi di celle

Le cilindriche sono utilizzate sia nei veicoli terrestri, soluzione adottata da Tesla ad esempio, sia per applicazioni più piccole come i computer portatili.

Le batterie prismatiche hanno un rivestimento protettivo di acciaio o alluminio che garantisce una elevata resistenza meccanica. La forma invece garantisce un buon sfruttamento degli spazi e dissipazione del calore. Per questioni di compattezza gli elettrodi e separatori sono costituiti da sottilissimi fogli ed immersi nell'elettrolita. Le celle Pouch sono le più piccole per dimensioni e senza un rivestimento esterno. Sono adatte a lavorare in spazi piccoli e stretti, ma la mancanza di una protezione esterna le rende vulnerabili ad urti e deformazioni.

I parametri di stato più utilizzati per rappresentare la condizione di funzionamento attuale di una batteria sono:

- State of charge (SOC)
- State of Health (SOH)
- State of Available Power (SOAP)

La loro determinazione è uno dei punti critici per far lavorare e gestire le batterie nella maniera più consona. Quindi è necessario specificare e definire con maggior dettaglio i suddetti parametri.

#### 1.1.1 State of charge

È definito come la percentuale rimanente di capacità disponibile. Più semplicemente, questo parametro rappresenta quanta carica c'è ancora nella batteria.

La sua determinazione è un'operazione complessa che, a seconda del grado di precisione richiesta, può comportare grandi sforzi computazionali. Solitamente nella determinazione di questo parametro si utilizzano delle ipotesi per rendere più semplice il calcolo senza compromettere di troppo i risultati.

Uno dei metodi più utilizzati per il calcolo di questo parametro è il Coulomb Counting. Si può immaginare la cella come un serbatoio che, a seconda della corrente erogata, va a svuotarsi. La quantità rimanente è la carica della batteria.

Il calcolo per la determinazione di questo valore è:

$$SOC(\%) = \frac{Q_{residual}}{Q_{available}} x100 = \left(1 - \frac{Q_{used}}{Q_{available}}\right) x \ 100$$

La  $Q_{av}$  è la capacità disponibile. Questo parametro varia principalmente con l'invecchiamento ed utilizzo della batteria, della temperatura e della quantità di corrente.

La Q<sub>us</sub> Viene calcolata semplicemente integrando la corrente utilizzata nell'intervallo di tempo.

Il SOC è un termine molto utile per indicare lo stato della batteria, ma anche molto utilizzato per la determinazione di altri parametri.

Andare quindi a stabilire con precisione il suo valore è una questione delicata e ancora oggi oggetto di discussioni. Bisogna infatti pensare all'influenza della temperatura e dell'invecchiamento sul calcolo del SOC. Inoltre, anche due batterie uguali sottoposte allo stesso sforzo possono presentare SOC diversi a causa di naturali diversità di costruzione.[7]

Dovendo tener conto di molti parametri che influenzano il comportamento di una batteria, non si utilizza come metodo di calcolo avanzato il Coulomb counting per la misurazione e stima del SOC.



Figura 6- Processo logico di implementazione degli algoritmi di stima [8]

Infatti, sono stati sviluppati molteplici algoritmi di stima e si dimostra da dati raccolti dal database del portale di pubblicazioni scientifiche IEEE che la maggioranza tra i metodi proposti ed utilizzati per la stima del SOC appartiene alla famiglia del Kalman Filter.



Figura 7- Grafico percentuale di utilizzo di diversi algoritmi per la stima del SOC [8]

Inoltre, gli algoritmi basati sul Kalman Filter possono essere facilmente integrati con tutte le tipologie di celle al Litio [9].

Il principio di base su cui si fonda il metodo dei Kalman Filter è di stimare lo stato della batteria in maniera ricorsiva. Si arriva ad un risultato finale con un errore minimizzato grazie all'aiuto di tutti i precedenti stati misurati che hanno inciso sul risultato finale [8].

La famiglia degli algoritmi dei Kalman Filters si divide tra metodi lineari e non lineari.



Figura 8- Tipologie di Kalman Filter [8]

Tra i lineari spicca il linear Kalman Filter, il primo algoritmo sviluppato, una tecnica ricorsiva di stima che ha il grande vantaggio di andare a minimizzare l'errore quadratico medio [8].



Figura 9- Schema logico funzionamento Kalman filter [8]

Tra i non lineari uno dei metodi più famosi ed utilizzati è l'extended Kalman Filter. Questo metodo è uno dei più utilizzati per la stima dello stato e dei parametri delle batterie [9].

Opera nella stessa maniera del Kalman Filter, ma va a linearizzare le funzioni non lineari [10] andando ad utilizzare derivate parziali e serie di Taylor del primo ordine.

#### 1.1.2 State of Health

È definito come la capacità disponibile a batteria completamente caricata, rispetto alla capacità massima originale.

Il calcolo per la determinazione del valore è ambiguo e ci sono molti modi per determinare il SOH, la sfida oggi è unificare i vari metodi per avere un parametro preciso e facile da calcolare. Esempi di modi per il calcolo:

$$SOH = \frac{Q_{current}}{Q_{nominal}} x100$$
$$SOH = \frac{R_{EOL} - R_{current}}{R_{EOL} - R_{nominal}} x100$$

10

Questo parametro è particolarmente influenzato da:

- Invecchiamento
- Auto scarica
- Resistenza interna
- Numero di cicli
- Profondità di scarica

Più generalmente definisce lo stato di salute della batteria in termini di degradazione della capacità.

Esistono molti modelli che utilizzano una combinazione di capacità e resistenza interna per il calcolo del SOH, ma come indicato non sono gli unici parametri a definire realmente lo stato della batteria. Ad esempio, due batterie con materiali chimici diversi hanno dei SOH calcolati diversamente, persino quando c'è la stessa tecnologia chimica l'elettrodo diverso porta a risultati diversi.[11]

Proprio come per il SOC, anche questo parametro necessita di un'approfondita serie di calcoli e per essere stimato, ed allo stesso modo anche qui i metodi preferiti per effettuare tale lavoro sono gli algoritmi del Kalman Filter e l'extended Kalman Filter.

### 1.1.3 State of available Power

È un parametro di stato che indica la capacità di una batteria di adempiere ad una determinata carica o scarica nello stato attuale in cui versa.

È un modo per verificare se la batteria con l'attuale SOH e SOC può fornire potenza ad una determinata applicazione. Nelle attuali applicazioni per veicoli elettrici il SOAP fornisce dei valori limite a cui l'unità di controllo dell'automobile fa capo per limitare il funzionamento della batteria. È quindi di fondamentale importanza per quanto riguarda la sicurezza a bordo e la durata della batteria stessa, essendo un parametro che va a proteggere eventuali richieste di potenza fuori dalle possibilità della batteria in determinate condizioni operative. Questo parametro è molto simile allo State of Function, un indicatore di stato della batteria che indica la capacità della batteria di adempiere ad un determinato obbiettivo in termini di picco di potenza. È rappresentato come un segnale logico, che fornisce un valore positivo o negativo in output. Al contrario il SOAP fornisce un responso tenendo conto del tempo in cui viene richieste una determinata potenza, andando a considerare anche temperatura dell'ambiente ed altri dati disponibili.

# 1.2 Problematiche di sicurezza connesse al funzionamento delle batterie al Litio

Oltre alla sfida di riuscire a realizzare batterie sempre più performanti e longeve, si affianca anche il bisogno di poterle sfruttare in completa sicurezza.

Come scritto in precedenza le batterie tendono a scaldarsi, questo per motivi esterni o interni porta ad un peggioramento delle caratteristiche. In determinati casi però, come sforzi eccessivi, scariche profonde e condizioni di lavoro ostili, si può arrivare fino all'esplosione delle batterie, causata da riscaldamento incontrollato.



Figura 10- Fenomeno del Thermal Runaway [13]

Generalmente il termine utilizzato per indicare il riscaldamento incontrollato è "thermal runaway". In commercio problemi del genere sono stati riscontrati più volte, tra i più famosi il caso Samsung con i Galaxy note [12].

Le possibili ragioni per cui un guasto del genere può avvenire sono:

- Urti e impatti
- Cortocircuito interno alla cella
- Fuoriuscita di bave

Per quanto non si possano evitare malfunzionamenti dovuti a difetti intrinsechi della batteria o nati durante utilizzo che possono portare a generazione di gas, si può però, durante utilizzi ordinari e straordinari avere un'idea della deformazione che può assumere una cella.

Conoscendo i materiali che compongono una batteria e le loro proprietà elettriche, termiche e chimiche, è possibile infatti evitare un impaccamento scorretto delle celle all'interno del pacco batteria, che porterebbe a contatti indesiderati e conseguenze negative sulla vita della batteria. Ad esempio, con il rigonfiamento di due celle adiacenti, fino al limite al contatto diretto, viene a mancare lo spazio minimo necessario per il tipo di raffreddamento previsto per le batterie.



Figura 11- difetti interni ad una cella

#### 1.2.1 Urti e impatti

La quantità di energia rilasciata, causata da un danno meccanico, può risultare in un elevatissimo aumento delle temperature localmente che può portare al Thermal Runaway.

Con l'aumento costante di veicoli elettrici o ibridi nelle strade, un incidente tra due auto elettriche diventa sempre più possibile e con sé i rischi che comporta. Ad oggi le strategie per la sicurezza sono:

- Isolare meccanicamente il pacco batterie, usando armature pesanti per proteggere il pacco.
- Ricerca di nuovi materiali con temperature più alte in cui si innesca il fenomeno del thermal runaway.
- Limitare il SOC per non essere mai a piena capacità.[13]

Un forte impatto sul corpo del pacco batterie può creare forti deformazioni, e per svariate ragioni può nascere un fenomeno esplosivo.

Anzitutto, una deformazione della cella altera la geometria e la disposizione dei componenti chimici al suo interno, qualora si venga a creare un cortocircuito le temperature aumentano in corrispondenza di un calo repentino di tensione e si innesca il thermal runaway.

Inoltre, impatti molto forti possono causare la perdita di componenti chimici che a contatto con le alte correnti in gioco possono causare incendi localizzati.

#### 1.2.2 Cortocircuiti interni alla cella

Oltre ad una deformazione meccanica, il fenomeno del corto circuito può innescarsi anche spontaneamente. Principalmente la causa dei cortocircuiti all'interno delle celle dipende dalla formazione di dendriti al loro interno. Lo studio della crescita dei dendriti è una vera e propria sfida perché crescono in funzione della densità di corrente, della composizione dell'elettrolita e con le temperature, ma la teoria più importante sulla formazione dei dendriti è che sono funzione di apporti non uniformi di corrente. La direzione di crescita del dendrite procede da un elettrodo all'altro, e una volta che li mette in contatto, viene a generarsi il cortocircuito e di conseguenza il thermal runaway.

Un interessante esperimento condotto da Kong *et al* [14] permette di studiare e conoscere la formazione dendritica durante una scarica della cella.

Ciò è stato realizzato con una batteria con armatura trasparente, e osservata al microscopio.



Figura 12- evoluzione dendritica interna ad una cella e cortocircuito [14]

Nelle immagini si può notare come dopo 7.3h avvenga il contatto tra i due elettrodi e l'inizio del corto circuito, nel grafico si può verificare il contemporaneo calo repentino della tensione a cui corrisponde l'improvviso innalzamento delle temperature.

Dopo vari esperimenti su tecnologie e composizioni diverse, si sono prodotti dei risultati basati sulla velocità di crescita dei dendriti sotto differenti densità di corrente. Il risultato è stato ottenuto dividendo la lunghezza del dendrite per il tempo in cui avviene la prima caduta di tensione.

