

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE*

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ENERGETICA*

**TESI DI LAUREA**

in

MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA E PROPULSORI IBRIDI M

**MODELLAZIONE TERMICA DI BATTERIE AD ALTA  
TENSIONE CON TECNOLOGIA LI-ION PER VEICOLI  
IBRIDI**

CANDIDATO

Simone Pelloni

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Nicolò Cavina

CORRELATORI:

Ing. Luca Poggio

Ing. Elena Ligabue

Chiar.mo Prof. Davide Moro

Chiar.mo Prof. Enrico Corti

Anno Accademico 2016/17

Sessione I



## RINGRAZIAMENTI

Vorrei anzitutto esprimere la mia gratitudine nei confronti del mio relatore, il Professore Nicolò Cavina, per la fiducia che mi ha concesso e per il tempo dedicatomi per questo lavoro di tesi.

Uno speciale ringraziamento va all'Ing. Luca Poggio e all'Ing. Elena Ligabue per avermi concesso la possibilità di svolgere questa tesi in un contesto così stimolante ed arricchente come quello offerto da Ferrari S.p.a. e per aver sempre incoraggiato il mio lavoro.

Infine, un grazie anche a tutti i colleghi, che durante questi sei mesi non hanno mai mancato di fare sentire il loro supporto.



## SOMMARIO

L'industria *automotive* sta attraversando un periodo di grandi mutamenti. A tale cambiamento hanno contribuito l'aumento del costo del carburante e la legislazione legata alle emissioni sempre più stringente. Alla luce di questa situazione le automobili ibride ed elettriche stanno emergendo. Lo sviluppo e l'implementazione di batterie agli ioni di litio è dunque cruciale e richiede una conoscenza approfondita anche del comportamento termico nelle varie condizioni operative. La costruzione di modelli termici del comportamento della batteria e del suo sistema di raffreddamento consente, nella fase iniziale di sviluppo, di effettuare scelte determinanti su quello che sarà il "*thermal management*" della vettura.

In questo scritto si va a modellare il comportamento termico di una batteria composta da celle agli ioni di litio per applicazione su veicolo ibrido ad elevate prestazioni. La tesi di laurea è stata svolta presso l'azienda Ferrari S.p.a. all'interno della divisione GT.

Nella prima parte si introducono le caratteristiche termo-elettriche delle batterie agli ioni di litio per applicazioni ibride su automobili e le caratteristiche dei veicoli ibridi.

Nella seconda parte viene modellata la generazione di calore all'interno di una singola cella agli ioni di litio "in aria" attraverso modelli termo-elettrici 3D utilizzando il software CFD Ansys CFX. Il modello termico applicato viene validato su dati sperimentali presenti in letteratura e su dati sperimentali già presenti in azienda.

Nella terza parte si applicano i modelli ricavati nella parte precedente al caso con sistema di raffreddamento attivo delle celle all'interno di un pacco batteria allo scopo di progettare un sistema di raffreddamento che mantenga le celle all'interno dell'intervallo di temperatura consentito utilizzando i software Fluent e CFX.



## INTRODUZIONE

Le batterie agli ioni di litio sono sempre più ampiamente utilizzate come accumulatori di energia per veicoli elettrici e ibridi. La temperatura di funzionamento della cella (distribuzione della temperatura nel tempo e differenza di temperatura all'interno della cella stessa) è un fattore cruciale per la durata di vita della cella e il controllo della temperatura massima risulta fondamentale per la sua operatività in condizioni di sicurezza.

Le temperature ottimali fra cui fare funzionare una batteria agli ioni di litio vanno dai 20°C ai 30°C ma sono consentite anche temperature comprese fra i -40°C e i 60 °C. Maggiore è la temperatura di lavoro della cella, maggiore è il suo rate di invecchiamento. Se la temperatura diventa eccessivamente alta (oltre gli 80-100 °C) i materiali attivi all'interno della cella possono diventare termicamente instabili. A temperature basse, invece, la resistenza al trasporto degli ioni di litio è molto alta limitando le reazioni elettrochimiche e dunque la potenza erogabile. Il controllo della temperatura è pertanto un fattore cruciale sia per le performance che per la vita della batteria.

Nel caso in esame sono state considerate celle agli ioni di litio di tipo pouch sia per l'elevata potenza che sono in grado di erogare che per l'elevato "*packing factor*". Questi due fattori rendono però critica l'asportazione di calore dal pacco batteria. Le soluzioni tecniche per il raffreddamento sono molto diverse a seconda dell'applicazione e della tipologia di batteria ma si possono riassumere nelle seguenti: raffreddamento ad aria o ad acqua diretto o indiretto, raffreddamento tramite freon, tubi di calore o per mezzo di "*phase change materials*".

I vantaggi del raffreddamento ad aria sia diretto che indiretto sono la semplicità e la possibilità di funzionare con temperature ambiente fino a 40°C. Lo svantaggio è uno scarso controllo della differenza di temperatura fra cella e cella e la scarsa capacità di asportare calore dalle celle. Al contrario, il raffreddamento ad acqua è in grado di dissipare più potenza termica dalla batteria mantenendo basse le differenze di temperatura fra le celle. Nonostante ciò, elevate temperature dell'aria ambiente possono limitarne le performance a causa del fatto che le prestazioni del radiatore deteriorano rapidamente al crescere della temperatura ambiente. L'utilizzo di tubi di calore o di "*phase change materials*" non trova ancora applicazione industriale ma sono allo studio possibili soluzioni innovative che prevedono il loro utilizzo.



## INDICE

RINGRAZIAMENTI	1
SOMMARIO	3
INTRODUZIONE	5
INDICE	7
1 BATTERIE AGLI IONI DI LITIO E VEICOLI IBRIDI	9
1.1 Veicoli elettrici ibridi	9
1.2 Batterie agli ioni di litio	10
1.3 Fluidodinamica numerica (CFD)	15
2 MODELLO TERMICO CELLA POUCH	21
2.1 Equazioni del modello	21
2.2 Cella da 25 Ah “in aria”	24
2.3 Cella da 30 Ah “in aria”	29
3 MODELLO TERMICO CON SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO	35
3.1 Sistemi di raffreddamento batterie agli ioni di litio: tipologie	35
3.2 Sistema di raffreddamento batteria	40
3.3 Simulazione CFD del sistema di raffreddamento	41
3.4 Caratteristiche della cella	46
3.5 Simulazione CFD celle con sistema di raffreddamento attivo	48
3.6 Risultati delle simulazioni	56
4 SVILUPPI FUTURI	63
5 CONCLUSIONI	67
Bibliografia	69



# 1 BATTERIE AGLI IONI DI LITIO E VEICOLI IBRIDI

## 1.1 Veicoli elettrici ibridi

I veicoli elettrici ibridi sono una combinazione di due tipologie di propulsione: motore a combustione interna tradizionale e motore elettrico. In generale il motore a combustione interna è utilizzato per convertire l'energia del carburante in energia meccanica e/o elettrica tramite un generatore mentre la batteria elettrochimica è utilizzata per accumulare energia.

I veicoli ibridi offrono la possibilità di combinare il vantaggio delle emissioni locali nulle dei veicoli elettrici e l'elevata potenza e densità di energia dei veicoli a motore tradizionale oltre a superare aspetti svantaggiosi come gli elevati consumi di carburante, l'inquinamento dei veicoli con motore a combustione e la scarsa autonomia dei veicoli elettrici. Altri vantaggi legati ai veicoli ibridi sono la possibilità di abbinare al motore elettrico un motore a combustione più piccolo, la possibilità di ricaricare la batteria in fase di frenata recuperando energia e la possibilità di utilizzare il sistema "start and stop".

A seconda dell'architettura del sistema di propulsione i veicoli ibridi possono essere divisi in generale in tre categorie [16]:

- ibrido in serie
- ibrido in parallelo
- ibrido complesso

Ibrido in serie: è la configurazione di un veicolo elettrico con un motore a combustione che funziona come fonte di energia aggiuntiva per estendere l'autonomia del veicolo. L'energia in uscita dal motore a combustione è convertita in energia elettrica dal generatore. Questa energia può essere immagazzinata nella batteria o venire utilizzata direttamente dal motore elettrico. Poiché il motore non è collegato direttamente alla richiesta di potenza meccanica il suo punto di funzionamento può essere imposto in un punto di massima efficienza e non si ha l'esigenza di un collegamento meccanico per la trasmissione di potenza. Lo svantaggio di tale configurazione è la necessità di avere batterie e generatore di grande taglia. Un esempio di veicolo ibrido con architettura in serie è la Chevrolet Volt.

Ibrido in parallelo: è la configurazione di un veicolo a motore a combustione con l'aggiunta di componenti elettrici. Sia motore a combustione che motore elettrico sono connessi alla trasmissione in modo meccanico. In certe occasioni il veicolo può funzionare con il solo motore elettrico. Questa architettura non richiede un generatore ma è necessario un elemento meccanico per collegare il motore alla trasmissione di potenza. Un esempio di veicolo con architettura ibrida in parallelo è l'Honda Insight.

Le due precedenti architetture possono essere combinate in diversi modi andando a formare una configurazione combinata.

Ibrido complesso: è simile alla configurazione combinata serie-parallelo ma con in aggiunta il convertitore di potenza fra generatore e motore elettrico. Le criticità in questo caso sono la complessità e il costo, ma questa configurazione consente anche maggiori gradi di libertà nella gestione del sistema ibrido. Un esempio di applicazione di questa architettura è la Toyota Prius.

## 1.2 Batterie agli ioni di litio

Nei veicoli ibridi la batteria è il componente chiave. Essa, infatti, deve continuamente erogare e ricevere energia dai diversi componenti del sistema trasformando energia elettrica in energia chimica e viceversa.

La batteria è composta da un certo numero di celle connesse tra di loro.

Una cella è un componente completo e indipendente ed è composta da un elettrodo positivo e da uno negativo divisi da un separatore e da un elettrolita. La conversione di energia avviene agli elettrodi che sono anche detti anodo (negativo) e catodo (positivo). Il catodo è l'elettrodo dove avviene la reazione di riduzione, all'anodo avviene invece la reazione di ossidazione. Quando la batteria è collegata ad un carico, cioè in fase di scarica, gli ioni litio positivi si muovono verso il catodo attraversando l'elettrolita. Il catodo, dopo aver accumulato al suo interno gli ioni litio, diventa carico positivamente rispetto all'anodo attirando gli elettroni attraverso il circuito elettrico. Il contrario avviene in fase di carica della batteria.

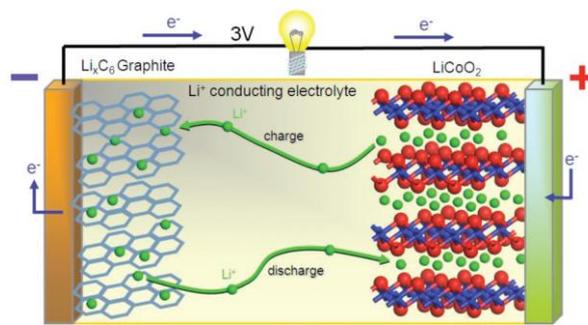


Figura 1-schema di funzionamento di una cella agli ioni di litio

Il termine “ioni di litio” include una varietà di diverse chimiche possibili, ognuna con caratteristiche diverse. La figura tratta da [15] rappresenta le tipologie di chimica in sviluppo nel settore automotive. Ognuna ha caratteristiche diverse e offre differenti proprietà in termini di performance, durata, sicurezza e costo.

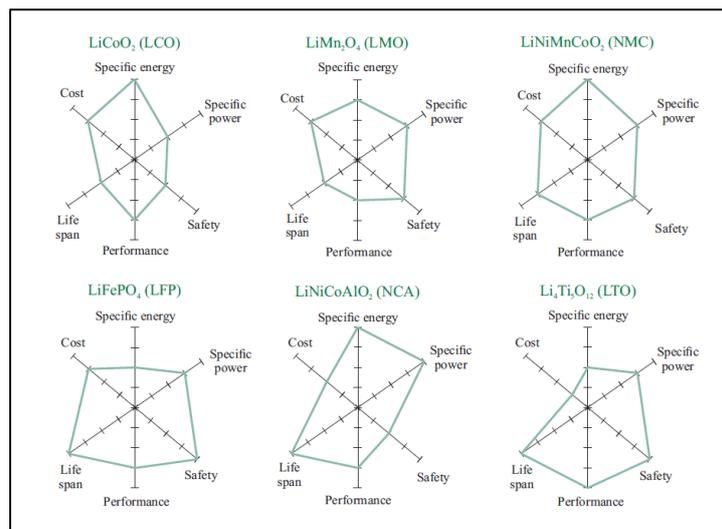


Figura 2-tipologie di chimica per celle agli ioni di litio

Le chimiche più diffuse sono le seguenti:

- NMC (LiNiMnCoO<sub>2</sub>): è la chimica più moderna basata sul Manganese. Grazie alla combinazione di nickel, manganese e cobalto al catodo ha caratteristiche di densità di energia e durata di vita elevate a fronte di un minor costo dei materiali per il basso contenuto di cobalto. La capacità specifica raggiunta è di 180 mAh/g.

- LCO ( $\text{LiCoO}_2$ ): è molto diffusa nelle celle per dispositivi elettronici portatili. Lo svantaggio più grande è dato dall'instabilità del materiale che può portare a problemi in termini di sicurezza.
- NCA ( $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ ): per migliorare la stabilità del materiale della LCO, alcuni atomi di cobalto sono sostituiti da nickel portando ad una riduzione del costo. L'alluminio porta benefici in termini di stabilità chimica e dunque di sicurezza della cella rispetto alla LCO. La capacità specifica raggiunta è di 200 mAh/g.