I risultati di questo esperimenti hanno mostrato come modificando la densità di corrente è possibile modificare la morfologia del dendrite ed evitare possibili cortocircuiti.

#### 1.2.3 Fuoriuscita di bave

Perfino in condizioni operative ordinarie le batterie possono subire thermal runaway, esplosioni e incendi. Questo può succedere quando sono presenti difetti all'interno della batteria. Durante la fabbricazione difetti di saldatura possono lasciar fuoriuscire bave che al contatto con altri elementi possono causare thermal runaway.[13]



Figura 13- fuoriuscita di bave

#### 1.3 Prevenzione e sistemi di raffreddamento

Il problema del thermal runaway diventa anche più pericoloso quando determinate applicazioni richiedono grandi numeri di celle per soddisfare la richiesta energetica, si vengono a creare quindi grandi pacchi batteria composti da più celle in serie e parallelo. Ormai in commercio sono presenti pacchi batterie contenenti un grande numero di celle singole e il difetto di una singola batteria può portare al cosiddetto effetto cascata [16].



Figura 14- pacco batterie composto da numerose celle connesse [15]

Diventa quindi fondamentale apportare delle modifiche e dei sistemi di raffreddamento per tenere alti i livelli di sicurezza di questi sistemi.

Si dimostra [15] che sistemi di gestione del calore basati su assorbimento del calore latente e di dissipazione possono ridurre i picchi di temperature di almeno 15°. Questo risultato può portare fino ad un aumento della vita del pacco batterie del 40%. L'aggiunta di materiali isolanti elettrici, con proprietà fuoco-ritardanti permettono di ottenere risultati incoraggianti in quanto a sicurezza dei sistemi.



Figura 15- Fenomeno del riscaldamento "controllato" [15]

Il grafico mostra l'andamento delle temperature di un pacco batterie, in particolare dove una cella subisce thermal runaway, e le temperature delle celle adiacenti.

Si può notare che con i giusti accorgimenti, questo temibile scenario di esplosioni "a cascata" può essere quantomeno arginato.

In ogni caso si rende fondamentale, per qualsiasi pacco batterie, un adeguato sistema di raffreddamento o riscaldamento che controlli la temperatura costantemente, in modo da lavorare sempre nel range di temperature desiderato.

#### 1.3.1 Sistemi di raffreddamento

Affinché, quindi, si preservi la vita della batteria e si operi in condizioni di sicurezza è fondamentale un BTMS efficiente che fornisca metodi ottimizzati ed economici per gestire le variazioni di calore che un pacco batterie può subire, come mostrato in precedenza. È dimostrato [5] che il range di temperature in cui c'è la massima efficienza in condizioni operative per un pacco batteria è tra i 15°C e i 35°C. I sistemi

che vengono di norma installati per asportare il calore sviluppato in eccesso da un pacco batterie si dividono in attivi e passivi.

I sistemi passivi sono generalmente meno costosi e più semplici, asportano una quantità di calore minore senza risultare però ingombranti e pericolosi. Questi non richiedono supplementari fonti di riscaldamento o raffreddamento.

Al contrario, sebbene i sistemi attivi richiedano energia, e siano più complicati da costruire e far operare in sicurezza, riescono ad asportare più calore.

Un esempio di sistema passivo di asportazione del calore è l'installazione di PCMs [17] (phase changing materials) attorno al pacco batterie.

Vengono infatti utilizzati particolari materiali in grado di assorbire e condurre facilmente il calore, e sfruttano il passaggio di fase per massimizzare il loro effetto. L'energia termica può essere immagazzinata sotto diverse forme:

- Calore latente, fattore che si occupa della maggiore asportazione di calore.
- Energia di reazione chimica
- Calore sensibile

Questi sistemi possono assorbire anche grandi quantità di calore, andando a cambiare di fase, ed una volta assorbito il calore ritornare allo stato originario.

Altri esempi di sistemi passivi più semplici sono i sistemi raffreddati per convezione naturale o con piccoli scambiatori di calore alettati.

Invece, esempi di sistemi di raffreddamento attivi possono essere ventilatori che creano una convezione forzata, pompe per sistemi idraulici che attraversano il pacco batterie e ne assorbono il calore e raffreddatori termoelettrici. Sebbene più costosi, il risultato in quanto termini di calore asportato per questi sistemi è sicuramente migliore, e in determinati campi ed applicazioni il loro utilizzo diviene necessario.

#### 1.4 Sensori

Una volta individuati i parametri critici dei materiali e dei fenomeni termo-chimici di una batteria, si fanno previsioni di condizioni di fallimento, di guasti e di condizioni operative. Per monitorare e validare la bontà degli studi, ma anche per controllare e osservare i fenomeni empirici che avvengono nelle batterie, sono di fondamentale importanza i sensori.

Questi possono essere applicati per condurre esperimenti e raccogliere dati da analizzare, o possono essere fissi per monitorare costantemente determinati parametri. I dati raccolti dai sensori si dividono principalmente in online e offline, i primi sono istantaneamente inviati ad un dispositivo collegato, i secondi sono rielaborati in un secondo momento.

Avere una sensoristica precisa e adeguata è fondamentale nella progettazione e testing delle batterie. Infatti, individuare con precisione i punti critici di una cella, permette di progettare sistemi di gestione, raffreddamento e sicurezza efficaci ed efficienti, senza dover sovrastimare o sprecare risorse.

Per questo un'analisi approfondita della sensoristica disponibile, per quanto riguarda il riscaldamento delle celle, è stata effettuata largamente e con gran numero di articoli che propongono confronti [18][19][20][21].

I sensori più utilizzati oggi per i test termici sulle batterie sono:

- Termocoppie
- Termoresistenze
- Fibre ottiche

Si nominano solamente, altri metodi di controllo di parametri ormai in disuso, meno precisi o più costosi ed inaffidabili:

- Pirometri
- Sensori elettro-meccanici
- Correlazione digitale di immagini 3D
- Tecniche di diffrazione ad alta energia ai raggi X

#### 1.4.1 Le termocoppie

Tipologia di sensori elettrici, questi sono ampiamente utilizzati perché economici, facilmente sostituibili e riescono ad ottenere misure di temperature in range abbastanza ampi. Ciò che rende, in determinate applicazioni, obsoleti questi sensori può essere l'accuratezza che come si dimostra più avanti può portare a risultati leggermente diversi da quelli reali.

La termocoppia è costituita da due conduttori che, connessi tra loro, formano il cosiddetto "giunto caldo". Questo va posizionato nel punto in cui si vuole effettuare la misura. Gli altri due estremi sono collegati ad una morsettiera alla quale è connesso lo strumento di misura; questo rappresenta il "giunto freddo",

tipi di termocoppie disponibili in commercio sono:

Tipo K

Sono termocoppie di uso generale, economiche e disponibili in una grande varietà di formati. Il loro intervallo di misura va da -200°C a 1260°C.

• Tipo J (modello vecchio sostituito dal tipo k)

Il loro intervallo di misura va da -40°C a 750°C ed essendo più limitato del tipo K, le rende meno diffuse di queste ultime. Sono utilizzate in vecchi apparati che non funzionano con il tipo K. Non possono essere utilizzate sopra i 760°C a causa di una transizione magnetica che fa perdere loro la calibrazione.

Tipo I

Presentano caratteristiche simili alle termocoppie in ferro (tipo J). Utilizzabili nell'intervallo di temperature comprese tra -200°C e 400°C. Questo tipo viene utilizzato principalmente per misure di laboratorio.

Tipo E

Hanno una elevata sensibilità (68  $\mu$ V/°C) che le rende adatte ad applicazioni a bassa temperatura (criogeniche). Sono inoltre amagnetiche.

• Tipo N (evoluzione del tipo K)

L'intervallo di misura utile è compreso tra i 650°C e i 1250°C. La loro stabilità e la resistenza all'ossidazione a caldo le rendono un ottimo sostituto a basso costo delle termocoppie a base di platino.

Tipo B

Adatte per alte temperature, fino a 1800°C. A causa della particolare relazione tensione-temperatura che le caratterizza, forniscono la stessa differenza di potenziale a 0°C ed a 4 °C. Sono perciò inutili al di sotto di 50 C.

Tipo S

Adatte per alte temperature fino a 1600°C.

Tipo R

Sono simili al precedente tipo S e sono quindi adatte per alte temperature fino a 1600°C; hanno però il vantaggio di avere in uscita un segnale un po' più forte e migliore stabilità.

#### 1.4.2 Termoresistenze

Anche le termoresistenze sono un esempio di sensore elettrico. Il principio di funzionamento si basa sul misurare la variazione di resistività del corpo in esame e poi andarsi a calcolare la temperatura dalla relazione lineare

$$\rho(T) = \rho_0 * [1 + \alpha(T - T_0)]$$

In questo elaborato per effettuare le misure sulle celle studiate si sono usate delle termoresistenze. Per la misura della resistività prima della conversione in temperatura, si sfrutta il principio di funzionamento del partitore di tensione.



Figura 16- Schema del partitore di tensione

Conoscendo la tensione in ingresso, e misurando la tensione in uscita, tramite la semplice formula

$$V_2 = V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Si può ricavare la resistenza di interesse e calcolarsi quindi la relativa temperatura.

#### 1.4.3 Sensori a fibra ottica

Tra le principali caratteristiche che spingono all'utilizzo della fibra ottica in questo campo vi sono: le sue ridotte dimensioni, assenza di alimentazione elettrica nel punto in cui si vuole effettuare una determinata di misura, è adatta al multiplexing cioè più sensori possono essere disposti sulla stessa fibra, immunità alle interferenze elettromagnetiche.

Le fibre ottiche sono composte da filamenti di materiali generalmente vetrosi o in determinate applicazioni anche polimerici, e sono realizzate in modo da poter condurre al loro interno la luce.

Utilizzando lo scattering di Ramann si può misurare la distribuzione di temperatura su determinati punti riuscendo ad ottenere una buona risoluzione.

#### 1.4.4 Confronto tra le due tipologie di sensori

I sensori elettrici sono largamente utilizzati. Rappresentano, infatti, un ottimo compromesso tra qualità dei risultati, dimensioni e prezzo. Di recente però sempre più

attenzione si pone sui sensori a fibra ottica, nonostante più costosi mostrano la possibilità di multiplexing, e di raccolta dati in-situ.

È doveroso nonché utile, però, analizzare le performance dei diversi sensori per avere un quadro completo e per scegliere il tipo di sensore che più fa al caso proprio.

Sul case della stessa cella prismatica, lungo la diagonale sono stati posti negli stessi punti i due tipi di sensori [19].



Figura 17- Posizionamento dei sensori a fibra ottica e termocoppie per esperimento di confronto [18]

La batteria è stata utilizzata con cariche e scariche ideali o anche più aggressive, con C-rate che variano tra un minimo di 0.7C e un massimo di 8.25C. Si noti che durante questi processi di carica/scarica, durante la scarica il delta T aumenta in maniera significativa all'aumentare dei processi di scarica. Si mostra come le massime temperature si raggiungano alla fine delle scariche, in coerenza con il fenomeno chimico di migrazione degli ioni litio. Questi migrano durante il processo, creando un gradiente di concentrazione sempre maggiore che genera calore.

Dai risultati è evidente che la fibra ottica è più accurata e mostra variazioni di temperature più alte.



Figura 18- Risultati sperimentali [18]

Ma da ulteriori dati si nota che all'aumentare del C-rate questa differenza si fa più netta. In condizioni di stress maggiori quindi, quando le batterie sono più sforzate e si raggiungono temperature maggiori in minor tempo, la fibra ottica ha una precisione migliore.

D'altro canto, per la misura delle temperature con C-rate bassi i risultati sono quasi identici.



Figura 19- differenze di temperature misurate al variare della C di scarica [18]

#### 1.4.5 Sensori interni alla cella

Nella letteratura moderna molti casi di esperimenti e misure di temperature e sforzi sono stati condotti sulle batterie con sensori anche interni alla cella.

Questo tipo di misura può risultare vantaggioso per quanto riguarda l'utilizzo degli spazi e soprattutto l'accuratezza delle misure. D'altro canto, dover posizionare un sensore internamente alla cella con il suo ambiente acido e corrosivo può risultare difficile oltre che costoso.

L'esperimento di Nascimento et al. e l'esperimento di Fleming nell'università di Warwrick [19][20] mostrano il posizionamento di una doppia fibra, FBG e FP, per la misura interna e contemporanea di deformazioni e temperature.



Figura 20- Punto di posizionamento del sensore internamente alla cella. [19]

La cella aperta è stata richiusa con una saldatura sottovuoto e sul case esterno, in corrispondenza del posizionamento interno dei sensori, sono stati applicati gli stessi sensori per verificare e confrontare le misure. Il confronto delle misure mostra grande precisione, sicurezza e non invasività dell'applicazione della sensoristica mista interna.

Dall'esperimento di Fleming et al. Vengono confermati i risultati sulla accuratezza, sulle procedure e sulla stabilità dei risultati, con una differenza tra misurazione interna ed esterna di ben 6°C durante la scarica e 3°C durante la carica.



Figura 21- Andamento della temperatura [20]



Figura 22-Numero di cicli di carica e scarica effettuati [20]

# 2. Analisi FEM

Per realizzare lo studio di analisi e simulazione delle prestazioni di una batteria durante i processi di carica e scarica in condizioni di lavoro ordinarie e straordinarie, il programma che ha permesso un lavoro accurato e con contenuti sforzi computazionali è stato Ansys Workbench.

Con questo programma si sono svolte analisi CFD, Computational Fluid Dynamics, cioè analisi computazionali fluidodinamiche. Così si sono risolte le complesse equazioni che descrivono il comportamento dei fluidi, senza grandi sforzi in termini di calcolo e impiego delle risorse del proprio computer.

I principali vantaggi ottenuti con questo tipo di simulazioni sono stati:

- Prevedere il comportamento delle batterie prima ancora dei test in laboratorio
- Risparmio di tempo, soldi e materiali per testare setup e determinati sistemi di interesse
- Comprensione dei fenomeni fisici che caratterizzano il modello studiato
- Possibilità di fare illimitato numero di simulazioni e test.

Per comprendere a pieno i risultati ottenuti, e per impostare ogni parametro adeguatamente all'interno del pacchetto Fluent di Ansys Workbench, è utile comprendere gli approcci, le scelte ed i modelli matematici utilizzati nel programma. Si sono caricati su Ansys Fluent determinati tools per permettere lo studio e la risoluzione dei fenomeni elettrici e chimici durante il funzionamento delle batterie per poi analizzare il loro comportamento da un punto di vista termico. Per questo si è scelto se caricare ed utilizzare un modulo a scelta tra:

- SINGLE POTENTIAL BATTERY MODULE
- DUAL POTENTIAL BATTERY MODULE

Il primo modulo aggiuntivo del pacchetto Fluent permette l'analisi della batteria andando a definire le sue parti costituenti in macro-blocchi. Infatti, si devono definire e modellare le proprietà dell'anodo del catodo e di un separatore infinitamente sottile.



Figura 23- Esempio geometria modello Single potential [26]

La scelta del metodo di approccio alla simulazione è però ricaduto sul secondo, ovvero il dual potential battery module. Questo, infatti, fa uso di un approccio MSMD (multi-scale multi-dimension).

Tenendo conto della complessità geometrica e strutturale dell'interno di una batteria, realizzata come una moltitudine di sottilissimi foglietti di anodo, catodo e separatore, ognuno con proprietà diverse e in un ambiente chimicamente ed elettricamente attivo, si è scelto di utilizzare un metodo che riconoscesse l'interno della batteria come un'unica parte attiva. Materiale attivo durante i processi di carica e scarica, ma senza fare distinzione tra i suoi componenti. Materiale caratterizzato da proprietà medie e che forniscano in output dei risultati uguali ad un test di laboratorio. Vi sarà quindi un unico valore di diffusività, di conducibilità, di densità che sarà il risultato della media pesata dei materiali che compongono l'interno della batteria presa in esame. Nel nostro caso di una LiFePO4, ossia Litio Ferro Fosfato.



Figura 24- Struttura interna di una cella [26]

I campi elettrici e termici sono risolti usando tre equazioni differenziali che rappresentano le equazioni che descrivono il modello termico ed elettrico a cui viene fatto riferimento, oltre a questi modelli vi è un modello elettrochimico a completare il set di equazioni per determinare tutti i parametri necessari per la simulazione. La procedura logica per la soluzione del problema studiato è rappresentata come segue.



Figura 25- Work flow logico simulazione

Dai parametri estratti dal modello circuitale equivalente, si può calcolare un modello elettrico che in output restituisce una potenza termica generata durante la scarica e che sarà necessaria per calcolare poi l'andamento termico della batteria.

# 2.1 Modello termico

Per il modello termico l'equazione (1) descrive a pieno il comportamento dei fenomeni di creazione, dissipazione e diffusione del calore come:

$$\frac{\partial \rho C_P T}{\sigma t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \sigma_+ |\nabla \phi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \phi_-|^2 + \dot{q}_{ECh} + \dot{q}_{short}$$
(1)

In cui:

- Cp è il calore specifico (J/KgK)
- K è la conduttività termica (W/K)
- Q<sub>ech</sub> è il calore di reazione elettrochimica dovuto a reazioni elettrochimiche che intervengono nei normali processi di carica e scarica
- o Q<sub>short</sub> è il calore generato dovuto a corto circuito interno alla cella
- Sigma± sono le effettive conduttività elettriche degli elettrodi positivi e negativi
- $\circ \nabla \varphi_{\pm}$  sono i potenziali di fase degli elettrodi

#### 2.2 Modello elettrico

Per quanto riguarda il modello elettrico, è risolto utilizzando le equazioni (2) e (3):

$$\nabla \cdot (\sigma_{+} \nabla \varphi_{+}) = -(j_{ECh} - j_{short}) (2)$$
$$\nabla \cdot (\sigma_{-} \nabla \varphi_{-}) = +(j_{ECh} - j_{short}) (3)$$

- $\circ$  J<sub>ech</sub> è la quantità di corrente trasferita volumetrica dovuto a reazione elettrochimiche che intervengono nei processi di carica e scarica
- o J<sub>short</sub> è la quantità di corrente trasferita dovuta a corto circuiti interni alla batteria

## 2.3 Modello elettro-chimico

Questi modelli, abbondanti nella letteratura moderna, forniscono i mezzi per andare a determinare tutti i parametri da utilizzare durante la simulazione. Come già detto, all'interno di una batteria durante il funzionamento, avvengono fenomeni chimici, come lo scambio di ioni volto alla generazione della corrente all'utilizzatore ad esempio, fenomeni elettrici come il passaggio di corrente e fenomeni termici quali il riscaldamento interno per effetto joule, ad esempio.
Tra i vari modelli disponibili, in particolare, Fluent dà la possibilità di scelta tra tre modelli elettro-chimici:

- Ntgk model: Questo modello prende il nome dai suoi sviluppatori, Newman, Tiedemann, Gu e Kim. Questo è un modello elettrochimico semi-empirico, la cui risoluzione passa per lo studio di parametri che sono funzione della profondità di scarica (DoD).
- Ecm model: Modello circuitale equivalente, il comportamento elettrico della batteria è simulato da un circuito elettrico, da cui si possono estrarre tutte le grandezze di interesse per risolvere il problema, in particolare ansys Fluent adotta un circuito di Thevenin a sei parametri.
- P2d model: è un modello fisico basato sull'utilizzo di un elettrodo poroso e teorie sulle soluzioni concentrate. Questo modello può descrivere in maniera precisa il fenomeno di migrazione degli ioni.
- In eventualità si può caricare manualmente anche un modello elettrico personalizzato.

Il modello più utilizzato ed anche scelto per le simulazioni di questo lavoro è il modello circuitale equivalente (ecm). La scelta è ricaduta infatti su un modello dalla facile applicazione, e dai risultati quasi sempre coincidenti con i modelli molto più pesanti e complessi, in particolare il modello circuitale equivalente più performante è quello con due RC in parallelo. Il vantaggio di questo modello sta nella maggiore semplicità risolutiva rispetto agli altri proposti. Lo studio del modello avviene con la risoluzione di un modello circuitale equivalente.



Figura 26- Circuito di Thevenin a sei parametri

Per comprendere la funzione dei parametri costituenti il modello, bisogna prima specificare le tre tipologie di polarizzazione del modello:

- 1. La polarizzazione Ohmica
- 2. La polarizzazione Elettrochimica
- 3. La polarizzazione per concentrazione

La prima può essere rappresentata dall'equazione  $V = IR_s$  dove V è il potenziale ohmico di polarizzazione, I è la corrente ed R è la resistenza Ohmica della batteria.

R1C1 ed R2C2 invece rappresentano i contributi della polarizzazione elettrochimica e per concentrazione rispettivamente. Infine,  $V_{ocv}$  è la tensione a circuito aperto e V è la tensione ai capi dei terminali. Non viene invece considerato il fenomeno di auto-scarica. Il motivo principale è perché se comparata alla corrente del circuito, la corrente di auto-scarica è troppo piccola per avere un effettivo impatto nella soluzione del circuito [22].