In generale le batterie si possono dividere fra batterie ad elevata densità di energia o di potenza. La prima tipologia è utile nell'applicazione su veicoli elettrici che necessitano maggiore autonomia ma a potenze medie più basse mentre la seconda tipologia è adatta ad applicazioni ibride che in genere richiedono alla batteria potenze elevate ma in brevi periodi di tempo.

I veicoli elettrici e ibridi hanno batterie ad alta tensione formate da moduli indipendenti che possono essere collegati in serie o in parallelo. I moduli, che sono entità a sé stanti, sono a loro volta formati da più celle collegate fra di loro in serie, in parallelo o in una combinazione dei due modi.

Poiché le performance di una batteria agli ioni di litio è fortemente legata alla temperatura, è necessario comprendere come si genera il calore dentro alla batteria. La generazione di calore in una cella è un processo complesso che richiede di capire il funzionamento delle reazioni elettrochimiche in funzione del tempo e della temperatura. Dunque, un modello matematico che comprenda tutti i fenomeni che avvengono deve essere un modello termo-elettrochimico. Questi modelli multifisici, fra i quali il più diffuso è il modello di Newman, richiedono una grande potenza di calcolo e sono utilizzati in fase di progettazione della cella da parte del costruttore e poco adatti nel progettare la batteria.

Diminuendo la complessità del modello ci sono i cosiddetti ROM "*reduced order models*" che risultano essere "più leggeri" dal punto di vista computazionale ma che inevitabilmente vanno a trascurare alcuni aspetti della fisica della cella. Questi modelli elettrotermici o addirittura solo termici sono empirici e richiedono dati sperimentali da estrarre tramite test sulla cella o da richiedere al costruttore della cella. Tali modelli empirici sono relativamente semplici e leggeri e dunque più adatti allo scopo del lavoro di tesi.

La termica all'interno della cella è descritta dall'equazione di bilancio del calore. I termini sorgente in questa equazione possono essere di origine chimica a causa delle reazioni

esotermiche ed endotermiche che avvengono durante la carica e la scarica, ma anche e soprattutto legati al riscaldamento per effetto joule a causa del movimento delle cariche nel corpo della cella.

Il modello elettro-termico più diffuso è l'ECM (*electric circuit model*).

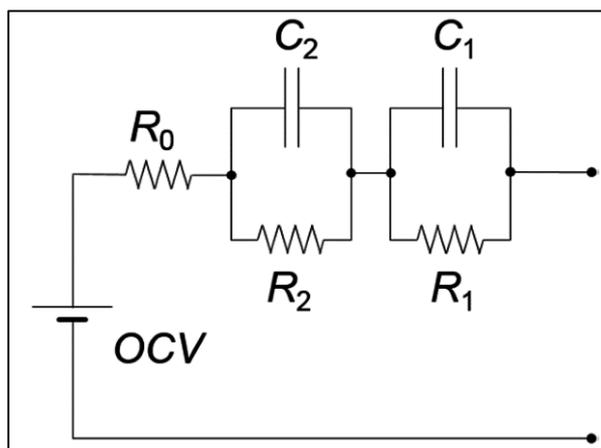


Figura 3-ECM del second'ordine

L'ECM è un circuito equivalente che descrive il comportamento dinamico della cella dal punto di vista elettrico tramite la caratteristica I-V della cella e termico tramite la generazione di calore per effetto joule modellato dalle resistenze [13] [15] [18].

Un ampio numero di ECM è stato implementato per calcolare SOC (State of Charge, definito come il rapporto fra la capacità della cella in un certo istante e la sua capacità massima), SOH (State of Health) e il comportamento dinamico della cella. Il modello ECM più semplice prevede una sorgente di tensione OCV e una resistenza interna  $R_0$  ed è in grado di simulare la caratteristica I-V della cella sottoposta ad una corrente costante ma non è in grado di modellare il comportamento della cella sottoposta ad un profilo dinamico di corrente. Per superare questo problema si aggiungono una resistenza  $R_1$  e una capacità  $C_1$  per seguire la dinamica I-V della cella. Il modello può essere reso più "fine" aggiungendo ulteriori rami RC. In genere per celle agli ioni di litio un solo ramo RC è sufficiente a descrivere il modello con una buona approssimazione e tempi di calcolo accettabili. I diversi componenti del circuito equivalente variano con l'avanzare dei cicli di carica e scarica ed il conseguente invecchiamento della cella. Un modello evoluto di batteria ne tiene conto e ricalcola i

parametri all'avanzare della vita della batteria. I parametri del circuito equivalente possono essere ottenuti tramite opportuni test e tramite un processo di "fitting" dei dati ottenuti. Si ottengono così i vari parametri concentrati del modello ECM in funzione di temperatura e stato di carica della cella.

Nella nostra applicazione il modello ECM è stato implementato su un modello termoelettrico 0-D allo scopo di determinare, sulla base della potenza richiesta alla batteria, il profilo di corrente richiesto e il conseguente andamento del SOC nel tempo e una prima approssimazione della resistenza.

Il profilo di corrente e l'andamento del SOC nel tempo sono i dati di input delle simulazioni termiche 3D svolte allo scopo di valutare i punti più caldi all'interno della batteria, i gradienti di temperatura e soprattutto l'efficacia del sistema di raffreddamento. In figura sono riportati un esempio di ciclo di corrente e una rappresentazione delle problematiche della cella in funzione della temperatura a cui si trova (e della sua disomogeneità).

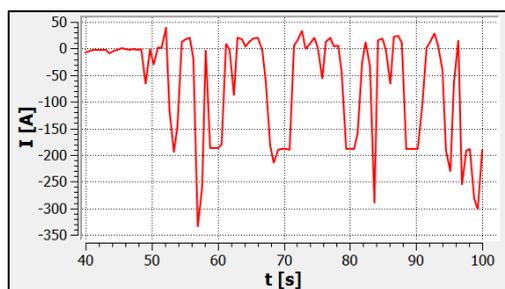


Figura 4-esempio di profilo di corrente in ingresso al modello

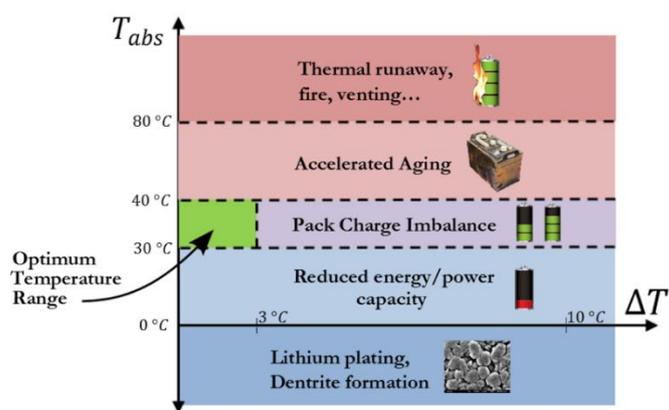


Figura 5- problemi associati a diversi livelli di temperatura per celle agli ioni di litio

## 1.3 Fluidodinamica numerica (CFD)

Per analizzare il comportamento termico delle celle sono stati utilizzati programmi di calcolo CFD commerciali tridimensionali.

La fluidodinamica numerica (CFD) è la branca della meccanica dei fluidi che sfrutta l'analisi numerica e gli algoritmi numerici per risolvere problemi che riguardano il moto dei fluidi e la trasmissione del calore. Grazie alla crescita della potenza di calcolo nei calcolatori attuali, la CFD si è diffusa sempre maggiormente nel mondo industriale e accademico ed è sempre più utilizzata in svariate applicazioni.

Per modellare correttamente il moto di un fluido e lo scambio termico è di primaria importanza capire i fenomeni fisici che sono dietro al moto dei fluidi, alla turbolenza e alla trasmissione del calore.

Le tre equazioni fondamentali che governano la meccanica dei fluidi sono:

- a. Equazione di continuità (la conservazione della massa).
- b. Conservazione della quantità di moto (equazione di Navier-Stokes).
- c. Conservazione dell'energia (prima legge della termodinamica).

Nel caso di convezione forzata l'equazione di Navier-Stokes può essere risolta separatamente rispetto all'equazione dell'energia, mentre in caso di convezione naturale o mista le equazioni sono accoppiate a causa della presenza del termine dovuto al galleggiamento che compare nell'equazione della quantità di moto.

Nel lavoro di tesi si è considerato un sistema di raffreddamento in cui il fluido refrigerante è movimentato da una pompa che, generando una prevalenza, mette in moto il fluido rendendo trascurabile il termine di galleggiamento. Di seguito è riportata una trattazione riassuntiva sulle equazioni in oggetto. Per un approfondimento sull'analisi e lo svolgimento approfondito di tali equazioni si rimanda a [1] e [10], le fonti da cui sono state tratte le equazioni qui riportate.

### Equazione di continuità

Considerando un volume infinitesimo di fluido la quantità di massa che esce dal volume può essere scritta come somma di tre termini (uno per ogni direzione nello spazio). Il flusso

totale di massa in uscita è uguale alla variazione di densità nel volume nello stesso periodo infinitesimo di tempo.

Questo è descritto dall'equazione:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \cdot \mathbf{u}) = 0$$

Dove  $\rho$  è la densità e  $\mathbf{u}$  il vettore velocità. Da questa equazione considerando la densità costante come nel nostro caso (refrigerante liquido) si ottiene:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

#### Equazione di Navier-Stokes

Questa equazione di bilancio deriva dall'applicazione della seconda legge di Newton al moto di un fluido. L'equazione di Navier-Stokes può essere scritta in forma compatta (per fluido newtoniano):

$$\frac{D(\rho \cdot \mathbf{u})}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \mu \cdot \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u})$$

Il termine  $\mu \cdot \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \mu \cdot \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u})$  tiene conto del comportamento viscoso del fluido;  $\mu$  è la viscosità dinamica del fluido,  $p$  è la pressione e  $\mathbf{g}$  è il vettore gravità. Nel caso si consideri un fluido ideale l'equazione di bilancio della quantità di moto assume la forma dell'equazione di Eulero:

$$\rho \cdot \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p$$

Per un fluido incompressibile la divergenza della velocità è nulla come facilmente ricavabile dalle equazioni precedenti e considerando trascurabile il termine della forza di gravità rispetto agli altri contributi si giunge all'equazione seguente:

$$\rho \cdot \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}$$

L'equazione di Navier-Stokes, insieme all'equazione di conservazione della massa danno luogo ad un sistema di quattro equazioni in quattro incognite: le velocità lungo le tre

direzioni e la pressione. La densità infatti in questo caso è stata assunta costante ed è nota. Questo sistema di equazioni è dunque un sistema chiuso.

#### Equazione di conservazione dell'energia

L'equazione di bilancio prevede che la variazione dell'energia interna in un sistema senza scambio di massa, è uguale alla differenza fra il calore fornito al sistema e il lavoro compiuto verso l'esterno dal sistema stesso.

Applicando questo bilancio ad un sistema fluido si ottiene:

$$\frac{D}{Dt}(\rho \cdot c_p \cdot T) = \nabla(k \cdot \nabla T) + \varphi + q$$

Dove  $T$  è la temperatura,  $c_p$  il calore specifico a pressione costante,  $k$  la conducibilità termica.  $\varphi$  rappresenta la generazione di calore generata dall'attrito interno al fluido stesso a causa della viscosità e  $q$  la potenza generata o asportata per unità di volume di fluido. Nel nostro caso vista la viscosità del fluido in analisi la generazione dovuta alla dissipazione viscosa è trascurabile. L'equazione precedente può essere semplificata assumendo come nel nostro caso  $\rho$ ,  $c_p$  e  $k$  del fluido costanti:

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{k}{\rho c_p} \cdot \nabla^2 T + \frac{q}{\rho c_p}$$

Nel caso della nostra applicazione è importante tenere in conto il fenomeno della turbolenza, fenomeno che si instaura in un fluido quando supera una certa soglia di velocità e che ha un forte impatto sullo scambio termico e sulle perdite di carico idrauliche. Il regime turbolento è un moto di un fluido in cui le forze viscosive non sono sufficienti a contrastare le forze di inerzia: il moto delle particelle del fluido che ne risulta avviene in maniera caotica, senza seguire traiettorie ordinate come nel caso di regime laminare.

#### Turbolenza

La classe di equazioni turbolente risolte nel mondo industriale sono in genere le cosiddette equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds (meglio note come RANS). Questa tipologia di equazioni considera le variabili, in ogni loro componente, formate da un valore

mediato nel tempo ( $\bar{x}$ ) e un valore fluttuante ( $x'$ ) ; ad esempio per la generica incognita  $x$  si ha:  $x = \bar{x} + x'$  .

Inserendo tali valori nelle equazioni precedenti e semplificando i termini trascurabili, si ottengono le equazioni RANS (il procedimento è riportato in [10]).

In tali equazioni, grazie all'assunzione di Boussinesq, si assume che il fluido non è sottoposto alla viscosità precedentemente indicata, ma in realtà è sottoposto ad una viscosità maggiore a causa del termine aggiuntivo  $\mu_t$  che rappresenta una viscosità virtuale addizionale sperimentata dal fluido a causa della turbolenza.

Analogamente alla viscosità turbolenta, per l'equazione dell'energia si può definire una diffusività termica turbolenta  $\alpha_t$  che tiene in conto l'aumento di scambio termico causato dal regime turbolento. Mentre  $\mu$  e  $\alpha$  possono essere considerate approssimativamente come costanti essendo proprietà del fluido,  $\mu_t$  e  $\alpha_t$  non sono costanti e presentano una forte disomogeneità nella regione di spazio occupata dal fluido in movimento.