Il modello utilizzato per la risoluzione su Fluent è un modello di Thevenin a sei parametri. In cui per ottenere la relazione tra corrente e tensione bisogna risolvere le equazioni:

$$V(t) = V_{OCV}(SOC) + V_1 + V_2 - R_s(SOC)I(t)$$
  
$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{1}{R_1(SOC)C_1(SOC)}V_1 - \frac{1}{C_1(SOC)}I(t)$$

32

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{1}{R_2(SOC)C_2(SOC)}V_2 - \frac{1}{C_2(SOC)}I(t)$$
$$\frac{d(SOC)}{dt} = \frac{I(t)}{3600Q_{Ah}}$$

I parametri richiesti per risolvere queste equazioni posso essere espressi in due forme, la prima, determinata da CHEN [23]

$$R_{s} = a_{0} \exp[a_{1}(SOC)] + a_{2}$$

$$R_{1} = b_{0} \exp[b_{1}(SOC)] + b_{2}$$

$$C_{1} = c_{0} \exp[c_{1}(SOC)] + c_{2}$$

$$R_{2} = d_{0} \exp[d_{1}(SOC)] + d_{2}$$

$$C_{2} = e_{0} \exp[e_{1}(SOC)] + e_{2}$$

$$V_{OCV} = f_{0} \exp[f_{1}(SOC)] + f_{2}$$

La seconda determinata da una polinomiale di quinto ordine, con parametri determinati empiricamente e validati dall'andamento delle simulazioni:

$$\begin{split} R_{s} &= a_{0} + a_{1}(SOC)^{1} + a_{2}(SOC)^{2} + a_{3}(SOC)^{3} + a_{4}(SOC)^{4} + a_{5}(SOC)^{5} \\ R_{1} &= b_{0} + b_{1}(SOC)^{1} + b_{2}(SOC)^{2} + b_{3}(SOC)^{3} + b_{4}(SOC)^{4} + b_{5}(SOC)^{5} \\ R_{2} &= c_{0} + c_{1}(SOC)^{1} + c_{2}(SOC)^{2} + c_{3}(SOC)^{3} + c_{4}(SOC)^{4} + c_{5}(SOC)^{5} \\ C_{1} &= d_{0} + d_{1}(SOC)^{1} + d_{2}(SOC)^{2} + d_{3}(SOC)^{3} + d_{4}(SOC)^{4} + d_{5}(SOC)^{5} \\ C_{2} &= e_{0} + e_{1}(SOC)^{1} + e_{2}(SOC)^{2} + e_{3}(SOC)^{3} + e_{4}(SOC)^{4} + e_{5}(SOC)^{5} \\ V_{OCV} &= f_{0} + f_{1}(SOC)^{1} + f_{2}(SOC)^{2} + f_{3}(SOC)^{3} + f_{4}(SOC)^{4} + f_{5}(SOC)^{5} \end{split}$$

Per risolvere le equazioni che regolano il modello MSMD bisogna poi calcolare:

$$j_{ECh} = \frac{I}{Vol}$$

$$\dot{q}_{ECh} = \frac{I}{Vol} (V_{OCV} - (\varphi_+ - \varphi_-) - T \frac{dU}{dT})$$

Una volta considerati i fenomeni termici ed elettrici interni alla cella ed applicati e studiati grazie al modello circuitale equivalente, è possibile utilizzare al meglio il tool Fluent di Ansys Workbench, con le corrette impostazioni per eseguire le simulazioni delle scariche.

# 3. MODELLAZIONE E SIMULAZIONE DI UN MODELLO PRISMATICO

Il primo passo necessario per simulare il comportamento di una batteria durante una scarica è la creazione di un modello geometrico tridimensionale da utilizzare come riferimento virtuale per le simulazioni.

La batteria utilizzata nei test in laboratorio è una batteria prismatica al Litio Ferro Fosfato (LiFePO4) a cui si è fatto riferimento per le dimensioni e la creazione del modello.

La modellazione considera la zona costituita da anodi e catodi arrotolati su sé stessi come un unico continuo geometrico caratterizzato da proprietà medie. Per questo la realizzazione del modello è risultata più semplice di un modello di batteria accurato in ogni dettaglio.

Le parti costituenti la batteria in esame sono:

- 1. Case esterno
- 2. Collettori
- 3. Strato d'aria
- 4. Separatori cartacei
- 5. Parte attiva elettricamente e termicamente

La forma del modello completo è presentata nelle immagini con diverse viste volte a fornire una visione completa della struttura della batteria.





## 3.1 Case esterno

Il case esterno fatto in alluminio serve a proteggere da urti la parte interna, rendendo più sicuro il suo funzionamento in determinati ambienti dinamici.

presenta la seguente geometria





Figura 28- Dimensioni case esterno

# 3.2 Collettori

I collettori sono l'elemento di collegamento della batteria dalla parte attiva agli utilizzatori esterni, sono il punto dove attaccandovisi, si crea il passaggio degli elettroni e dove è possibile quindi ricavare l'elettricità generata internamente alla batteria.



Figura 29- Dimensioni collettori

# 3.3 Strato d'aria

Lo strato d'aria è collocato tra parte attiva e case esterno per prevenire il contatto tra le parti ed evitare la generazione di corto circuito.







# **3.4 SEPARATORI CARTACEI**

Tra la base, la parte superiore della parte attiva ed il case sono posti dei foglietti di carta spessi 1mm per evitare contatto e conseguente cortocircuito.





# 3.5 Parte attiva

È il luogo di generazione di calore e dove avvengono i fenomeni elettrici di passaggio e scambio di ioni



Figura 32- Dimensioni parte attiva

## 3.6 Generazione Mesh

Una volta creato il modello geometrico simile al modello reale, il passo successivo per poter studiare i fenomeni che avvengono durante la scarica anche tramite simulazioni FEM è la creazione di una Mesh.

Si va a discretizzare il corpo, con una finezza proporzionale al grado di precisione che si vuole ottenere, oltre che alla complessità del modello studiato.

Il modello di batteria analizzato mostra una semplicità geometrica che ha favorito la creazione di una mesh molto regolare e semplice senza grandi distorsioni. Si è andato a modificare semplicemente il parametro di finezza mesh cambiandolo da un valore di default di 9e-3 m a 4e-3 m. Il tipo di elementi utilizzato per la creazione della mesh è un elemento quadratico tridimensionale che ha permesso, grazie alla tridimensionalità, di poter studiare ed analizzare le grandezze di interesse della simulazione, non solo sulle superfici esterne delle parti della batteria, ma anche interne, in modo da visualizzare ed ottenere informazioni anche su ciò che accade realmente dentro la batteria durante i processi di carica e scarica

All'interno dell'ambiente di creazione mesh, si sono modificate anche delle proprietà del corpo in modo da poter effettuare correttamente la simulazione CFD.

Si è impostato il tipo di corpo manualmente andando a selezionare per tutte le parti solido, anziché lasciare l'impostazione default "*Defined By Geometry*". Unica eccezione fatta per lo strato d'aria a cui è stata assegnata la proprietà di fluido.

Si sono create inoltre delle "named selections" raggruppamenti di più corpi a cui assegnare un nome da far riconoscere al programma per le analisi fluidodinamiche.

Si vanno a selezionare le varie body parts e si nominano con i nomi costituenti le parti della batteria, per la precisione si andranno a creare:

• Case\_zone per il case.

- Tabn\_zone per il collettore negativo.
- Tabp\_zone per il collettore positivo.
- E\_zone per la zona di materiale attivo.
- o Air.
- Separator che racchiude entrambi i foglietti separatori di carta.

In automatico Fluent, andrà poi a creare per le zone esterne a contatto con l'aria la corrispettiva zona "*wall*" a cui sarà possibile conferire le condizioni al contorno.

Va fatta un'eccezione per la parte attiva E\_zone in quanto interna, ma che richiede comunque l'utilizzo di una condizione al contorno e per questo bisognerà selezionare manualmente le facce della zona attiva e creare per queste l'ulteriore named selection wall-e zone.



Figura 33- esempio creazione di una named selection

Il risultato finale della mesh è riportato nelle successive immagini in cui si può notare una distorsione degli elementi minima ed una semplicità geometrica che ha reso possibile questo risultato.



Figura 34- Risultato Mesh realizzata

# 3.7 Analisi CFD

#### 3.7.1 Definizione parametri modello msmd.

Selezionando Setup si aprirà l'ambiente di lavoro Fluent del pacchetto ANSYS.

Anzitutto sarà richiesto di verificare la mesh per valutare eventuali errori e discontinuità e impostare la tipologia di simulazione che andremo a fare, nel nostro caso transitoria.

È possibile caricare il modello risolutivo della batteria su Ansys Fluent per poi poter eseguire un'analisi CFD della batteria per i fenomeni termici. Il comando define/models/addon-module permetterà di scegliere il modulo MSMD per impostare le proprietà e le parti della batteria.

Automaticamente viene visualizzata la finestra di impostazione dei parametri per il modello MSMD.

In *Model Options* possiamo modificare le proprietà della batteria che si vuole studiare, e il modello elettro-chimico con cui studiarla. Impostare quindi il modello circuitale equivalente. Cambiare la Capacità nominale dai 14.6Ah di default al valore della batteria in esame, che è stato ricavato in maniera esatta dai test in laboratorio e calcolato con un semplice script su Matlab pari a 25.3 Ah. Mantenere il C-rate pari ad 1.

In *Model Parameters* possiamo modificare i coefficienti polinomiali dell'equazione che stiamo usando. Di default Fluent propone dei parametri per l'equazione scelta. Inoltre, qui c'è la possibilità di modificare lo stato di carica iniziale e la capacità di riferimento. Spuntare la casella Using polynomials ed inserire i parametri relativi alla batteria utilizzata.

I parametri utilizzati sono stati ricavati dalla prova HPPC condotta in laboratorio ed esposta nel capitolo 4.

Parametri	00	01	02	03	04	05
Rs	0.0108	-0.0494	0.1973	-0.4241	0.4313	-0.1628
R1	0.0014	-0.055	0.0046	0.0124	-0.0245	0.0118
R2	0.0012	0.0047	-0.0495	0.1461	-0.1737	0.0727
C1	4076.9	-54288	467760	-1186200	1363300	-580040
C2	2191700	-3.56e07	2.286e08	-5.59e08	5.922e08	-2.2749e08
Voc	3.043	2.4901	-10.964	23.8251	-24.3231	9.3628

Tabella 1- Parametri del modello circuitale equivalente in forma polinomiale scarica 1C

In conductive zones bisognerà far riconoscere al programma le zone della batteria che concorrono ai fenomeni di scarica e scambio di elettroni. Compariranno in tre elenchi le zone rinominate con le named selections precedentemente. Sotto active components selezionare *e\_zone*, sotto tab components selezionare *tabn\_zone e tabp\_zone*. Busbar components serve per definire gli elementi di collegamento per configurazioni di più batterie in serie e parallelo, che nel nostro esempio non sono presenti. In electric contacts bisogna specificare la superficie corrispondente al tab negativo e quella al tab

positivo, selezionando nell' elenco sotto negative tab *wall-tabn\_zone* e nell'elenco sotto positive tab *wall-tabp\_zone*.

## 3.7.2 Identificazione ed assegnazione materiali

Impostate le informazioni per il modello MSMD, bisogna creare o aggiungere dal database di fluent le proprietà dei materiali da dare alle parti della batteria.

In particolare, in questo modello si ha:

- Cella di parte attiva
- Case di alluminio
- Separatori di carta
- Collettori in rame
- Strato d'aria

Una volta creati i materiali, si potranno assegnare alle parti del nostro modello. Tutti i materiali costituenti la batteria, fatta eccezione per la parte attiva sono costituiti da materiali noti e selezionabili direttamente dal database dei materiali disponibile su Fluent.

Dal database di materiali a disposizione di Fluent si potrà selezionare e caricare sul programma:

- Carta per i separatori, in questo caso selezionare Wood per le proprietà di riferimento.
- Rame per i collettori.
- Alluminio per il case.

Per quanto riguarda i collettori in rame, essendo materiale attivo nei processi di carica e scarica, bisognerà modificare il valore della diffusività dal valore standard per far riconoscere al programma la loro funzione nel corpo della batteria. Per fare ciò, bisogna variare il valore di diffusività andando a selezionare dal menu a tendina di UDS diffusivity la voce *user-defined* e cliccare su *"battery\_e\_cond:msmdbatt"*. Questo parametro viene inserito tra le diffusività solo dopo aver caricato l'add-on per il modello di batteria MSMD presentato precedentemente.

Riepilogando i valori richiesti saranno:

Materiale	Densità	Calore	Conduttività	Diffusività [kg/m*s]	Conduttività
	[kg/m <sup>3</sup> ]	specifico	termica		elettrica
		[J/kg*K]	[W/m*K]		[siemens/m]
Alluminio	2719	871	202.4	/	3.541e7
(Al)					
Rame (Cu)	8978	381	387.6	battery_e_cond:msmdbatt	1e7
Wood	700	2310	0.173	/	1000000

Tabella 2- Valori materiali database Ansys Fluent

Un discorso a parte va fatto per la parte attiva. Come già detto il modello di calcolo MSMD, considera la zona formata da catodo, anodo, separatore e collettori come un unico corpo caratterizzato da proprietà medie. Una media pesata in base alle quantità e l'apporto all'interno del processo di moto degli ioni della batteria.