In tal modo le equazioni RANS possono essere scritte come

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0$$

$$\rho \cdot \frac{D\bar{\mathbf{u}}}{Dt} = -\nabla \bar{p} + (\mu + \mu_t)\nabla^2 \bar{\mathbf{u}}$$

$$\frac{D\bar{T}}{Dt} = (\alpha + \alpha_t) \cdot \nabla^2 \bar{T}$$

Il problema non risulta però chiuso avendo 5 equazioni con 7 incognite (le velocità, la temperatura e la densità mediate nel tempo, la viscosità e la diffusività turbolenta).

L'unico modo per risolvere il problema è completare le equazioni mediate alla Reynolds con ulteriori equazioni. Questi set di equazioni che chiudono il problema sono i cosiddetti modelli di turbolenza.

Esiste una classificazione dei modelli di turbolenza basata sul numero e sul tipo di equazioni aggiuntive. Il modello algebrico è utilizzato quando le equazioni aggiuntive sono espressioni algebriche contenenti, per esempio, viscosità e diffusività turbolenta. I modelli a  $n$ -equazioni sono caratterizzati da  $n$  equazioni differenziali aggiuntive. Un esempio di modello a 2 equazioni molto diffuso è il modello  $k - \varepsilon$ .

Nelle applicazioni di scambio termico con fluidi diventa molto importante risolvere correttamente il campo di moto e lo scambio termico vicino a parete anche nel moto turbolento.

Il profilo di velocità a parete, in caso di moto turbolento, è quello descritto nell'immagine seguente in funzione della velocità e della distanza da parete in forma adimensionale che sono così definite:

$$u_+ = \frac{\bar{u}}{U_\tau} \quad y_+ = \rho \frac{y U_\tau}{\mu}$$

dove  $U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$  è il fattore d'attrito e  $\tau_w$  lo sforzo di taglio.

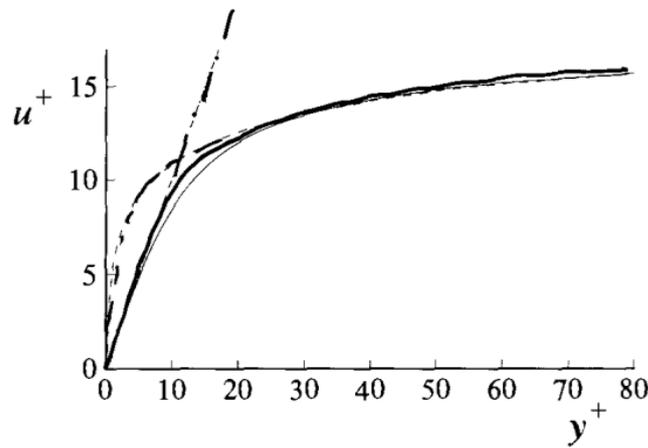


Figura 6- Profili di velocità vicino alla parete: la linea continua rappresenta i dati sperimentali, quella tratto-punto la wall - law e quella tratteggiata la log - law [17]

Nel grafico sopra riportato si possono individuare:

- I. Una prima regione a ridosso della parete, detta "substrato viscoso", caratterizzato da un flusso laminare per il ruolo preponderante delle forze viscosi nelle equazioni di bilancio di quantità di moto ed energia. In questa regione si ha una relazione lineare fra velocità e distanza adimensionalizzate:  $u_+ = y_+$ . Questa relazione è valida per valori di  $y_+ < 5$ .
- II. La regione più esterna, dominata da fenomeni turbolenti. Essa si sviluppa a  $y_+ > 30$  ed è caratterizzata da una dipendenza di tipo logaritmico fra velocità e distanza da parete adimensionalizzate:  $u_+ = 2.5 \ln(y_+) + 5.45$ .

- III. Una zona intermedia, cioè con  $5 < y_+ < 30$  in cui si ha la transizione dal regime laminare a quello turbolento. In genere all'interno di questa regione si risolve con l'approccio laminare per  $y_+ < 11$  passando a quello turbolento nel resto dell'intervallo.

Dal punto di vista operativo sono possibili due approcci quando si va a modellare il flusso turbolento a parete nella fluidodinamica numerica.

Il primo approccio si avvale delle "Wall functions", cioè funzioni semi-empiriche che non vanno a risolvere esplicitamente lo strato limite. In questo caso la prima cella della griglia di calcolo a parete può avere uno spessore che arriva a valori anche di  $y_+ \approx 30 \div 250$ .

Il secondo approccio consiste nell'andare a risolvere lo strato limite. Per renderlo possibile un certo numero di celle della mesh deve ricadere all'interno di questa zona. Perciò la mesh deve avere valori di  $y_+ \approx 1$ .

Quest'ultimo approccio è più oneroso dal punto di vista dei calcoli ma si rende necessario quando è importante modellare il flusso a parete con scambio termico come nel caso in oggetto della tesi.

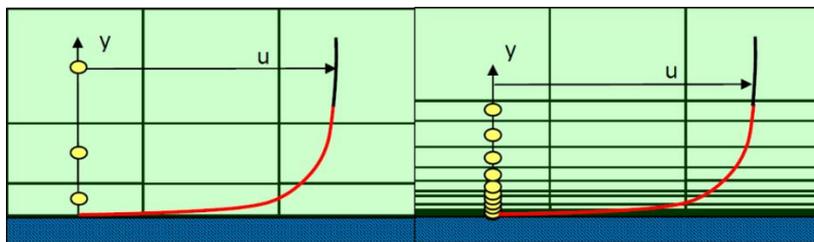


Figura 7- Confronto mesh a parete con approccio con "wall functions" (a sinistra) e risoluzione dello strato limite (a destra)

## 2 MODELLO TERMICO CELLA POUCH

### 2.1 Equazioni del modello

L'equazione che descrive la generazione di calore all'interno di ogni singolo elemento derivante dalla discretizzazione della cella all'interno del materiale attivo è [2] [6]:

$$q = I^2 R_{cella} - IT \frac{dE}{dt} .$$

Dove

- $q$  è la generazione di calore in *Watt* all'interno del dominio
- $R_{cella}$  è la resistenza interna della cella in *Ohm*
- $I$  è la corrente che attraversa la cella in *Ampere*
- $T$  è la temperatura in *Kelvin*
- $\frac{dE}{dt}$  è il coefficiente di entropia che tiene in conto il calore generato e asportato dalle reazioni chimiche di carica e scarica.

Il secondo termine al secondo membro, che può essere sia positivo che negativo, risulta trascurabile rispetto al primo termine, a maggior ragione alle elevate correnti che caratterizzano i cicli in analisi e per questo verrà trascurato.

Per quel che riguarda i tab, essendo zone "passive", la generazione di calore è data semplicemente da

$$q = I^2 R_{tab-} ; \quad \text{dove } R_{tab-} = \rho' \frac{l}{S}$$

$$q = I^2 R_{tab+} ; \quad \text{dove } R_{tab+} = \rho' \frac{l}{S}$$

in cui  $R'$  è la resistenza elettrica in [Ohm],  $\rho'$  è la resistività del materiale in [Ohm m],  $l$  è la lunghezza [m] e  $S$  la sezione [ $m^2$ ] del tab.

Il vincolo

$$R_{cella} = R - R_{tab+} - R_{tab-}$$

consente di calcolare  $R_{cella}$  a partire dalle resistenze calcolate sui tab e dalla resistenza interna "totale"  $R$  della cella che viene fornito dal produttore della cella in funzione di temperatura e di SOC.

Queste equazioni vengono applicate ad ogni elemento in cui viene suddiviso il dominio insieme all'equazione di bilancio dell'energia:

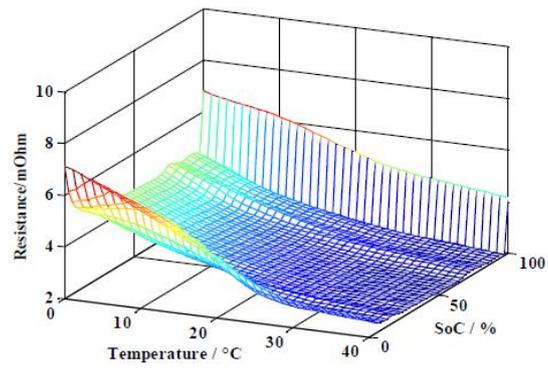
$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{q}{vol}$$

Dove

- $\rho$  è la densità del materiale in  $\frac{Kg}{m^3}$
- $c_p$  è il calore specifico in  $\frac{J}{Kg K}$
- $T$  è la temperatura in Kelvin
- $k_x, k_y, k_z$  sono le conducibilità lungo x, y e z in  $\frac{W}{m K}$
- il termine  $\frac{q}{vol}$  è il termine che rappresenta la potenza generata per unità di volume dovuta ad effetto joule e al calore rilasciato e assorbito dalle reazioni endotermiche o esotermiche.

Tali equazioni sono implementate all'interno del software ANSYS CFX.

Al suo interno sono inseriti tutti i valori dei parametri elencati precedentemente che dipendono sia dai materiali sia dalle caratteristiche della cella in termini di resistenza. La resistenza interna della cella  $R$  dipende principalmente da SOC e da  $T$  ed è un parametro fondamentale per l'analisi termica della cella. La temperatura a sua volta ha anche una forte ricaduta sull'analisi elettrica poiché i parametri dell'ECM dipendono dalla temperatura. L'immagine seguente riporta la tipica dipendenza della resistenza interna dalla temperatura e dal SOC di una generica cella agli ioni di litio. In genere, rispetto alla temperatura, la resistenza interna ha un andamento decrescente grazie al miglioramento del tasso di reazione all'interno della cella mentre si mantiene piuttosto costante, a parità di temperatura, per valori del SOC compresi fra 30% e 90%.



*Figura 8-Tipico andamento di R con SOC e T per una cella al litio*

Per verificare l'accuratezza del modello qui proposto, esso è applicato a diversi casi su celle con capacità differenti e sulle quali sono presenti in letteratura dati sperimentali, rispetto ai quali validare in modo critico i risultati ottenuti.

## 2.2 Cella da 25 Ah “in aria”

Il modello riportato nel capitolo precedente è applicato al caso di una cella da 25 Ah studiata nell’articolo “Thermal design for the pouch-type large format lithium-ion batteries” di Bin Wu, Zhe Li e Jianbo Zhang.

Le proprietà fisiche e termiche della cella, oltre alle condizioni al contorno considerate, sono riportate nella tabella seguente. Esse sono applicate alla geometria riportata di seguito. La cella è formata dal materiale attivo e dai due tab posizionati sullo stesso lato.

Current collector			
	Positive	Negative	
Current collector thickness $\delta_j$ ( $\mu\text{m}$ )	20	14	
Current collector electric conductivity $\sigma_j$ (S/m)	$37.8 \times 10^6$	$59.6 \times 10^6$	
Tab width $L$ (mm)	50		
Electrode height (mm)	205		
Electrode width (mm)	166		
Electrode			
	Positive	Separator	Negative
Thickness ( $\mu\text{m}$ )	20	30	14
Thermal conductivity $k_{in}$ ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )		21	
Thermal conductivity $k_{th}$ ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )		0.48	
Heat capacity $C_p$ ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )		1243	
Density $\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )		2300	
Convection heat transfer coefficient $h$ ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )		4	
Battery thickness (mm)		7.2	
Tab			
	Positive	Negative	
Thickness (mm)	0.3	0.3	
Width (mm)	50	50	
Height (mm)	50	50	
Thermal conductivity ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	237	401	
Heat capacity ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	900	385	
Density ( $\text{kg m}^{-3}$ )	2700	8700	
Electrical conductivity ( $\text{S m}^{-1}$ )	$37.8 \times 10^6$	$59.6 \times 10^6$	
Equivalent contact conductivity ( $\text{S m}^{-1}$ )	$70 \times 10^6$	$80 \times 10^6$	
Convection heat transfer coefficient $h$ ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )		4	

Figura 9- proprietà elettro-fisiche dei materiali

La mesh, generata con Ansys Meshing, è strutturata, completamente esaedrica e formata da 39808 elementi. Tale griglia è riportata nella figura seguente ed è stata ottenuta suddividendo i tab e il corpo della cella in quattro elementi lungo lo spessore ed elementi con dimensioni di 2 mm lungo le altre due direzioni. La qualità della mesh ottenuta è molto buona avendo una “skewness” minore di 0.2 Il risultato è stato verificato essere indipendente dalla mesh utilizzata con il numero di elementi sopra riportato tramite simulazioni preliminari.

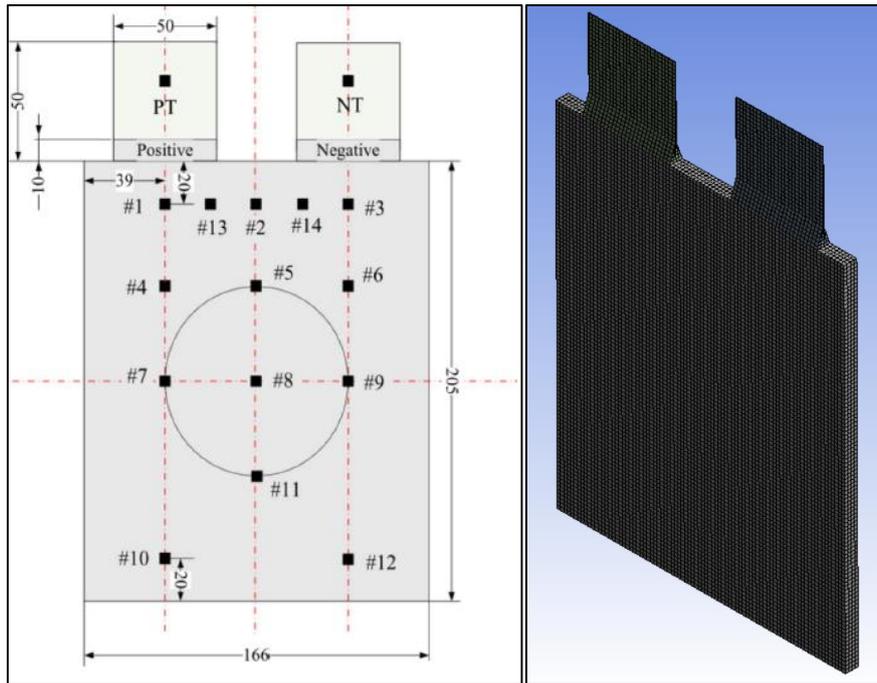


Figura 10- geometria della cella con posizionamento delle termocoppie e mesh

A partire dalla geometria e dalle proprietà dei materiali vengono calcolate le resistenze elettriche sui tab, che sono una delle cause di generazione di calore nella cella. Il valore ottenuto viene poi moltiplicato per un fattore correttivo maggiore di 1 per tenere conto dell'ulteriore resistenza che si genera sulla saldatura dove tutti i collettori di corrente vengono uniti sul tab. Il valore della resistenza di contatto è difficilmente misurabile e risulta molto dipendente dal processo di saldatura del tab. Dopo diverse simulazioni il valore corretto di tale coefficiente correttivo è risultato essere 2.5.