Per fare questo bisogna definire uno schema dei materiali interno alla cella.

La cella di parte attiva, quindi, può così essere schematizzata



Figura 35- Semplificazione struttura interna parte attiva [28]

Le proprietà dei materiali sono state riprese dai lavori di kim [24] [25] e qui riportate:

Zone	P <sub>c</sub>	P <sub>e</sub>	S	N <sub>e</sub>	N <sub>c</sub>	Total
$\delta$ [um]	20	150	12	145	10	322
$ ho$ [kg/m $^3$ ]	2700	1500	1200	2500	8960	2092
C <sub>p</sub> [J/kg-K]	900	700	700	700	385	678
<i>K</i> [W/m-K]	238	5	1	5	398	18.2
$\sigma$ [s/m]	3.83e7	13.9		100	6.33e7	$\sigma_p = 1.19e6$
						$\sigma_n = 9.83e5$

Figura 36- proprietà materiali costituenti parte attiva [28]

Le formule delle medie per calcolare i valori da assegnare alla parte attiva sono state per densità, capacità termica e conducibilità:

$$x_{eff} = \frac{0.5x_c^p \delta_c^p + x_e^p \delta_e^p + x_s \delta_s + x_e^n \delta_e^n + 0.5x_c^n \delta_c^n}{\delta_{total}}$$

Con

$$\delta_{total} = 0.5\delta_c^p + \delta_e^p + \delta_s + \delta_e^n + \delta_c^n$$

I pedici c, e ed s stanno ad indicare rispettivamente le zone dei collettori, degli elettrodi e del separatore, invece gli apici p ed n stanno ad indicare i poli positivi e negativi. Calcolo diverso va fatto invece per la conduttività elettrica  $\sigma$  in cui non viene fatta una semplice media, ma si ottengono i valori esatti in base alle proporzioni in esame.

$$\sigma_p = \frac{0.5\sigma_c^p + \sigma_e^p}{\delta_{total}}$$
,  $\sigma_n = \frac{0.5\sigma_c^n + \sigma_e^n}{\delta_{total}}$ 

Da queste formule si sono calcolati i parametri da utilizzare per le proprietà termiche ed elettriche della zona attiva come riportato in tabella.

Materiale	Densità	Calore	Conduttività	Diffusività [kg/m*s]	Conduttività
	[kg/m <sup>3</sup> ]	specifico	termica		elettrica
		[J/kg*K]	[W/m*K]		[siemens/m]
E-material	2092	678	18.2	/	1e7

Tabella 3- Proprietà termiche parte attiva

Si noti che per quanto riguarda la diffusività, su edit si sono andati a variare i due valori di diffusività portati pari a 1.19e6 e 9.83e5 rispettivamente.

Lo step successivo è stato poi assegnare alle varie parti i materiali appena creati e scelti. In cell zone conditions si è andato ad assegnare ad ogni parte il relativo materiale.

## 3.7.3 Condizioni al contorno

Una volta impostate tutte le proprietà elettrochimiche ed i materiali, bisogna solamente determinare ed assegnare il comportamento da un punto di vista termico della batteria. È necessario impostare per ogni elemento wall creato dall'utente i giusti valori di

dissipazione del calore e temperatura iniziale. Calore che viene a crearsi principalmente per effetto Joule e che non viene trattenuto interamente nella batteria, nelle simulazioni come nella realtà, grazie alle proprietà dei materiali costituenti le varie parti della batteria di conduzione e convezione.

Le prove non sono state condotte in un ambiente a temperatura controllata, per questo, a seguito di ogni simulazione in laboratorio, dopo aver analizzato i dati e soprattutto la temperatura iniziale della batteria si procede con l'assegnazione delle condizioni al contorno.

In questo punto della simulazione è fondamentale avere già i risultati degli esperimenti. Questo perché è importante avere la precisa temperatura dell'ambiente e per poi poter calibrare sugli esperimenti i valori del flusso di calore convettivo h in modo da ottenere lo stesso andamento delle curve di riscaldamento tra simulazione e esperimento.

💌 Wall									×	
Zone Name										
wall-case_zone										
Adjacent Cell Zo	ne									
case_zone										
Momentum	Thermal	Radiation	Species	DPM	Multiphase	UDS	Wall Film	Potential	Structure	
Thermal Cond	itions									
O Heat Fl	ux	Н	Heat Transfer Coefficient (w/m2-k) 35							
<ul> <li>Temperature</li> <li>Convection</li> </ul>		Free Stream Temperature (k) 301								
🔵 Radiati	on	Wall Thickness (m) 0 Heat Generation Rate (w/m3) 0								
<ul> <li>Mixed</li> <li>via System</li> </ul>	tem Coupling									
🔘 via Mapped Interface						Shell Condu	iction 1 Layer		Edit	
Material Nan	ne									
aluminum		▼ Edit								
				OK Can	cel Help					

Figura 37- Esempio valori condizioni al contorno

I risultati ottenuti e mostrati in figura, per la zona in particolare così come in tutte le altre dipendono dai risultati sperimentali di una scarica 1C. la Temperatura di flusso libero è la temperatura a cui il corpo scambia il calore, cioè quella della stanza dove si è condotta la prova. Diverse prove, tutte valide hanno portato rilevamenti di temperature iniziali differenti, per questo per ogni test effettuato si è andato a modificare questo parametro. Valore finale scelto, corrispondente all'ultima prova fatta è di 301 °K.

Discorso differente va' fatto per il coefficiente di trasferimento convettivo del calore, espresso in W/m<sup>2</sup>K. Si è partiti da un valore di riferimento di 5 W/m<sup>2</sup>K, e con il metodo *iterativo* si andava a correggere questo parametro fino ad ottenere una corrispondenza tra i test. Il valore finale valido per ogni test è stato assegnato pari a 35 W/m<sup>2</sup>K.

## 3.7.4 Impostazioni e simulazione

In Inizialization si impostano le condizioni iniziali del problema e si salvano le preferenze prima di avviare la simulazione. Unico parametro da modificare è la temperatura iniziale pari a quella degli esperimenti, nel caso in esame 301 K.

Dopo aver Cliccato su Initialize, su Run Calculation si può impostare la lunghezza della simulazione.

Volendo simulare una scarica completa a 1C la durata che si vuole avere di simulazione per ottenere la scarica completa sarà di 1 ora esatta. Per questo si è scelto di impostare 120 time steps da 30s per acquisire i dati in un'ora di scarica.

## 3.7.5 Risultati

Finita la simulazione a schermo si ottengono i report impostati. L'andamento dell'errore energetico relativo delle parti impostate come collettori e parte attiva risulta minimo, e si ha una prima indicazione della bontà della simulazione e della realizzazione della mesh, con valori medi dell'ordine di grandezza di 1e-6:



Figura 38- Andamento errore energetico relativo durante simulazione

L'andamento della tensione risulta coerente con la teoria [27]. Con un tratto centrale quasi costante e un decadimento repentino nelle fasi iniziali e finali della scarica.



Figura 39-andamento tensione

La temperatura avrà un massimo all'interno del case, che fa da vero e proprio scambiatore di calore e dove quindi ci sarà una temperatura minore.

Un massimo di circa 312 °K generale nella batteria diventa invece di circa 307 °K nel punto della misurazione effettuata con una termoresistenza durante le prove di laboratorio, nel centro del case esterno.



Figura 40-andamento temperatura massima



Figura 41-andamento temperatura su case esterno

#### 3.7.6 Analisi Post Processing

Finita la simulazione si può andare più nel dettaglio ad analizzare l'andamento dei valori di interesse nella batteria nella sezione Contour.

In results si possono visualizzare risultati ottenuti dalla simulazione. Contour permette di creare delle immagini con i flussi e le variazioni dei parametri di interesse.

Con i parametri della polinomiale ricavati sperimentalmente si ottiene:

- 1. una temperatura massima di 309.6 °K
- 2. una minima di 305 °K
- 3. Temperatura massima interna di 309.6°K e minima interna di 308°K.

4. Temperatura massima esterna di 306°K e minima di 305°K.



Figura 42- Risultati distribuzione temperature

- 5. Tensione massima durante la scarica di 2.837 V.
- 6. Tensione minima durante la scarica di 2.835 V.



Figura 43-andamento distribuzione tensione



Figura 44-andamento distribuzione del vettore corrente

## 3.8 Studio della temperatura interna alla batteria.

Avendo impostato sul corpo una mesh tridimensionale, non solo la superficie, ma tutto il corpo sarà composto da elementi quadrangolari. Questa caratteristica permette di andare a conoscere, oltre che le temperature superficiali di ogni corpo costituente la batteria, anche le temperature interne alla stessa.

Infatti, nella sezione Contours, in temperature e static temperature, selezionando new surface -> plane si può andare a creare un piano interno alla batteria semplicemente selezionando col mouse 3 punti sulla superficie che, uniti, andranno a creare il piano passante per questi.



Figura 45- Creazione piani interni alla cella

Si sono andati a creare due nuovi piani interni perpendicolari tra loro, per visualizzare la variazione di temperature internamente alla cella. Avere una conoscenza delle temperature interne può essere molto interessante per avere una precisione maggiore nei calcoli fatti e, ad esempio, per mettere in sicurezza le batterie durante il loro funzionamento.





Figura 46- Risultati

Osservando i risultati ottenuti, si può notare una temperatura massima nel centro della cella pari a 310 °K con piccole variazioni verticali, arrivando a dei minimi di 308°K sulla base e in cima alla cella dove si è più lontani dal nucleo di generazione del calore e vicini ai punti di maggiore dissipazione.

## 3.9. SCARICA 2C

Dopo aver simulato una scarica a 1C si è proceduto a ripetere le simulazioni con scariche più potenti per analizzare il comportamento della batteria anche in condizioni di maggiore sforzo.

Una scarica a 2C è una scarica che impiega la metà del tempo e il doppio degli Ampere rispetto ad una scarica normale.

Nel nostro caso, con una batteria con capacità da 25 Ah una scarica 2C impiegherà 30 minuti per scaricare completamente la batteria andando a richiedere alla cella 50 A. Per apportare queste modifiche anche nel progetto su Fluent i parametri da modificare sono tre:

- La C di scarica
- La durata della simulazione
- Il valore di Rs

In particolare, ci si aspetta un valore di Rs simile a quello impostato per la scarica da 1C ma, considerando le temperature maggiori in gioco, una lieve diminuzione globale. Si è preliminarmente impostato il nuovo valore di C di scarica e si è dimezzato il numero di time steps, da 120 a 60, in modo da ottenere una durata della simulazione di 1800 secondi anziché i precedenti 3600 secondi, infatti, ogni time steps ha la durata di 30 secondi proprio come impostato nella prima simulazione. Si è lanciata la simulazione e si è corretto l'andamento della temperatura rispetto a quello ottenuto sperimentalmente andando ad abbassare localmente i valori di Rs ricalcolando i valori da inserire nella polinomiale del modello ECM e rilanciando poi la simulazione.

Quindi, a seguito di svariati tentativi, si è fittato il modello di simulazione con quello reale con il nuovo andamento di Rs.