All'interfaccia fra tab e cella il processo di saldatura comporta anche la generazione di una ulteriore resistenza termica al passaggio del calore che è stata assunta pari a  $0.0013 \frac{m^2K}{W}$  basandosi su valori trovati in letteratura. La resistenza interna della cella viene considerata costante e pari a  $3.5 \text{ m}\Omega$ , assunzione realistica nell'intervallo di SOC considerato (fra il 90% e il 40%) e viste le temperature attese.

La cella si scarica partendo da una temperatura iniziale di  $22.5^\circ\text{C}$  con una corrente costante di  $37.5 \text{ A}$  corrispondente ad un C-rate di scarica di 1.5 C.

Le condizioni al contorno termiche sono semplificate: si considera, come nell'articolo, un coefficiente di scambio fra cella ed aria di  $4 \frac{W}{m^2K}$  con aria a 22.5°C. Tale assunzione semplificativa consente di non modellare esplicitamente l'aria ambiente permettendo così un calcolo più snello ma con un maggior grado di approssimazione.

Viene risolta la sola equazione dell'energia e lo schema di discretizzazione temporale è il metodo di Eulero del secondo ordine, con time step di 2 secondi e un criterio di convergenza di 1e-06 sull'equazione dell'energia.

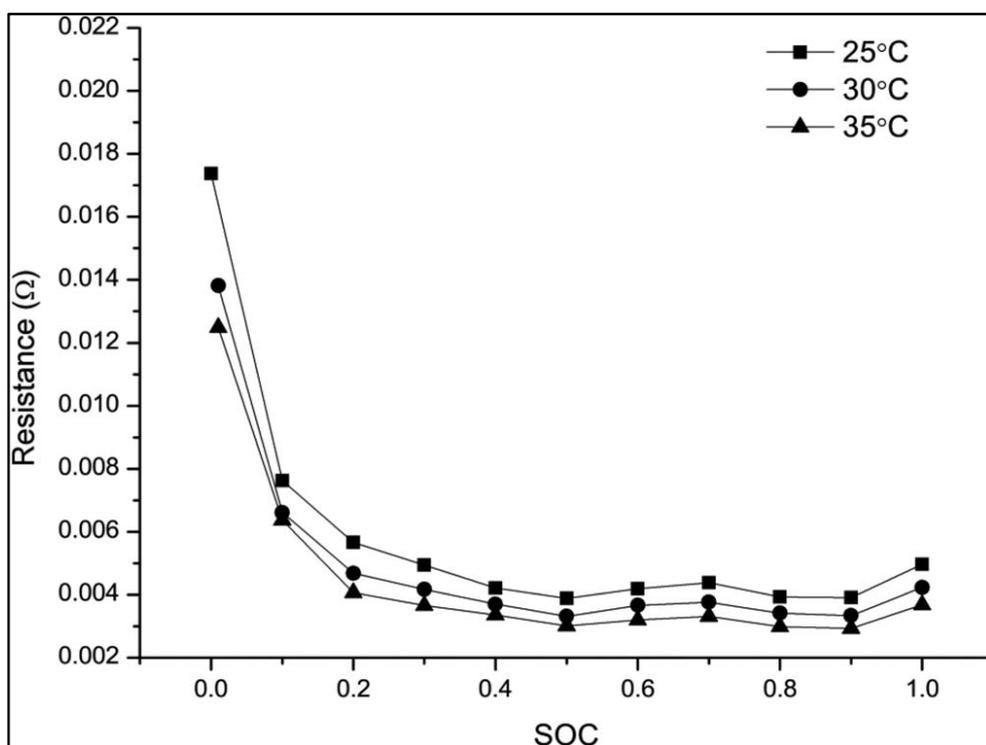


Figura 11- Resistenza interna della cella in funzione di SOC e temperatura

La temperatura in funzione del tempo viene confrontata con i dati sperimentali sulle termocoppie #1 e #8 che sono posizionate nei punti chiave: la #1 si troverà vicina al punto più caldo sulla cella essendo prossima al tab in alluminio che tende a scaldarsi di più e dunque è molto indicativa riguardo la temperatura massima della cella. La #8 trovandosi al centro sarà indicativa rispetto alla temperatura media a cui si trova a lavorare la cella. La scarica dura 1500 s andando da un SOC del 90% al 30% e dunque si è ritenuta la resistenza interna di cella indipendente dal SOC.

Nelle immagini seguenti è riportato il dominio 3D creato in Ansys CFX e il contour di temperatura a fine scarica. Come ci si poteva aspettare il punto più caldo è quello vicino al tab positivo.

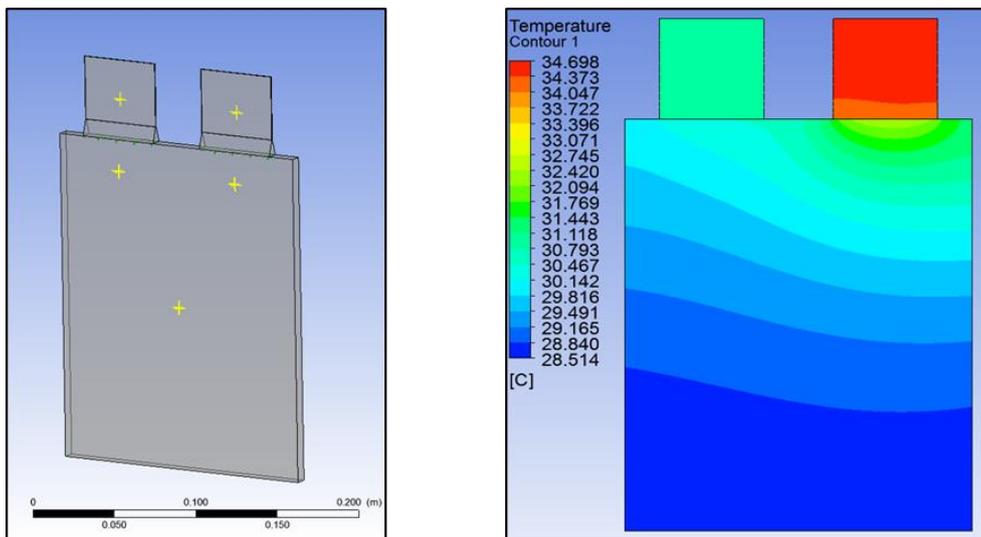


Figura 12- geometria 3D della cella e contour di temperatura sulla superficie della cella a fine scarica

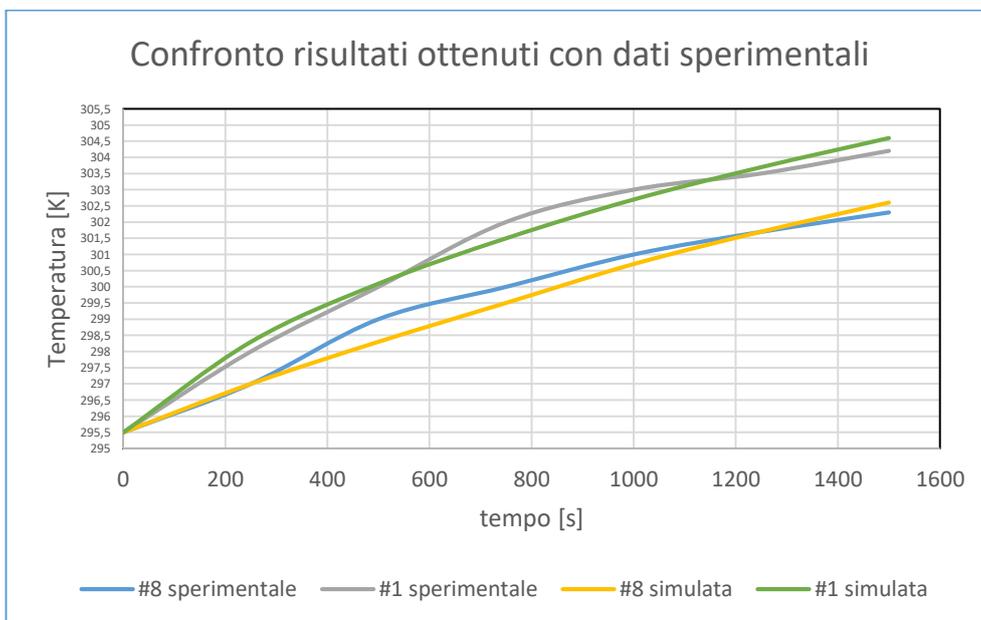


Figura 13- validazione simulazione su dati sperimentali

Dal confronto con i dati sperimentali, ottenuti con termocoppie di tipo T con una sensibilità di  $0.1^{\circ}\text{C}$ , si può notare una buona corrispondenza delle simulazioni coi dati reali, anche alla luce delle approssimazioni sia nel modello di cella che nelle condizioni al contorno termiche semplificate con un errore di temperatura massimo di  $0.7^{\circ}\text{C}$  su tempi lunghi di simulazione (la scarica dura all'incirca 26 minuti).

## 2.3 Cella da 30 Ah “in aria”

Il passaggio successivo è stato l'applicazione del modello ad un caso di singola cella sottoposta ad un profilo di corrente più rappresentativo di un possibile funzionamento in una applicazione reale. A tal scopo si sono sfruttati i dati già registrati su una termocoppia posta su una cella da 30 Ah in cella climatica, sottoposta ad un ciclo di corrente che simula la corrente richiesta alla cella su un ciclo di scarica. In queste condizioni la richiesta di corrente è molto elevata e di lunga durata risultando dunque un importante banco di prova. Le caratteristiche della cella sono riportate nella tabella seguente e sono state utilizzate per la costruzione del modello geometrico e termo-elettrico.

<b>Capacità</b>	<b>30 Ah</b>
<b>Chimica</b>	<b>NMC</b>
<b>Massima corrente di picco</b>	<b>900 A</b>
<b>Massima tensione</b>	<b>4.2 V</b>
<b>Minima tensione</b>	<b>2.8 V</b>

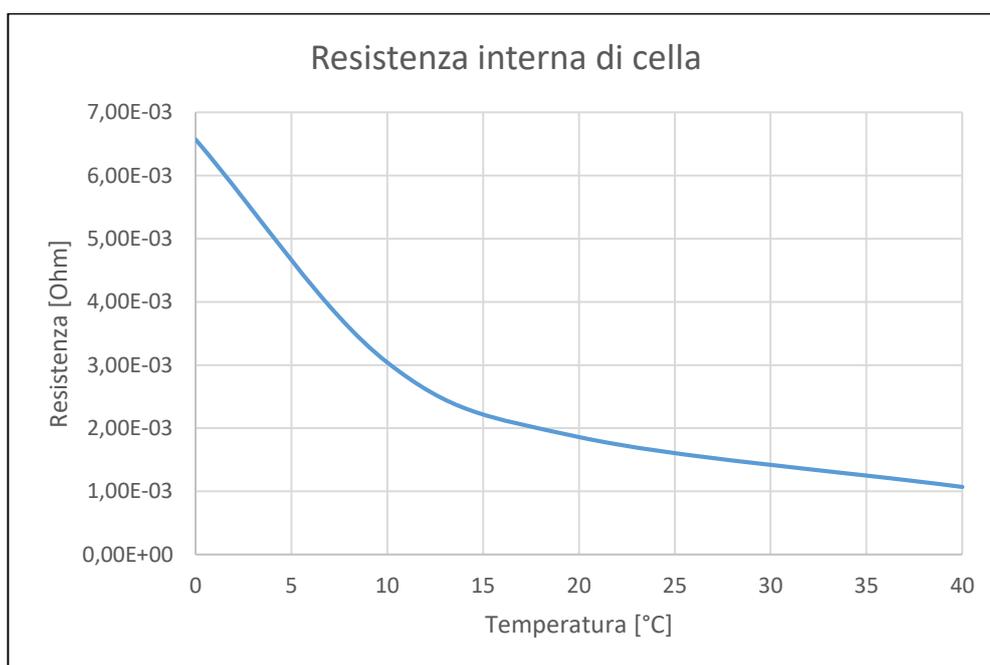
*Figura 14- caratteristiche della cella*

La termocoppia in questo caso è posizionata nella parte centrale della cella, che ha una configurazione geometrica analoga alla cella da 25 Ah. Le resistenze sui tab, mancando dati sulla loro configurazione, sono assunte pari a quelle della cella al capitolo precedente. Per quel che riguarda la resistenza interna della cella in questo caso si hanno direttamente i dati sulla resistenza ma in funzione della sola temperatura. Questo livello di approssimazione risulta accettabile per livelli di SOC compresi fra il 90% e il 30%, valori oltre i quali si cerca di non andare per evitare scariche troppo profonde e ricariche eccessive che possono compromettere la vita utile della cella.

Per implementare la dipendenza della resistenza dalla temperatura, che viste le elevate correnti e dunque l'ampio intervallo di temperatura di funzionamento ha grande importanza, si procede nel seguente modo: ad ogni time-step il software calcola la

temperatura media della cella e attraverso una funzione esterna calcola la nuova resistenza interna della cella.

Questo valore è utilizzato per calcolare la nuova potenza generata che viene impostata automaticamente come condizione al contorno all'istante successivo. La funzione esterna che determina la resistenza in funzione della temperatura media della cella è riportata nel grafico seguente:



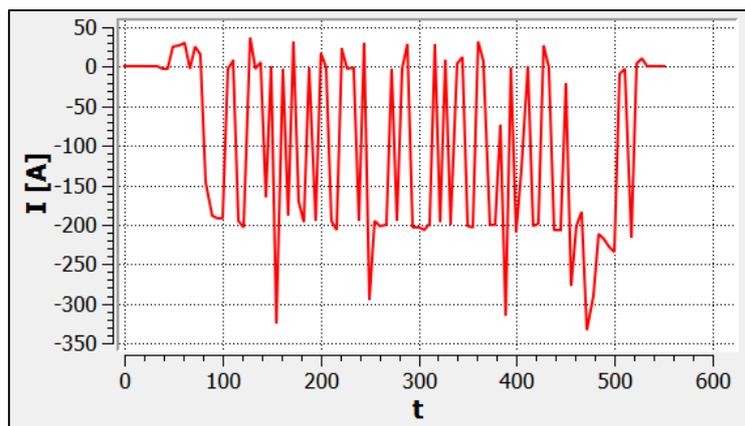
*Figura 15- resistenza interna in funzione della temperatura*

Il calcolo è svolto considerando le seguenti assunzioni:

- La resistenza elettrica che si genera nel contatto fra tab e cella è difficilmente misurabile e stimabile e viene inglobato nella resistenza del tab (assumendo gli stessi valori del caso al capitolo precedente)
- L'analisi è transitoria con time-step di 0.5 secondi
- Si trascura la potenza termica dissipata tramite radiazione a causa delle temperature previste

- $\rho = 2092 \frac{kg}{m^3}$
- $c_p = 1000 \frac{J}{Kg * K}$
- $k_{xy} = 18.2 \frac{W}{m * K}$  (conducibilità lungo il piano parallelo alla superficie della cella)
- $k_z = 0.9 \frac{W}{m * K}$  (conducibilità lungo la direzione normale alla superficie della cella)
- Il coefficiente di convezione naturale dell'aria per una lastra piana verticale può essere stimato tramite formule sperimentali note in letteratura a partire dai numeri adimensionali di Grashof, Rayleigh, Prandtl e dai dati termici e geometrici del problema. Tramite i calcoli per lastra piana infinita si è ottenuto un HTC di circa  $4 \frac{W}{m^2 * K}$  come quello assunto nel caso precedente.

Il ciclo di corrente a cui è sottoposta la cella è riportato di seguito. Il ciclo dura all'incirca 530 secondi partendo da una temperatura iniziale di 14.85°C.



*Figura 16- ciclo di corrente a cui è sottoposta la cella*

I punti nei quali la corrente è negativa sono punti in cui la cella si scarica, i punti a corrente positiva sono punti in cui si ricarica (grazie alla rigenerazione in frenata o per l'azione di ricarica del motore a combustione in base alla strategia del veicolo).

I criteri per la generazione della mesh sono gli stessi del caso al capitolo 2.2 ottenendo una griglia composta da 42320 elementi con le stesse caratteristiche di qualità. La soluzione anche in questo caso è risultata essere indipendente dalla griglia di calcolo.

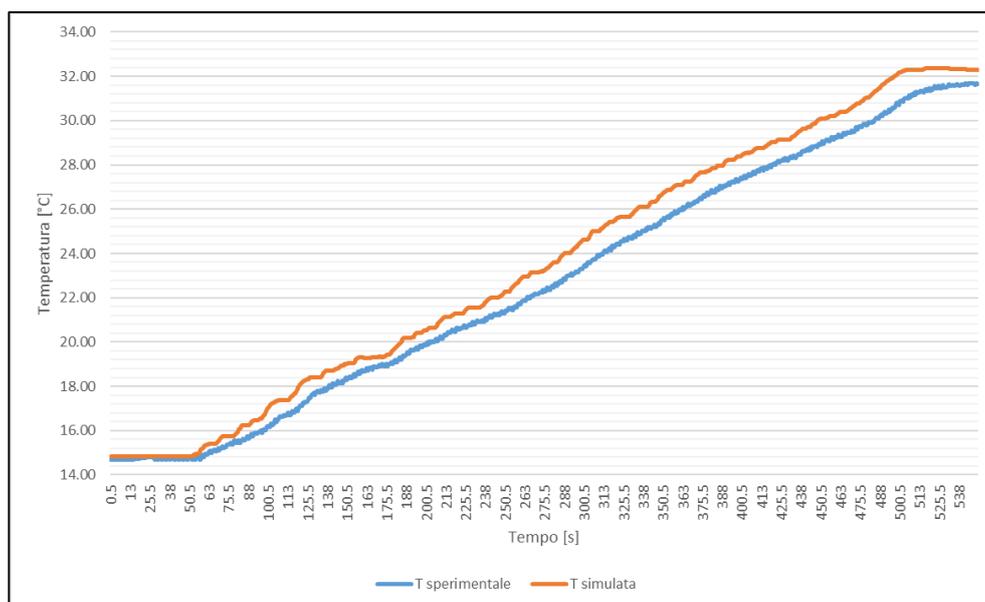


Figura 17- confronto andamento temperatura sperimentale (in rosso) e temperatura simulata (in verde) in gradi Kelvin

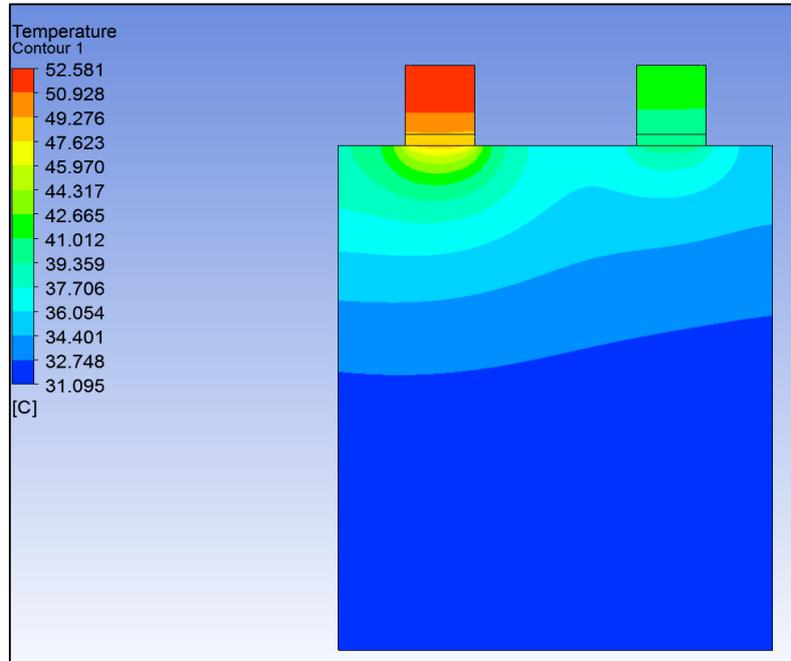
Come si può notare dall'immagine sopra riportata, che rappresenta un confronto fra i risultati ottenuti dalla simulazione e i dati sperimentali, la temperatura sulla termocoppia è simile alla temperatura simulata, con un errore massimo di circa 0.8 °C verso la fine del ciclo. Probabilmente la discrepanza è dovuta all'approssimazione del coefficiente di scambio termico e alla semplificazione del modello di generazione di calore nella cella.

I dati sperimentali sono disponibili solo in un punto della cella. Come si nota dal contour di temperatura ottenuto tramite la simulazione, come ci si aspettava il punto più caldo è quello sul tab positivo, che essendo in alluminio ha una resistività più elevata ed una minore conducibilità termica.

È però importante monitorare con delle termocoppie anche le due zone nei pressi dei tab perché potrebbero essere soggette alle temperature maggiori sulla cella. Infatti in questo caso la temperatura vicina al tab positivo raggiunge i 50 °C, un valore piuttosto elevato e che non è consigliabile superare sul materiale attivo per non compromettere la vita della cella.

Anche in questo caso, come si può notare dai risultati, il modello termico semplificato approssima in modo efficace la temperatura raggiunta dalla cella su un ciclo di 530 secondi con un errore rispetto alla misura sperimentale piuttosto limitato. Questo modello può

essere ulteriormente affinato inserendo la dipendenza della resistenza interna di cella anche dal SOC.



*Figura 18- contour di temperatura della cella dopo 500 secondi*



## 3 MODELLO TERMICO CON SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO

### 3.1 Sistemi di raffreddamento batterie agli ioni di litio: tipologie

Come riportato nel sommario, i sistemi di raffreddamento possono essere di diverse tipologie. Nella maggior parte delle applicazioni ibride ed elettriche viene utilizzato un sistema di raffreddamento a liquido poiché consente di mantenere temperature più basse ed omogenee sulle celle della batteria.

I sistemi di raffreddamento a liquido possono essere di diverse tipologie. Lo scambio di calore può avvenire direttamente fra dei setti attraversati da liquido e posti a contatto con le celle o, in alternativa, la dissipazione di calore può avvenire per mezzo di alette formate da metalli altamente conduttivi posti fra le celle e collegati ad uno o più *“cooling plates”* raffreddati a liquido.

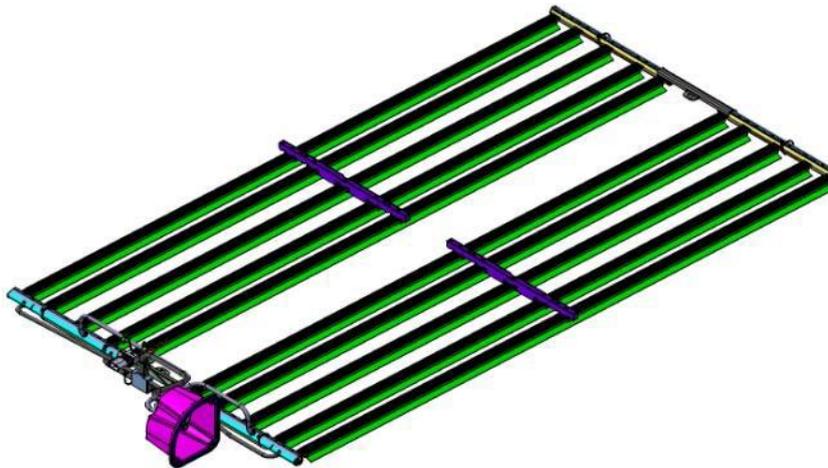
In questi ultimi due casi, il fluido può essere raffreddato da un circuito A/C, da un radiatore o da entrambi a seconda del livello di temperatura richiesto e dell'architettura del sistema di raffreddamento. Un'alternativa che può portare ad un'architettura più semplice è l'utilizzo del fluido che si trova nel circuito A/C il quale consente di raffreddare direttamente la batteria. In questo modo è possibile eliminare il circuito di raffreddamento ad acqua e glicole; questa soluzione però introduce altre complicazioni a livello progettuale e di controllo. Di seguito sono riportati esempi di sistemi di raffreddamento della batteria per veicoli elettrici o ibridi presenti sul mercato.

## **BMW i3**

Questo veicolo (full electric) ha un pacco batteria da 22 kWh e utilizza un evaporatore “ad espansione diretta”, in cui il calore viene asportato direttamente dal freon del sistema A/C. Questa tipologia di sistema richiede simulazioni e validazioni molto complesse, ma consente di ottenere i seguenti benefici:

- riduzione dei pesi (non vengono utilizzati pompa acqua, scambiatore a piastre, tubazioni del sistema glicole, glicole)
- ottimizzazione dell'efficienza del sistema di raffreddamento (coefficienti di scambio elevati e temperature di esercizio del freon più basse rispetto all'impianto a glicole)

Di contro risulta un maggior consumo energetico da parte del compressore in termini di potenza assorbita.



*Figura 19- Sistema di raffreddamento batteria della BMW i3*

## Tesla Model S

Questo veicolo (full electric) ha un pacco batteria da 70 kWh ed utilizza un sistema ad acqua attivo in cui il mezzo refrigerante è una miscela di acqua e glicole. Questo sistema è caratterizzato da un unico canale attraversato dal refrigerante che entra in contatto con tutte le celle del pacco batteria.

I vantaggi di questa soluzione sono:

- semplicità costruttiva del sistema
- ogni cella è a contatto diretto con il canale che trasporta il fluido termo-convettivo
- soluzione a basso costo

L'unico aspetto svantaggioso è la disomogeneità della temperatura fra le celle del pacco batteria quando sottoposto a elevate richieste di corrente.