Parametri	00	01	02	03	04	05
Rs	0.0092	-0.0402	0.1517	-0.2933	0.2678	-0.0923
R1	0.0014	-0.055	0.0046	0.0124	-0.0245	0.0118
R2	0.0012	0.0047	-0.0495	0.1461	-0.1737	0.0727
C1	4076.9	-54288	467760	-1186200	1363300	-580040
C2	2191700	-3.56e07	2.286e08	-5.59e08	5.922e08	-
						2.2749e08
Voc	3.043	2.4901	-10.964	23.8251	-24.3231	9.3628

I nuovi valori quindi da inserire nella schermata del modello MSMD sono:

 $Tabella \ 4- parametri \ modello \ circuitale \ equivalente \ scarica \ 2C$ 

I risultati ottenuti per questa simulazione sono:

- 1. Andamento della tensione simile sul collettore positivo in quanto non sono variati i valori della tensione a circuito aperto.
- 2. Temperatura massima di 325°K
- 3. Temperatura minima di 310°K
- 4. Temperatura massima interna di 325°K e minima interna di 320°K.
- 5. Temperatura massima esterna di 315°K e minima di 311°K.



Figura 47-andamento tensione scarica 2C



Figura 48-andamento temperatura massima scarica 2C



Figura 49-andamento temperatura sul case esterno scarica 2C





Figura 50- Risultati distribuzione temperature scarica 2C





Figura 51- and amento temperature interne alla cella scarica  $2{\rm C}$ 

## 3.10. SCARICA 3C

Le stesse modifiche fatte per simulare una scarica a 2C sono state apportate per la scarica a 3C.

Il numero di time steps è stato ridotto da 60 a 40 in modo da ottenere una durata della scarica simulata di 40 time steps da 30 secondi, cioè 1200 esattamente 3 volte in meno della durata di una scarica da 1C, e si è fittato l'andamento di Rs con lo stesso criterio fatto per la scarica a 2C, fino ad ottenere un risultato di temperatura sul case esterno simile tra prove sperimentali e simulazioni.

In particolare, i parametri della polinomiale da inserire nel modello circuitale equivalente sono gli stessi delle scariche precedenti eccezion fatta per l'andamento di Rs.

Parametri	00	01	02	03	04	05
Rs	0.0039	0.0012	-0.00065	-0.0209	0.0374	-0.0179
R1	0.0014	-0.055	0.0046	0.0124	-0.0245	0.0118
R2	0.0012	0.0047	-0.0495	0.1461	-0.1737	0.0727
C1	4076.9	-54288	467760	-	1363300	-580040
				1186200		
C2	2191700	-3.56e07	2.286e08	-5.59e08	5.922e08	-2.2749e08
Voc	3.043	2.4901	-10.964	23.8251	-24.3231	9.3628

Tabella 5- parametri modello circuitale equivalente scarica 3C

I risultati ottenuti per questa simulazione sono:

- 1. Andamento della tensione simile sul collettore positivo in quanto non sono variati i valori della tensione a circuito aperto.
- 2. Temperatura massima di 334°K
- 3. Temperatura minima di 315°K
- 4. Temperatura massima interna di 334°K e minima interna di 327°K.

## 5. Temperatura massima esterna di 320°K e minima di 315°K.



Figura 52- andamento tensione scarica 3C



Figura 53-andamento temperatura massima scarica 3C



Figura 54-andamento temperatura su case esterno scarica 3C




Figura 55- Risultati distribuzione temperature scarica 3C

La distribuzione interna delle temperature mostra un andamento praticamente uguale a quello delle simulazioni precedenti con temperature spostate verso l'alto





Figura 56- Risultati andamento temperature interne alla cella scarica 3C

# 3.11. Report risultati cella prismatica

SCARICA	ΔT MISURATO	ΔΤ SIMULATO	ERRORE
			PERCENTUALE
1C	3.95°C	3.68°C	6.8%
<b>2</b> C	9.42°C	9.65°C	2.4%
<b>3</b> C	14.28°C	14.01°C	1.89%

Tabella 6- Riepilogo risultati temperature batteria prismatica

# 4. Modellazione e simulazione di un modello Pouch

Ulteriori analisi termo fluidodinamiche agli elementi finiti sono state condotte su un modello Pouch, con l'obbiettivo di andare a confrontare sperimentalmente le temperature come fatto nel capitolo precedente con la prismatica.

# 4.1. Modello Geometrico

Il modello geometrico realizzato è stato creato come indicato nella seguente immagine, in possesso del laboratorio in cui si sono effettuati I test. Con uno spessore di 10 mm.



Figura 57- Geometria modello Pouch

# 4.2. Generazione Mesh

Come già impostato per la cella prismatica, per la realizzazione di una buona Mesh e le condizioni necessarie per poter rendere utilizzabile questo pezzo così creato poi in ambiente Fluent, si sono svolti gli stessi passaggi indicati precedentemente, ovvero:

- Impostazione named selections.
- Selezione di tutti i corpi costituenti la cella come "solid".
- Cambio di finezza mesh da 9e-3 m a 4e-3m.

Come risultato finale si è ottenuto il risultato mostrato in figura, come ci si poteva aspettare, data la semplicità geometrica, con elementi molto poco distorti e regolari.





Figura 58- risultato Mesh modello Pouch

# 4.3. Analisi CFD

### 4.3.1. Definizione parametri modello MSMD

Gli step per le simulazioni effettuate sulla cella Pouch sono gli stessi effettuati sulla cella prismatica, quindi si eviterà di fornire le stesse informazioni in forma di tutorial in quanto già fornite nel capitolo precedente, ci si concentrerà sulle piccole differenze che accomunano questi due tipi di simulazioni e soprattutto, i risultati ottenuti.

Nella finestra di impostazione del modello MSMD, le differenze risiedono principalmente nella variazione della capacità della cella, come indicato dalla casa produttrice è pari a 6Ah, anziché i 25Ah disponibili dalla prismatica, con solo tre parti costituenti la batteria e quindi anche le zone elettricamente attive:

- E-zone.
- Collettore positivo.
- Collettore negativo.

Esattamente come fatto per la batteria prismatica si sono estratti i valori dei parametri del modello circuitale equivalenti ed inseriti come parametri sotto forma di polinomiale, partendo dai risultati sperimentali effettuati con un test HPPC sulla cella Pouch.

Parametri	00	01	02	03	04	05
Rs	0.0163	-0.03	0.0678	-0.0905	0.0598	-0.0154
R1	0.000711	-0.0029	0.0102	-0.0129	0.0074	-0.0021
R2	0.0043	-0.0203	0.0705	-0.1393	0.1456	-0.059
C1	200.99e4	-1.32e7	3.397e7	-3.06e7	-2391.4e3	1.073e7
C2	4.184e7	6.388e8	-5.27e9	1.459e10	-1.66e10	6.609e9
Voc	3.3502	1.8189	-4.9698	7.0312	-3.4464	0.359

Tabella 7- parametri modello circuitale equivalente scarica 1C Pouch

#### 4.3.2 Identificazione ed assegnazione materiali

In questa configurazione solo due materiali sono i componenti della batteria e sono rispettivamente:

- Parte attiva per il corpo centrale.
- Rame per I collettori.

Questi valori sono gli stessi utilizzati per la simulazione precedente ed indicati nel capitolo 3.

### 4.3.3. Condizioni al contorno

Per quanto riguarda l'implementazione dei giusti valori di condizioni al contorno va fatto un ragionamento simile a quanto effettuato per la simulazione della batteria prismatica. Infatti, l'aver effettuato le prove senza una camera climatica che controllasse in maniera esatta la temperatura esterna ha portato a delle prove con una temperatura iniziale diversa dai test precedenti, ma fortunatamente omogenea tra le varie simulazioni effettuate, ovvero sia per le simulazioni ad 1, 3 e 5C la temperatura è stata rilevata sempre di 25°C e così sempre impostata come valore di temperatura di flusso libero, cioè la temperatura a cui scambiava calore la cella durante le scariche.

Inoltre, è stato definito il parametro h, di flusso di scambio convettivo, con il metodo *iterativo* in cui a seguito di vari test e simulazioni si è utilizzato il valore di 1W/m^2\*K. Questi valori sono stati impostati per tutte le parti costituenti la cella Pouch.

📧 Wall									$\times$
Zone Name									
wall-collettore_r	ı								
Adjacent Cell Zor	ne								
collettore_n									
Momentum	Thermal	Radiation	Species	DPM	Multiphase	UDS	Wall Film	Potential	Structure
Thermal Condi	itions								
🔵 Heat Fl	ux	Н	eat Transfer Co	oefficient (w/m	12-k) 1				-
Tempe	rature		Eroo Stroay	n Tomporatur					
Convection	tion		Free Stream	ii remperaturi	298				•
🔵 Radiatio	on		١	Wall Thickness	(m) 0				-
Mixed				Non Data (m	(				
🔵 via Sys	tem Coupling		Heat Gener	ation Rate (W/	0				•
🔵 via Map	oped Interface					Shell Condu	ction 1 Layer		Edit
Material Nam	пе								
aluminum		▼ Edit							
				OK Can	cel Help				

Figura 59- Configurazione corretta condizioni al contorno

#### 4.3.5. Risultati



Figura 60- andamento errore energetico relativo simulazione scarica 1C Pouch



Figura 61- Andamento temperatura massima scarica 1C Pouch



Figura 62- Andamento tensione di scarica 1C Pouch

### 4.3.6. Analisi Post

Una volta finita la simulazione della scarica a 1C, 6A di corrente richiesti per un'ora, i risultati mostrano:

- 1. una temperatura massima di 301 °K.
- 2. una minima di 300 °K.
- 3. Temperatura massima interna di 301°K e minima interna di 300°K.
- 4. Temperatura massima esterna di 300°K e minima di 300°K.
- 5. Delta di temperatura tra inizio e fine scarica di 3°K.



Figura 63- Distribuzione variazione di temperatura scarica 1C Pouch

Come si può vedere nelle immagini dei risultati, la distribuzione della temperatura alla fine della scarica sulla cella non mostra un riscaldamento omogeneo. Infatti, tra zona superiore e base della cella c'è un gradiente, come riportato dalle immagini, pari a 1°C. Questa differenza di temperatura nel report finale, non la si spiega con una diversa generazione di calore lungo la cella, ma al contrario, con una sua diversa asportazione. Infatti, il corpo superiore è a contatto con i due collettori di rame, un materiale che diversamente dalla parte attiva conduce molto facilmente il calore. Inoltre, le dimensioni dei collettori rispetto alla dimensione della cella sono simili, al contrario della simulazione della cella prismatica in cui i collettori sono molto piccoli rispetto alle dimensioni della parte attiva. Per questo i collettori fungono da scambiatore di calore, favorendo l'asportazione di calore nella zona superiore e creando questo gradiente mostrato dalle immagini. Questo risultato risulta coerente andando a considerare anche la minima differenza di temperatura osservata sul corpo, 1°K per una scarica di 1C.





Figura 64-Distribuzione tensione durante scarica 1C Pouch

### 4.3.7. Studio della temperatura interna alla batteria

Con la funzione New surface-> Plane-> select points si sono creati due piani perpendicolari interni alla cella dove si sono andate a verificare le temperature interne alla batteria.





Figura 65- risultati temperatura interna scarica 1C Pouch

### 4.4. Scarica 3C

Dopo aver condotto una scarica completa a 6 Ampere per un'ora, si è passati a verificare l'evoluzione delle temperature all'interno della cella Pouch in condizioni di sforzo maggiore, rispettivamente per 3C e 5C cioè a 18A e 30A.

Per la scarica a 3C gli unici parametri cambiati durante simulazione sono stati:

- la durata, pari ad un terzo della durata normale, cioè 20 minuti. Si traduce questo dato su Fluent come 40 Time steps da 30s.
- Il valore di C.
- Il valore di Rs.

Come prima anche qui, con l'innalzamento delle temperature ci si aspetterà un valore di Rs diminuito, in particolare, andando a confrontare i risultati sperimentali con quelli ottenuti da simulazioni si è potuto ricavare il giusto valore di Rs da applicare a questa nuova simulazione.

I valori estratti sono

Parametri	00	01	02	03	04	05
Rs	0.0093	0.001	-0.0564	0.1541	-0.1678	0.0641
R1	7.11e-4	-0.0029	0.0102	-0.0129	0.0074	-0.0021
R2	0.0043	-0.0203	0.0705	-0.1393	0.1456	-0.059
C1	2.0099e7	-1.32e7	3.397e7	-3.06e7	-2391400	1.073e7
C2	4.184e7	6.388e8	-5.27e9	1.459e10	-1.66e10	6.609e9
Voc	3.3502	1.8189	-4.9698	7.0312	-3.4464	0.359

Tabella 8- parametri modello circuitale equivalente scarica 2C Pouch

I risultati ottenuti da questa simulazione sono:

- 1. una temperatura massima di 305 °K.
- 2. una minima di 302 °K.
- 3. Temperatura massima interna di 305°K e minima interna di 302°K.
- 4. Temperatura massima esterna di 305°K e minima di 302°K.
- 5. Delta T di temperatura tra inizio e fine simulazione pari a 7°K.



Figura 66- Andamento energia durante scarica 3C Pouch



Figura 67- Andamento temperatura massima scarica 3C Pouch



Figura 68- andamento tensione di scarica 3C Pouch



Figura 69- andamento temperatura su superficie esterna scarica 3C Pouch





Figura 70- Risultati variazione di temperatura interna alla cella scarica 3C



#### 4.5. Scarica 5C

Per impostare la simulazione di una scarica completa a 5C, 30A si è modificato:

- Il valore di C nell'impostazione del modello MSMD.
- Il numero di time steps abbassato fino ad un valore di 24 ognuno da 30s.
- I parametri del modello circuitale equivalente ed in particolare Rs.

Rs, così come nel passaggio da 1 a 3C di scarica, a causa del maggior calore generato subisce una variazione. I test hanno mostrato che la diminuzione di Rs dalla scarica a 3C a questa attuale è molto meno marcata e i valori rimangono quasi costanti. Per questo i nuovi valori della polinomiale del modello circuitale equivalente sono:

Parametri	00	01	02	03	04	05
Rs	0.0095	0.001	-0.0564	0.1541	-0.1678	0.0641
R1	7.11e-4	-0.0029	0.0102	-0.0129	0.0074	-0.0021
R2	0.0043	-0.0203	0.0705	-0.1393	0.1456	-0.059
C1	2.0099e7	-1.32e7	3.397e7	-3.06e7	-2391400	1.073e7
C2	4.184e7	6.388e8	-5.27e9	1.459e10	-1.66e10	6.609e9
Voc	3.3502	1.8189	-4.9698	7.0312	-3.4464	0.359

Tabella 9- parametri modello circuitale equivalente scarica 3C Pouch

I risultati mostrano un aumento della temperatura abbastanza elevato, un delta T di 13°C con una temperatura massimo in tutto il corpo pari a 38°C.



Figura 71- andamento errore energetico relativo durante scarica 5C



Figura 72-andamento temperatura massima scarica 5C



Figura 73-andamento tensione di scarica 5C



Figura 74- Andamento temperatura superficie esterna 5C



Figura 75-andamento temperature internamente alla cella scarica 5C

# 5. Analisi sperimentali e validazione risultati

### 5.1. Strumentazione e setup

Parallelamente alla fase di simulazione su Fluent, si sono condotti dei test sperimentali in laboratorio su batterie prismatiche LiFePO4.

La strumentazione a disposizione per effettuare questi test è composta da:

- EA-EL 9080-400 di Elektro-Automatik. Questa unità ha il compito di regolare e richiedere alla batteria una corrente costante (CC), una tensione costante (CV) oppure una resistenza costante (CR). Utilizzata con la funzione di carico elettrico
- QPX-600DP di Aim TTi, utilizzata con la funzione di power supply
- Modulo di input-output NI PXIe 6363
- Interfaccia grafica NI LabVIEW
- Modulo di misura temperature della batteria composto da termoresistenza [26][6]



Figura 76- Setup strumentazione per esperimenti [26]

La batteria è stata collegata sia al carico elettrico, la cui carica è stata impostata a corrente costante (CC), ed al generatore, impostato come scarica della batteria in tensione costante (CV). Il passaggio da uno strumento all'altro è stato reso possibile grazie al modulo di input output, e al software sviluppato da National Insturments LabVIEW. Tramite questo programma si sono impostati i cicli a cui sottoporre la batteria. Sul corpo esterno della batteria vi è applicata una termoresistenza per la misurazione delle temperature durante cariche e scariche a cui viene sottoposta.

## 5.2. Test HPPC

Prima di procedere alle scariche vere e proprie per confrontare e validare i risultati delle simulazioni, si è dovuto effettuare un test per determinare i parametri da utilizzare nel modello circuitale equivalente per le impostazioni delle simulazioni.

Per fare questo si sono lanciati più test HPPC (hybrid pulsed Power Characterization). Questo test è largamente utilizzato per la determinazione dei parametri del modello ECM.

Il test è composto dalle seguenti fasi:

- Scarica a 50 A per 10 s
- Riposo per 40 s
- Carica a 50 A per 10 s
- Riposo per 40 s
- Scarica a 25 A per 5 minuti
- 50 minuti riposo



Figura 77- Andamento di tensione e corrente per un singolo livello di SOC

A seguito di ognuno di questi cicli la batteria si sarà scaricata del 10% e sarà possibile ricominciare il test, fino ad ottenere una batteria completamente scarica. L'andamento di tensione e corrente durante il test è mostrato in figura.



Figura 78- Andamento Tensione e corrente del test HPPC

Da questo test, si è andato ad estrarre per ogni scarica da 50 A l'inizio, la fine e la fine del transitorio della scarica per calcolarsi poi i parametri del modello circuitale equivalente, e cioè:

- Rs
- Voc
- R1
- R2
- C1
- C2

I cui risultati sono riportati in tabella:

SOC	Rs [ohm]	R1 [ohm]	R2[ohm]	C1[1/ohm]	C2[1/ohm]	Voc [V]
100	0.0033	2.368e-4	0.0015	1.055e4	4.37e5	3.437
90	0.029	1.185e-4	7.035e-4	2.577e4	2.572e6	3.3313
80	0.0030	1.410e-4	7.954e-4	1.567e4	1.433e6	3.3303
70	0.0031	1.652e-4	8.689e-4	1.270e4	1.236e6	3.3292
60	0.0031	2.325e-4	7.300e-4	8.417e4	1.733e6	3.2995
50	0.0032	1.466e-4	7.766e-4	1.520e4	1.706e6	3.2916
40	0.0033	1.000e-4	9.385e-4	1.977e4	1.228e6	3.2897
30	0.0033	2.134e-4	0.0010	9.045e3	9.923e5	3.2807
20	0.0034	3.660e-4	0.0012	5.528e3	6.573e5	3.2468
10	0.0035	3.451e-4	0.0018	6.317e3	2.447e5	3.2067

Tabella 10- Estrazione parametri prismatica da test HPPC

Da questi valori, si sono estratti i sei parametri in forma polinomiale da inserire nel modello circuitale equivalente su ANSYS Fluent per la simulazione delle scariche.

Parametri	00	01	02	03	04	05
Rs	0.0034	0.0031	-0.0253	0.0692	-0.0816	0.0346
R1	0.0014	-0.055	0.0046	0.0124	-0.0245	0.0118
R2	0.0012	0.0047	-0.0495	0.1461	-0.1737	0.0727
C1	4076.9	-54288	467760	-1186200	1363300	-580040
C2	2191700	-3.56e07	2.286e08	-5.59e08	5.922e08	-2.2749e08
Voc	3.043	2.4901	-10.964	23.8251	-24.3231	9.3628

Tabella 11- Primi parametri ottenuti da test HPPC

### 5.3. Validazione dei risultati

### 5.3.1. Scarica 1C

Oltre a questo tipo di test si sono andati ad effettuare tre tipi di scariche sulla batteria, ad 1,2 e 3C rispettivamente, per poter avere un confronto numerico e sperimentale alle simulazioni fatte.

I risultati ottenuti sono mostrati in figura.

Andamento temperatura nel centro del case esterno.



Figura 79- Andamento temperatura sperimentale 1C prismatica

Identificazione stato capacità batteria.



Figura 80- Andamento Capacità 1C prismatica

Andamento tensione in funzione dello stato di carica della batteria.



Figura 81- Andamento tensione 1C prismatica

I primi risultati ottenuti dalle simulazioni hanno permesso l'identificazione del valore di flusso convettivo da utilizzare correttamente come condizioni al contorno nelle simulazioni come indicato nel capitolo tre.

Uniformato l'andamento delle temperature, con la temperatura massima misurata al centro del case concorde con quella calcolata nello stesso punto su ANSYS Fluent il risultato ottenuto è stato:



Figura 82- Validazione preliminare risultati scarica 1C prismatica

Come si può notare, l'andamento del riscaldamento della batteria non è conforme a quello misurato sperimentalmente, in particolare, nel tratto di SOC che va circa dal 30% al1 80% c'è una generazione di calore molto maggiore.

Il lavoro successivo fatto per "fittare" le curve, cioè rendere la simulazione quanto più simile alla misura sperimentale, è stato modificare i parametri che influenzano l'andamento della generazione di calore nel tratto centrale, con il solito metodo di *iterativo*.

La modifica è ricaduta nel solo parametro Rs perché, come confermato dalla teoria, questo è il parametro che influisce nel tratto centrale in quanto Rs rappresenta l'influenza della polarizzazione ohmica. [27]



Figura 83- Andamento teorico della tensione durante scarica e parametri che la influenzano

## A seguito dell'operazione di fitting delle curve seguendo il principio di modifica del solo parametro Rs, i valori identificati come adatti sono stati

SOC%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Rs_1C	0.0075	0.0058	0.0056	0.0050	0.0039	0.0038	00038	0.0037	0.0037	0.0031

Tabella 12- Modifica valori Rs per miglioramento fitting

### A cui corrispondono i valori di Rs da inserire nella polinomiale in Fluent

Parametro	00	01	02	03	04	05
Rs	0.0108	-0.0494	0.1973	-0.4241	0.4313	-0.1628

Tabella 13- Corrispondenti valori di Rs inseriti in Fluent in forma polinomiale

Con questi valori si è ottenuta una buona corrispondenza di risultati tra valori sperimentali e simulazioni su Fluent, con un fitting delle curve finale adeguato.



Figura 84- Fitting scarica 1C prismatica

#### 5.3.2. Scariche 2C e 3C

Nello stesso modo si sono effettuati gli stessi procedimenti di fitting tra le simulazioni a scarica 2C e 3C e i rispettivi risultati ottenuti tramite test.



Figura 85- Andamento temperature scariche 2C e 3C prismatica

Per le simulazioni, per quanto i valori di Rs non dovrebbero essere modificati, bisogna considerare la variazione della resistenza in funzione del tempo e della temperatura. Per questo, con una nuova opera di fitting sui valori di Rs, si sono ricalcolati i parametri da inserire nella polinomiale per ottenere un buon fitting anche con le nuove scariche.