Figura 20- sistema di raffreddamento Tesla Model S

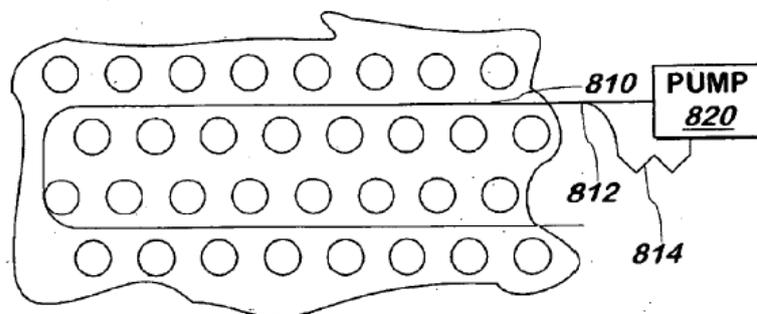


Figura 21- sistema di raffreddamento Tesla, particolare da brevetto

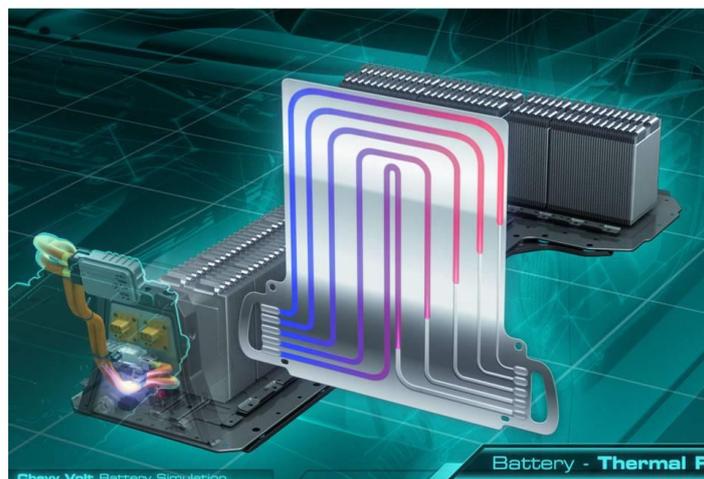
## **GM Volt**

Questo veicolo ibrido ha un pacco batteria da 18.4 kWh e presenta un sistema di raffreddamento attivo a liquido in cui il fluido refrigerante (una miscela di acqua e glicole), passa fra ogni coppia di celle attraverso micro-canali. Tale sistema è molto efficiente dal punto di vista termico, in quanto la resistenza al passaggio di calore fra cella e fluido refrigerante risulta molto piccola (la cella si trova a contatto con la piastra a micro-canali).

Le piastre a micro-canali sono poste fra le varie celle e vengono alimentate in parallelo da una serie di canali di ingresso/uscita. Dal punto di vista termico è uno dei sistemi più efficaci, ma presenta delle criticità legate alla elevata complicazione geometrica dei componenti della batteria.

Un'analisi termica dettagliata è presente in [5] dove è stato simulato il comportamento del sistema di raffreddamento di un modulo della batteria sottoposta ad un ciclo pulsato di corrente in carica e scarica (con valori fino a 170 A) in ambiente Fluent.

Tale sistema presenta un'elevata perdita di carico, ma dal punto di vista termico risulta essere molto efficace.



*Figura 22- sistema di raffreddamento GM Volt*

I risultati riportati nella figura 23 mostrano una distribuzione di temperatura omogenea e sempre all'interno dell'intervallo di funzionamento ottimale per le celle.

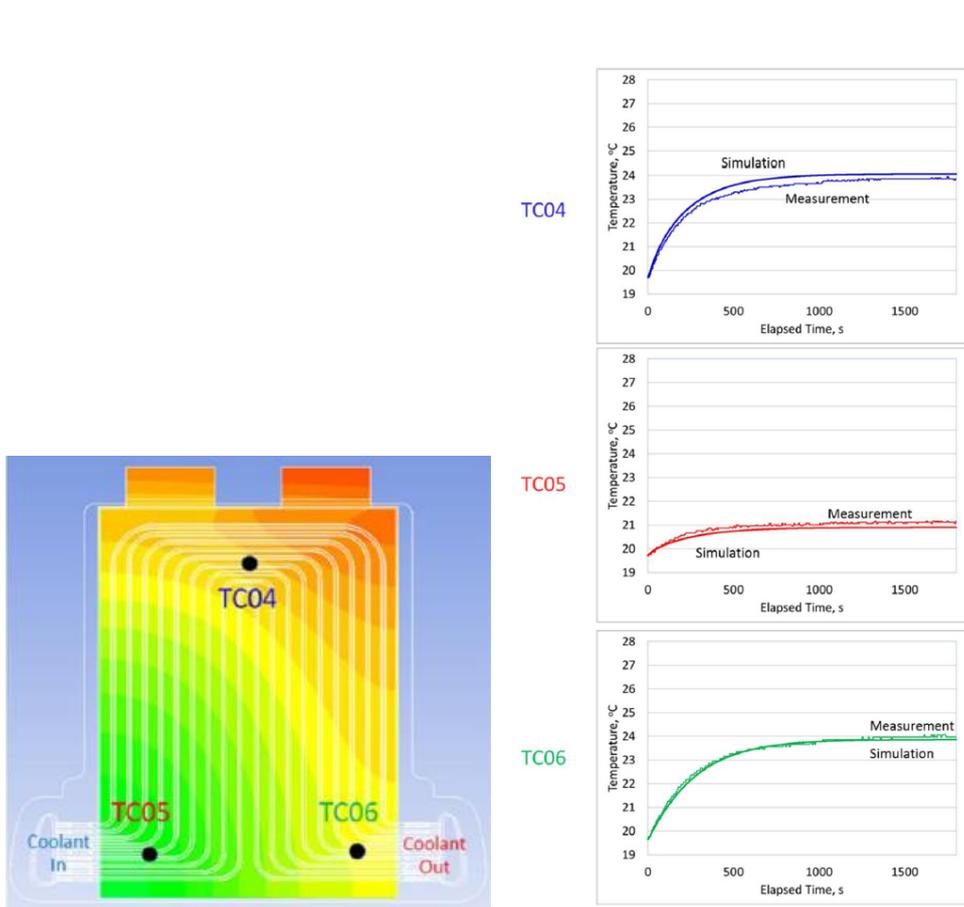


Figura 23- distribuzione di temperatura sulla cella a contatto con i micro-canali

## 3.2 Sistema di raffreddamento batteria

Nel modello termico sviluppato, il sistema di raffreddamento è composto da alette in metallo altamente conduttivo poste fra le celle e collegato a due *cooling plates* raffreddati da un refrigerante.

Un layout semplificato del sistema è riportato nell'immagine seguente.

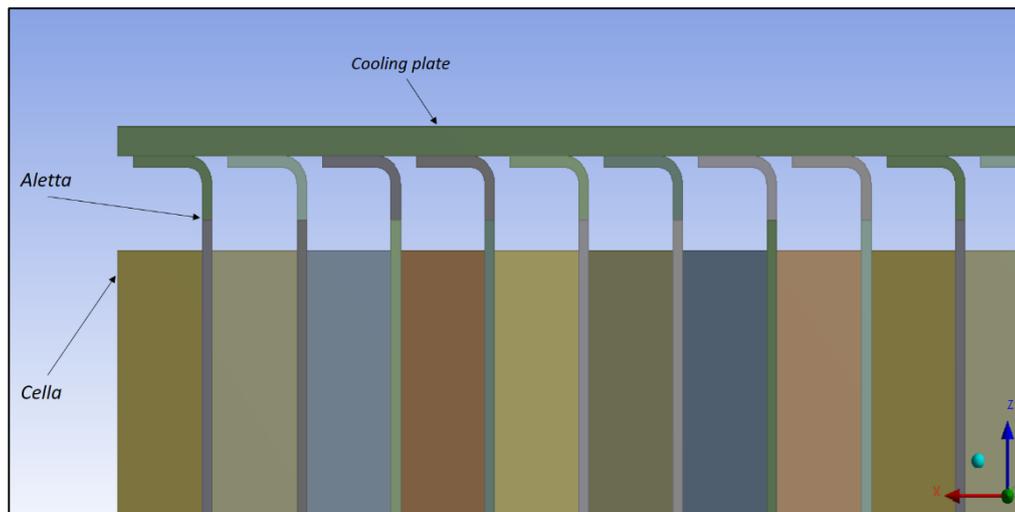


Figura 24- Layout semplificato del sistema di raffreddamento della batteria

Le celle sono in contatto con le alette che a loro volta sono poste in contatto con i *cooling plates* da entrambi i lati (il sistema è simmetrico rispetto al piano  $xy$ ).

Nell'area di contatto fra celle e alette sono posti dei materiali di interfaccia termica che hanno lo scopo di isolare le celle dal punto di vista elettrico pur garantendo una buona conducibilità termica per consentire il flusso di calore verso l'esterno. Anche fra alette e *cooling plate* è presente un materiale di interfaccia per consentire il corretto contatto e scambio termico con il fluido refrigerante.

Sulla superficie esterna del *cooling plate* è posto il sistema di raffreddamento (in figura 24 non rappresentato) attraversato dal refrigerante.

Il modello termico della batteria e del sistema di raffreddamento richiede una complessità computazionale e tempi di calcolo molto elevati. Per questa ragione è stato modellato il sottosistema aletta e cella.

Questa configurazione è rappresentativa perché la struttura della batteria è modulare e dunque non ci si discosta eccessivamente dalla situazione reale.

Per applicare le corrette condizioni al contorno sui *cooling plates* è necessario modellare anche il sistema del fluido di raffreddamento. Anche in questo caso la modellazione dell'intero sistema ha un'elevata complessità computazionale quindi è stato simulato un solo elemento a serpentina posto sul *cooling plate*.

I modelli qui presentati vengono implementati su codici CFD:

- Per il modello fluidodinamico del condotto si è utilizzato Ansys Fluent simulando il moto del refrigerante e lo scambio termico ad esso dovuto.
- Nel caso del modello con aletta e cella si utilizza CFX con le funzioni presentate nel capitolo 2.1 andando a risolvere solamente le equazioni della conduzione.

### 3.3 Simulazione CFD del sistema di raffreddamento

La simulazione CFD del comportamento del refrigerante è stata implementata per prima allo scopo di valutare il coefficiente di scambio termico medio e la variazione di temperatura nell'attraversamento del sistema. Tali dati saranno fondamentali per definire le condizioni al contorno nella simulazione su CFX.

La geometria analizzata è riportata in figura. Il refrigerante è alimentato in ingresso al sistema di raffreddamento e viene riportato in uscita dopo aver scambiato calore sul *cooling plate*.



Figura 25- Geometria elemento di raffreddamento

### Mesh

La mesh generata sul dominio è esaedrica e formata da 455 207 elementi con una  $y^+$  di circa 1 avendo deciso di applicare un modello di turbolenza di tipo SST che va a risolvere il profilo di velocità a parete.

Il calcolo approssimato dell'altezza della mesh a parete per ottenere un valore  $y^+$  di circa 1 è stato svolto nel seguente modo: dalla definizione di  $y^+ = \frac{\rho U_\tau y}{\mu}$  si è ricavato il valore di  $y$  (altezza del primo strato di mesh a parete) ponendo  $y^+ = 1$  e inserendo i restanti termini dopo averli stimati dalle formule empiriche seguenti:

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} * C_f * \rho * U_m^2$$

Dove per flussi interni si assume  $C_f = 0.079 Re_d^{-0.25}$

con  $C_f$  coefficiente d'attrito e  $U_m$  velocità media.

Nel nostro caso  $\mu = 0.00611 \text{ kg/(m*s)}$  e  $\rho = 1084 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Il valore stimato di  $y$  ottenuto dal calcolo risulta essere di circa 0.3 mm. Al termine della simulazione si è controllato il valore di  $y^+$  a parete ed è risultato avere un valore massimo di 1.13 e dunque in linea con i valori previsti.

Aumentando il numero di elementi della mesh i risultati non variano dunque l'errore dovuto alla discretizzazione del dominio è minimizzato. Infatti, aumentando gli elementi della mesh a circa 500 000 il valore della temperatura media calcolata in uscita, varia solamente dello 0.2% indicando l'indipendenza della soluzione dalla mesh.

I calcoli saranno dunque svolti sulla mesh da 455 207 elementi.

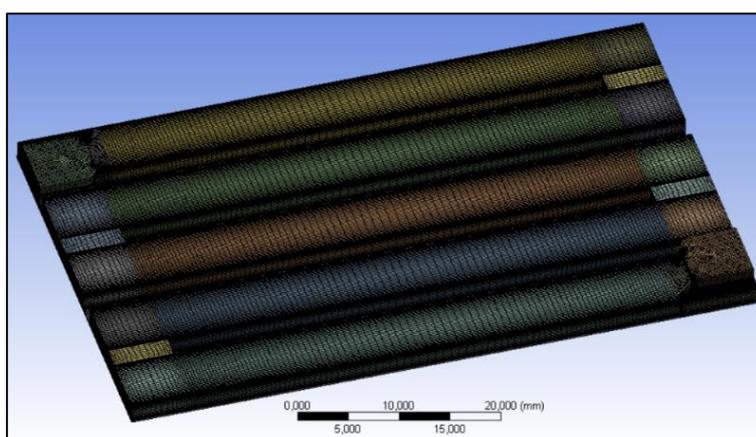


Figura 26- Mesh strutturata generata sul dominio

### Condizioni al contorno

- I. Portata e temperatura del liquido di raffreddamento in ingresso sono fissati rispettivamente a 20 l/min e 10°C.
- II. In uscita è stata fissata una pressione di riferimento di 0 Pascal. Il software, infatti, non necessita di un valore assoluto di pressione (questa incognita infatti compare sempre come derivata nelle equazioni presentate precedentemente) ma va a calcolare la differenza di pressione fra ingresso e uscita.
- III. Su tutte le pareti è stata impostata la condizione di aderenza a parete per il fluido.
- IV. Sulla superficie inferiore è stata fissata una temperatura di 30°C, una temperatura vicina a quella a cui si porterà la parte interna del *cooling plate* nelle condizioni operative più gravose e utile ad investigare la variazione di temperatura che può incontrare il fluido nelle condizioni limite dal punto di vista termico.