Figura 86- Fitting scarica 2C prismatica



Figura 87- Fitting scarica 3C prismatica

	Rs1	Rs2	Rs3	Rs4	Rs5	Rs6
1C	0.0108	-0.0494	0.1973	-0.4241	0.4313	-0.1628
<b>2</b> C	0.0092	-0.0402	0.1517	-0.2933	0.2678	-0.0923
<b>3</b> C	0.0039	0.0012	-6.5815e-4	-0.0209	0.0374	-0.0179

Questi risultati sono stati ottenuti con una variazione di Rs mostrata in tabella:

Tabella 14- Variazione Rs al variare della corrente di scarica.



Figura 88- Variazione parametro Rs. Con Rs originale ottenuto da test HPPC

La differenza che passa tra l'Rs misurato da test e quello poi utilizzato nelle prove è da spiegare nella metodologia di raccolta dei dati, e poi nel loro utilizzo durante le simulazioni.

Infatti, la Rs originale è ottenuta da un test HPPC e, come spiegato precedentemente, ogni scarica è volta ad abbassare lo stato di carica del 10% della carica totale, ma tra una scarica e l'altra, vi sono lunghe pause e riposi volti a far riorganizzare la chimica interna della batteria. Per questo ogni misura di Rs è come se fosse una misura a batteria carica o comunque non in una situazione di stress. Al contrario nelle scariche effettuate

sulla batteria non vi sono pause, quindi i valori di Rs sono dinamici e influenzati dalle temperature e dalla chimica interna alla cella durante il funzionamento.

Quindi per questo si spiegano quei valori quasi costanti raccolti dal test HPPC e la differenza con i valori usati per la scarica a 1C. Un ulteriore differenza è invece presente tra l'andamento delle varie curve nelle differenti condizioni di scarica, si nota che da una scarica all'altra i valori dei punti della curva tendono ad abbassarsi. Questo fenomeno può essere spiegato dalle temperature in gioco, crescenti all'aumentare dei diversi C di scarica, ma soprattutto dalla durata delle simulazioni. Infatti, la scarica a 1C ha avuto un'ora di tempo per effettuare una scarica completa, tempo in cui l'effetto di generazione di calore ha influenzato l'andamento di Rs.

Invece nell'ultimo caso, nella scarica a 3C, vi è stata maggiore generazione di calore, ma la durata della simulazione, soli 20 minuti, ha fatto sì che vi fosse un effetto minore sull'aumento dell'Rs all'aumentare della scarica.

Si può notare infatti, che la scarica a 3C presenta un comportamento quasi costante con un piccolo aumento dei valori lungo la simulazione. Questo risultato potrebbe sembrare in totale disaccordo con quanto visto per la scarica a 1C, però considerando che la scarica a 3C dura solo 20 minuti, se viene confrontata con l'andamento della scarica a 1C nel tratto iniziale dei primi 20 minuti, cioè da 1 a 0.7 di SOC, l'andamento diventa molto simile e coerente tra le varie curve.

# 6. Conclusioni

Con il lavoro esposto si vuole fornire un testo di riferimento per quanto riguarda la procedura standard per le simulazioni di scariche complete di celle utilizzando il programma di analisi FEM Ansys fluent. Inoltre, si vogliono fornire anche i risultati di tali simulazioni andando a conoscere il comportamento nel dettaglio delle celle nei singoli casi. In particolare, in questo elaborato verrà analizzato il comportamento termico di una cella prismatica scaricata a 1C, 2C e 3C rispettivamente, e il comportamento di una cella Pouch scaricata a 1C, 3C e 5C.

Nel primo capitolo si vuole fornire una grande introduzione agli argomenti trattati, con le motivazioni che spingono alla rapida evoluzione che l'automobile sta subendo e quindi i miglioramenti e gli studi fatti sulle batterie, vero nucleo e fulcro dello sviluppo dell'automobile elettrica. Quest'analisi si concentra sul funzionamento della cella studiata, al riconoscimento delle grandezze di interesse, ai rischi e problemi che possono mostrare durante il funzionamento, fino ad arrivare ad esempi di problemi e alla sensibilità dei sensori utilizzata per rilevare determinati fenomeni.

Nel secondo capitolo si fornisce un'infarinatura del modello matematico utilizzato per studiare questi fenomeni sul programma di analisi FEM Ansys Fluent. In questo capitolo verranno esposti i modelli termici, elettrici ed elettro-chimici necessari per la risoluzione dei calcoli in Fluent.

Nel terzo capitolo si mostra come realizzare una simulazione completa di una cella prismatica, effettuando poi tre tipi di scarica a differenti valori di C, in coda al capitolo vengono esposti ed analizzati i risultati ottenuti.

Il quarto capitolo, seguendo la forma del terzo, mostra gli stessi calcoli e gli stessi tipi di risultati applicati al modello Pouch, con l'esposizione dei risultati ottenuti.

Il quinto capitolo vuole mostrare la parte simulativa, esposta nei capitoli tre e quattro, come viene convalidata e modellata sulla base di dati sperimentali ottenuti in laboratorio. Con un'introduzione sul sistema di misura ed ottenimenti dati, con la spiegazione dei test effettuati per l'ottenimento dei parametri da inserire nel programma e con i risultati a cui si è fatto riferimento per considerare le simulazioni valide.

Il lavoro, quindi, effettuato per la stesura di questo elaborato è un percorso che parte da un approfondimento sull'attuale stato dell'arte delle batterie, per arrivare fino ai metodi sperimentali e simulativi per analizzare il comportamento termico di una cella al litio.

Il lavoro principale è stato andare a testare celle, per ottenere informazioni sul loro comportamento durante condizioni di lavoro. Non è stato un semplice confronto di dati, ma un processo iniziato con il testing sulle celle di riferimento, per ottenere dei valori da inserire nelle simulazioni che non fossero presi dalla letteratura o da modelli standard, ma che rispecchiassero l'effettiva cella analizzata, in modo da ottenere un confronto veritiero e reale. La fase di testing quindi è parte integrante di inizio e fine lavoro, e non solo usata come confronto finale.

Da questa fase si sono ottenuti degli interessanti spunti sui valori di Rs con in particolare le variazioni che subisce durante le simulazioni.

Si è evidenziato il lavoro di analisi critica fatto per distinguere i valori ottenuti dai test e quelli poi modificati e migliorati per renderli adatti alle simulazioni.

Inoltre, con questo elaborato, si è arrivati ad una buona conoscenza dei fenomeni termici che si innescano all'interno di modelli Pouch e Prismatici. La differenza costruttiva e geometrica rende questi due modelli molto differenti tra loro, soprattutto come risultati finali di riscaldamento globale. Infatti, come evidenziato a fine capitolo 4, le ridotte dimensioni della cella Pouch, rendono i collettori dei veri e proprio scambiatori di calore, andando a modificare la distribuzione della temperatura nel corpo. Rispetto alla cella Pouch, le prismatiche, le cui dimensioni sono tali da essere poco influenzate dall'effetto scambiatore di calore dei collettori, mostrano temperature più regolari, con una generazione di calore centrale nella cella e che va a dissiparsi regolarmente allontanandosi dal centro.
## Bibliografia

[1] A. Chang, R. Kalawsky, European transport sector interventions for Smart City

[2] Y. Mekonnen, A. Sundararajan, A. Sarwat, A review of cathode and anode materials for lithiumion batteries, University of Florida, IEEE, 2016.

[3] Abhishek Sarkar, Pranav Shrotriya, Abhijit Chandra, Chao Hu, Chemo-economic analysis of battery aging and capacity fade in lithium-ion battery, www.elsevier.com/locate/est, Department of Mechanical Engineering, Iowa State University, Ames, IA 50011, USA

[4] J. Kim, Jinwoo Oh, H. Lee, Review on battery thermal management system for electric vehicles, Korea University, 2019

[5] S. Corona, Simulazione multyphysics termo-fluido-meccanica di celle al litio per batterie di veicoli ibridi-elettrici, Torino,2018

[6] E. Vergori, F. Mocera, A. Somà, Battery Modelling and Simulation Using a Programmable Testing Equipment, Torino, 2018

[7] Piller S, Perrin M, Jossen A. Methods for state-of-charge determination and their applications. J Power Sources 2001; 96:113–20.

[8] Mastali M, Vazquez-Arenas J, Fraser R, Fowler M, Afshar S, Stevens M. Battery state of the charge estimation using Kalman filtering. J Power Sources

2013; 239: 294–307.

[9] Huang C, Wang Z, Zhao Z, Wang L, Lai CS, Wang D. Robustness evaluation of extended and unscented kalman filter for battery state of charge estimation. IEEE Access 2018;6. 1–1.

[10] Sepasi S, Ghorbani R, Liaw BY. Improved extended Kalman filter for state of charge estimation of battery pack. J Power Sources 2014; 255:368–76.

[11] B. Balagopal, M. Chow, the state of the art approaches to estimate the state of health and state of function of Lithium Ion Batteries, North Caroline, 2015

[12] Yao, S. Saxena, Lei Su, the explosive nature of tab burrs in Li-ion Batteries, Online pubblication,2017

[13] H. Wang, E. Curzio, E. Rule, Mechanical abuse simulation and thermal runaway risks of large format Li-ion batteries, www.elsevier.com, 2017

[14] L. Kong, Y. Xing, M. Pecht, In-situ observations of Lithium dendrite Growth, www.ieeexplore.com, 2018

[15] M. Hartmann, J.Kelly, Thermal runaway prevention of Li-ion Batteries by Novel Thermal Management, Itec2018, Long beach California, 2018 [16] M. Nascimento, M. Ferreira, J. Pinto, Real time thermal monitoring of lithium batteries with fiber sensors and thermocouples: A comparative study

[17] Abu Raihan Mohammad Siddique, Shohel Mahmud\*, Bill Van Heyst, A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations, School of Engineering, University of Guelph, Ontario, Canada

[18] M. Nascimento, S. Novais, M. Ding, M. Ferreira, S. Koch, internal strain and temperature discrimination with optical fiber hybrid

[19] J. Fleming, T. Amietszajew, E. Mcturk, D. Greenwood, Development and evaluation of in-situ instrumentation for cylindrical Li-ion cells using fibre optic sensors, University of Warwick, UK, 2018

[20] M. Nascimento, M. Ferreira, J. Pinto, Temperature fiber sensing of Li-ion batteries under different environmental and operating conditions

[21]D.Homa, C.Hill, A. Floyd,G.Pickrell, FiberBragg gratingsembedded in3Dprinted prototypes, Sci. Adv. Today 2 (2016)

[22] Feng, Huang, Jingtao He, Offset-free ECM based SOC estimation Using H-infinity Observer, International Conference on Mechatronics and automation, Giappone, 2017

[23] M. Chen and G. A. Rincon-Mora. "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance". IEEE Trans. On Energy Conversion. Vol. 21. No.2. A154-A161. June 2006.

[24] U. S. Kim et al. "Modeling the Dependence of the Discharge Behavior of a Lithium-Ion Battery on the Environmental Temperature". J. of Electrochemical Soc. 158 (5). A611-A618. 2011.

[25] U. S. Kim et al. "Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery". Journal of Power Sources. 180 (2). 909-916. 2008.

[26] E. Vergori, F.Mocera, A. Somà, Finite element versus experimental Thermo-mechanical behaviour of prismatic Li-Ion cell, Computers- open access journal, 2018.

[27] S.Vaschetto, Sorgenti di energia di bordo, Politecnico di Torino, 2018

[28] ANSYS Fluent Advanced Add-On Modules