- V. Il modello di turbolenza selezionato è quello SST che è un modello ibrido: a parete risolve le equazioni della turbolenza con il metodo  $k - \omega$ , che è il più adatto a risolvere il campo di moto in quella zona mentre lontano da parete utilizza il  $k - \epsilon$ . Tale modello richiede una  $y^+$  vicina ad 1.
- Il criterio di convergenza è stato fissato a 1 e-04 ed è stato raggiunto dopo circa 450 iterazioni. Il problema è stazionario ed è stato adattato uno schema SIMPLE.
- Per la pressione e la quantità di moto si è utilizzato uno schema del secondo ordine mentre per le equazioni della turbolenza del primo ordine.

Come grandezza da monitorare per evidenziare il raggiungimento della convergenza è stata scelta la temperatura media in uscita.

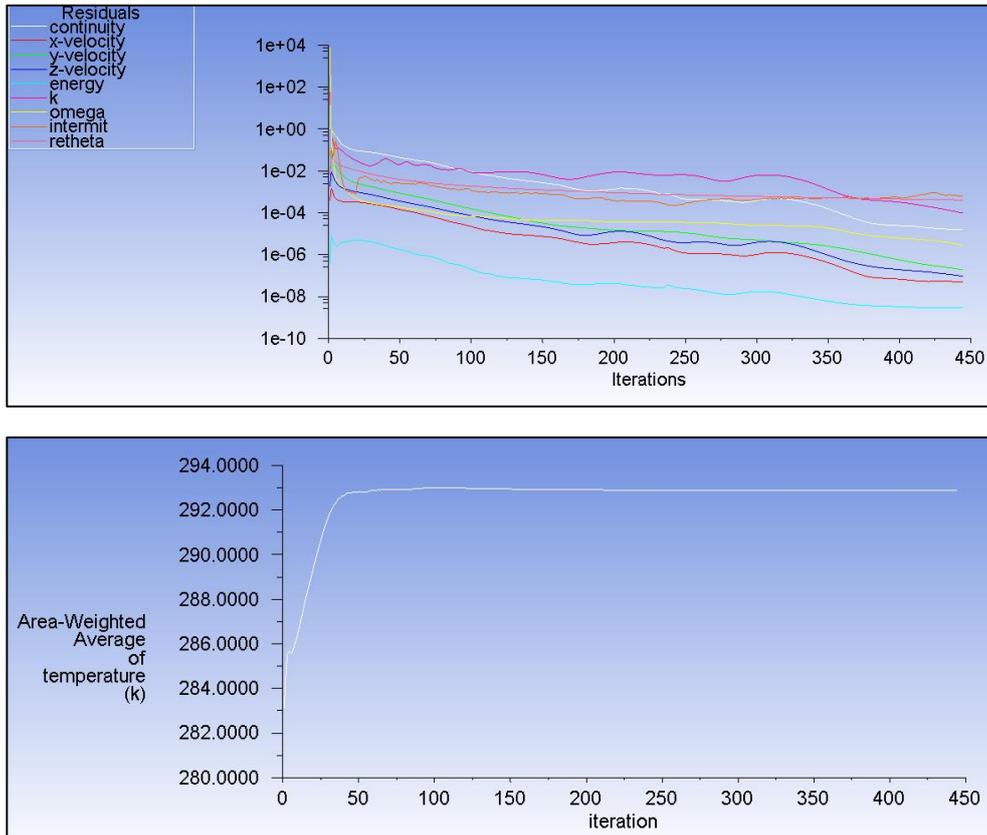


Figura 27- errore relativo (in alto) e valore medio di temperatura in uscita (in basso) in funzione del numero di iterazioni

Il corretto raggiungimento della convergenza è confermato, oltre che dal raggiungimento dei valori prestabiliti sui residui, dalla stabilizzazione del valore della temperatura media in uscita, oltre che dal fatto che la soluzione ottenuta è indipendente dalla mesh.

### Risultati

Un primo risultato utile è il valore della temperatura media in uscita, che consente di individuare la potenza asportata dal fluido in ogni elemento del sistema di raffreddamento. La temperatura media in uscita risulta essere circa 20.4 °C a fronte di una temperatura in ingresso di 10 °C.

Facendo una media sul dominio è possibile valutare il coefficiente di scambio termico medio sul dominio il quale risulta essere circa  $970 \frac{W}{m^2 K}$ .

La temperatura media del refrigerante calcolata sul dominio è di circa 15°C.

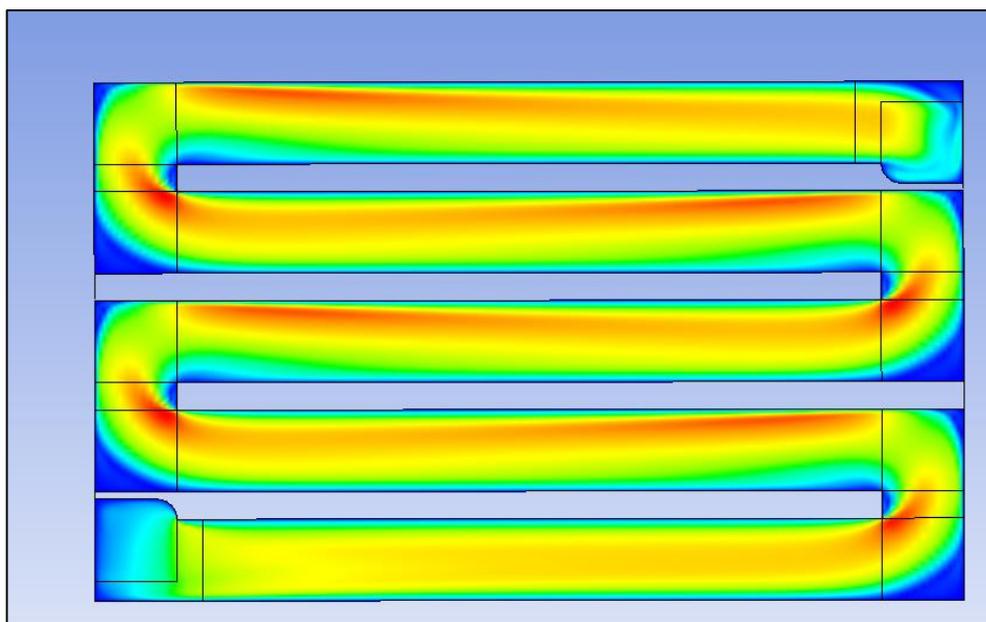


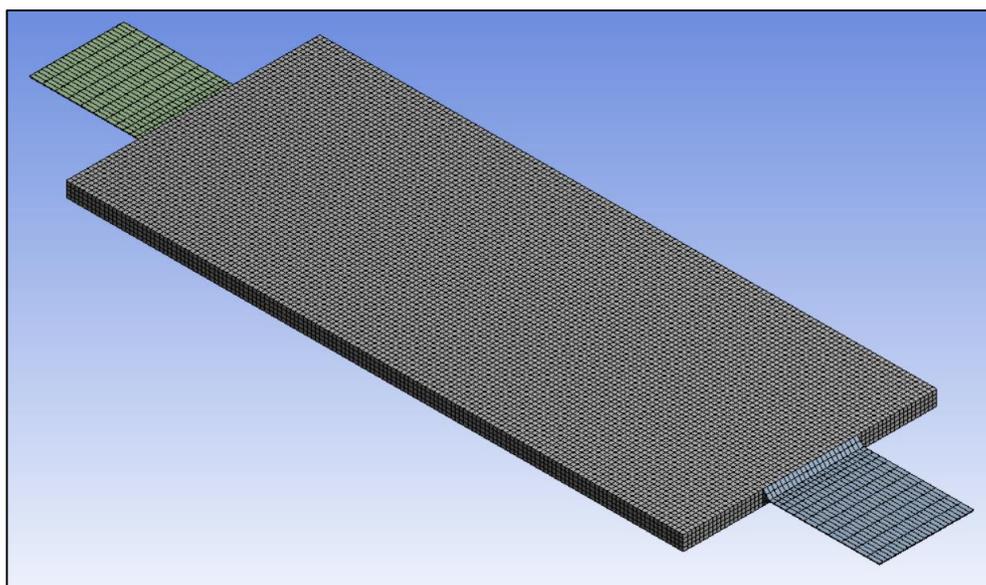
Figura 28- distribuzione di velocità nel piano intermedio

In figura è riportata la distribuzione del modulo della velocità sul piano intermedio del canale, nelle zone in cui cambia direzione il flusso ci sono zone di ricircolo che aumentano lo scambio termico ma allo stesso tempo anche le perdite di carico.

I risultati qui ottenuti sono poi implementati nel modello successivo come condizioni al contorno termiche.

### 3.4 Caratteristiche della cella

Rispetto alle celle analizzate in precedenza, la cella a cui è applicato il sistema di raffreddamento ha i tab posizionati sui lati opposti. Questa configurazione, in base al lavoro svolto in [11], assicura un carico termico leggermente minore rispetto al caso con i tab sullo stesso lato. La cella è riportata in vista isometrica nell'immagine seguente.



*Figura 29- vista isometrica della cella e mesh generata su di essa*

La geometria della cella in figura è stata semplificata allo scopo di generare una mesh meno complessa e più leggera, necessaria per abbassare i tempi di calcolo quando si andranno ad effettuare le simulazioni con anche il sistema di raffreddamento. Questa semplificazione è stata verificata tramite simulazioni e non portando a variazioni significative nei risultati ottenuti, è stata mantenuta per tutte le simulazioni a seguire.

La griglia di calcolo generata su questa cella è stata creata con lo stesso criterio utilizzato sulle celle ai capitoli 2.2 e 2.3 e dunque risulta essere strutturata e con una qualità molto buona. Questa mesh sarà utilizzata al capitolo 3.5 per le celle inserite nel sistema di raffreddamento.

Le caratteristiche della cella sono note e riportate di seguito in funzione del fattore  $F$ :

- $c_p = 413 * F \frac{J}{Kg * K}$
- $k_{xy} = 7.8 * F \frac{W}{m * K}$  conducibilità termica lungo il piano parallelo alla superficie della cella
- $k_z = 0.37 * F \frac{W}{m * K}$  conducibilità termica lungo la direzione normale alla superficie della cella
- $\rho = 864 * F \frac{kg}{m^3}$
- Tab positivo in alluminio
- Tab negativo in rame

Di seguito è riportata la mappa di resistenza interna della cella in funzione di SOC e di temperatura della cella (valori normalizzati).

T [°C] / SOC [%]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-10	1,00	1,00	1,00	0,56	0,48	0,45	0,44	0,45	0,44	0,42
0	0,51	0,51	0,51	0,35	0,37	0,30	0,29	0,30	0,30	0,29
10	0,79	0,79	0,28	0,21	0,31	0,24	0,21	0,21	0,21	0,21
25	0,24	0,24	0,15	0,17	0,20	0,15	0,14	0,14	0,15	0,14
45	0,13	0,13	0,10	0,11	0,12	0,11	0,10	0,11	0,11	0,11
60	0,09	0,09	0,13	0,09	0,09	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09

Figura 30- resistenza della cella normalizzata in funzione di T e SOC

La resistenza interna dipende in realtà anche dalla corrente di scarica, ma la variazione è molto piccola e perciò trascurabile rispetto agli altri fattori.

Per quel che riguarda la resistenza aggiuntiva sui tab dovuta al processo di saldatura, è stato utilizzato lo stesso modello applicato sulle celle al capitolo 2.2 e 2.3 ma con valori modificati in base al processo di saldatura utilizzato dal produttore della cella.

Tale modello contiene anche la dipendenza della resistenza interna dal SOC fornita dal produttore. L'andamento di questa grandezza nel tempo in funzione della corrente di scarica è valutata da un codice O-D sviluppato in azienda che, oltre a dare in uscita i profili di corrente, consente di conoscere lo State of Charge in funzione del tempo. Tali grandezze sono dati di input per il modello termico del pacco batteria presentato nel capitolo successivo.

### 3.5 Simulazione CFD celle con sistema di raffreddamento attivo

#### Condizioni al contorno

Il dominio computazionale è quello riportato in figura 32. In particolare nell'immagine seguente è riportata la vista lungo y con apposte le condizioni al contorno impostate.

- I. Sulla parte esterna del *cooling plate* si è impostata una condizione di tipo misto con una temperatura di 15°C (corrispondente alla temperatura media del refrigerante nell'attraversamento delle serpentine) e un coefficiente di scambio termico di 970 W/m<sup>2</sup>K. Tali valori sono stati ottenuti grazie alle simulazioni presentate nel precedente capitolo.
- II. La generazione di calore è fissata solamente sul dominio attivo della cella e sui tab tramite funzioni dipendenti da diversi parametri che saranno presentate successivamente.
- III. Fra cella e aletta e fra aletta e cooling plate sono presenti materiali di interfaccia in sottili strati il cui scopo è già stato presentato. Il materiale di interfaccia presenta conducibilità termiche piuttosto piccole rispetto a quelle dell'alluminio, aumentando la resistenza termica globale alla dissipazione del calore generato. Tali interfacce non sono state modellate esplicitamente per evitare di appesantire i calcoli, ma è stata sfruttata un'opzione del software CFX che consente di inserire automaticamente all'interfaccia fra due materiali solidi la resistenza termica dovuta ad uno strato di un certo materiale solido con determinate proprietà fisiche. Nella fattispecie si è considerato uno strato di 0.2 e 0.5 mm.

- IV. Un ulteriore e importante strumento del software è la possibilità di inserire condizioni al contorno di periodicità traslazionale. In tal modo è possibile accoppiare termicamente la faccia esterna della cella alla corrispondente zona dell'aletta dalla parte opposta. Ciò consente di avere una condizione al contorno più realistica rispetto all'adiabaticità per la geometria del pacco batteria che è composta dalla ripetizione di più elementi traslati nello spazio (trascurando però gli effetti di bordo).
- V. La temperatura iniziale impostata è di 30°C su tutto il dominio mentre sulle pareti non citate è impostata una condizione di adiabaticità.

### Mesh

La griglia di calcolo generata per questo caso è formata da più corpi su cui sono state generate le griglie in modo indipendente: per le celle la mesh è quella rappresentata in figura 29 mentre per *cooling plate* e aletta è stata generata una mesh strutturata di cui è riportato un particolare in figura 31. All'interfaccia fra i vari corpi la griglia non è conforme e il software va ad interpolare per assicurare la conservazione dell'energia. Per minimizzare l'errore numerico nell'interpolazione all'interfaccia, gli elementi della mesh sui vari corpi sono stati generati in modo da avere dimensioni simili all'interfaccia. Il numero di elementi della mesh ottenuta è di 471 256.

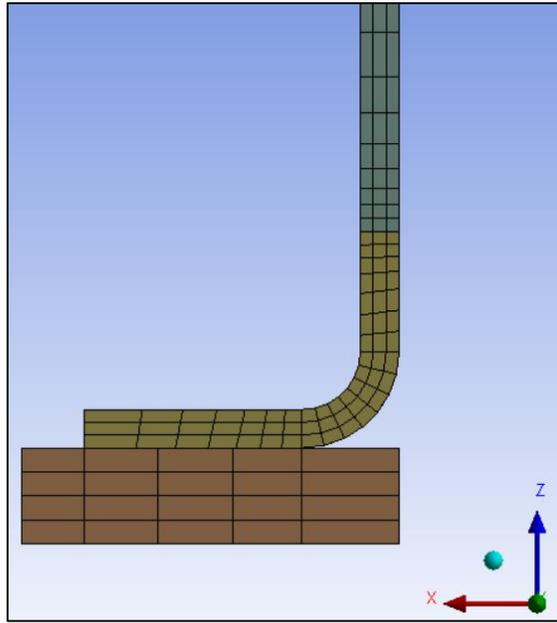


Figura 31- Particolare della mesh strutturata su cooling plate e aletta

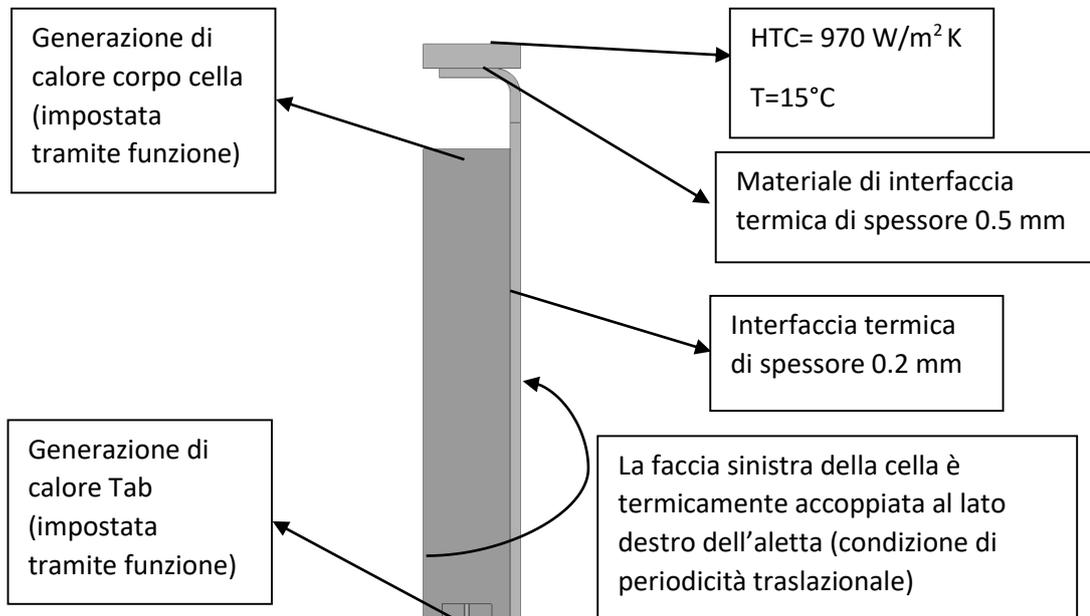


Figura 32- Condizioni al contorno

## Materiali

I materiali impostati nelle simulazioni sono i seguenti:

- Il materiale attivo della cella: le proprietà sono riportate nel paragrafo precedente e rappresentano proprietà medie della cella, essendo essa formata da numerosi strati micrometrici di diversi materiali considerati come un unico corpo per semplificare la simulazione.
- L'alluminio: esso forma il tab positivo delle celle oltre alle alette ed al *cooling plate*.
- Il rame: esso forma il tab negativo delle celle.
- Il materiale di interfaccia termica e le caratteristiche dei materiali sono riportati nella tabella seguente:

	<b>densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>C<sub>p</sub> [J/Kg K]</b>	<b>K [W/m K]</b>
<b>Alluminio</b>	2072	903	237
<b>Rame</b>	8933	385	401
<b>Materiale di interfaccia termica</b>	-	-	1.6

## Subroutine

All'interno del solutore sono state inserite delle subroutine di CFX per catturare il comportamento dinamico delle celle in funzione delle condizioni al contorno termiche, del SOC e della richiesta di corrente.

Le funzioni da inserire nel modello, a seconda del ciclo in analisi sono:

- Corrente in funzione del tempo: varia a seconda del ciclo e della logica di richiesta di potenza di motore e motori elettrici. Sulla base di questa richiesta e della logica applicata il modello 0-D sviluppato internamente determina i profili di SOC conseguenti.
- SOC in funzione del tempo: dipende dal profilo di corrente che a sua volta dipende dalla logica di utilizzo della batteria. Infatti, lo stesso ciclo può essere affrontato in charge depleting o in charge sustaining. Nel primo caso si cerca di ottenere la massima potenza scaricando la batteria per ottenere la massima performance. Nel secondo caso si cerca di ottenere il massimo delle prestazioni ma mantenendo lo

stato di carica della batteria il più costante possibile (dunque durante un ciclo in alcune fasi il motore termico carica la batteria).

- Resistenza interna della cella: è definita per ogni singola cella. Questa funzione è una funzione bidimensionale: per ogni coppia di valori di SOC (che è sempre compreso fra 0 e 100) e temperatura viene dato in uscita il valore della resistenza in Ohm che determina, moltiplicata per la corrente elevata al quadrato, la potenza termica generata nella singola cella. I valori di SOC della funzione sono riportati ogni 10 punti percentuali mentre la temperatura è riportata ogni 15 °C circa. Per valori di temperatura e SOC intermedi la funzione interpola linearmente mentre per valori esterni all'intervallo considerato non si effettua estrapolazione. Il SOC è determinato dal profilo di cui al punto precedente. La temperatura è invece calcolata come un'ulteriore funzione.
- Temperatura media di cella: essa è determinata per ogni cella alla fine di ogni time step come la media volumetrica della temperatura sulla parte attiva della cella agli ioni di litio. Questa temperatura è inserita come input della funzione che calcola la resistenza interna ad ogni time-step.
- Potenza generata: in base alla zona di dominio viene implementata una funzione che determina la generazione di calore a partire dalle equazioni al capitolo 2.1 (i cui parametri sono definiti in base ai materiali e alle funzioni definite ai punti precedenti).
- Potenza dissipata dal refrigerante: è la potenza asportata dal *cooling plate* istante per istante.

Le temperature in vari punti del modello sono riportate durante la soluzione stessa per avere un'indicazione sui risultati già durante la fase di calcolo.

## Equazioni

In questo caso l'equazione risolta è solamente quella della conduzione.

Il problema è considerato transitorio per cui intervengono (e hanno grande importanza) proprietà come la massa e la capacità termica che determinano quanto rapidamente la temperatura cresce o decresce a fronte di un certo livello di sollecitazione termica. La dinamica della conduzione è più lenta rispetto alla convezione e sarebbe dunque sufficiente di norma una discretizzazione temporale di circa 20-30 secondi come indicato in [13]. In

questo caso però il profilo di corrente è molto variabile nel tempo e per poter catturare correttamente la quantità di calore generata sul dominio è necessario affinare il time-step, che è stato quindi portato a 0.5 secondi.

### Considerazioni preliminari

Nel nostro modello non sono stati inseriti alcuni elementi che non hanno un ruolo attivo nella generazione di calore e nella sua dissipazione, come ad esempio le parti plastiche, che hanno il compito di mantenere le celle in una certa posizione e fungere da guida per i cavi di controllo. Questi componenti comunque comportano una massa aggiuntiva rispetto al modello CFD analizzato, che causerebbero picchi di temperatura simulati leggermente più alti rispetto a quelli reali. Un passaggio successivo sarà anche quello di considerare tali componenti. La massa della batteria ha dunque un ruolo molto importante anche dal punto di vista termico.

Oltre a questo aspetto non si è considerato lo scambio termico delle celle con l'aria interna alla batteria. Questo termine è difficilmente valutabile e modellabile a causa della geometria molto irregolare di tali zone. In ogni caso la quantità di aria presente è molto piccola e dunque non si commette un grande errore trascurando questo termine.

Con le tecnologie attuali in ambito di progettazione di batterie si è raggiunto un "*packaging factor*", inteso come il rapporto fra l'energia specifica della cella (in Wh/Kg) e della batteria (in Wh/Kg) di circa 1.8. In futuro si pensa che questo valore possa arrivare fino a 1.5. La diminuzione di tale valore implica la possibilità di installare una batteria con maggiore energia a parità di peso e quindi anche di aumentare l'autonomia del veicolo.

Questo aspetto rappresenta un'ulteriore sfida per il sistema di raffreddamento poiché i picchi di temperatura saranno maggiori a fronte di una diminuzione della massa della batteria a parità di energia e potenza.

## Profili di corrente e di State Of Charge in ingresso

Sono di seguito riportati dei cicli di corrente (e contestualmente ad essi il relativo SOC) utilizzati come input nel modello presentato precedentemente per valutare il comportamento termico della batteria.

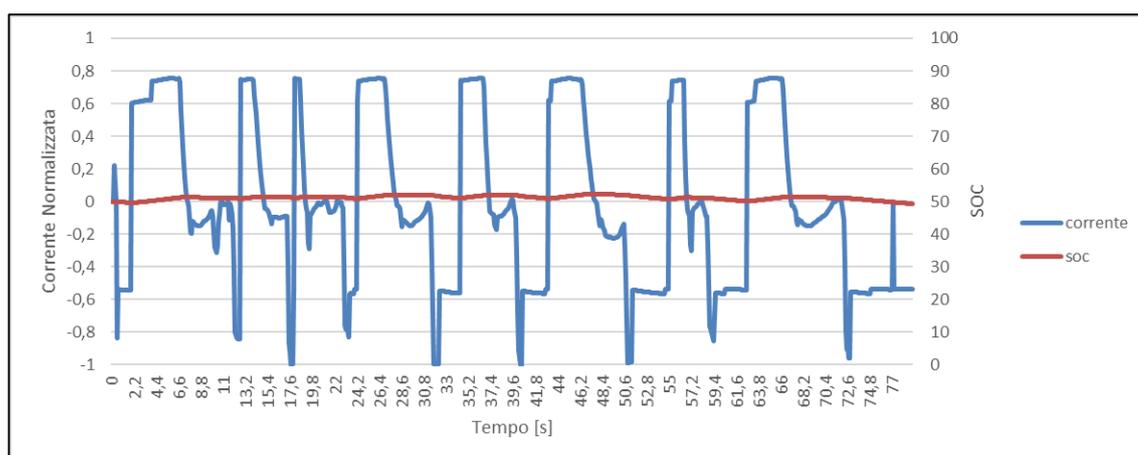


Figura 33- Ciclo di corrente A

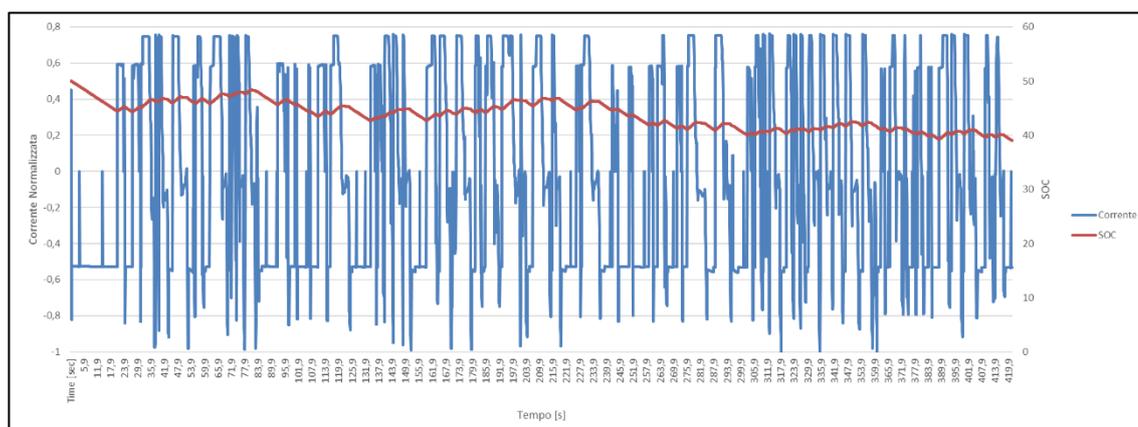


Figura 34- Ciclo di corrente B

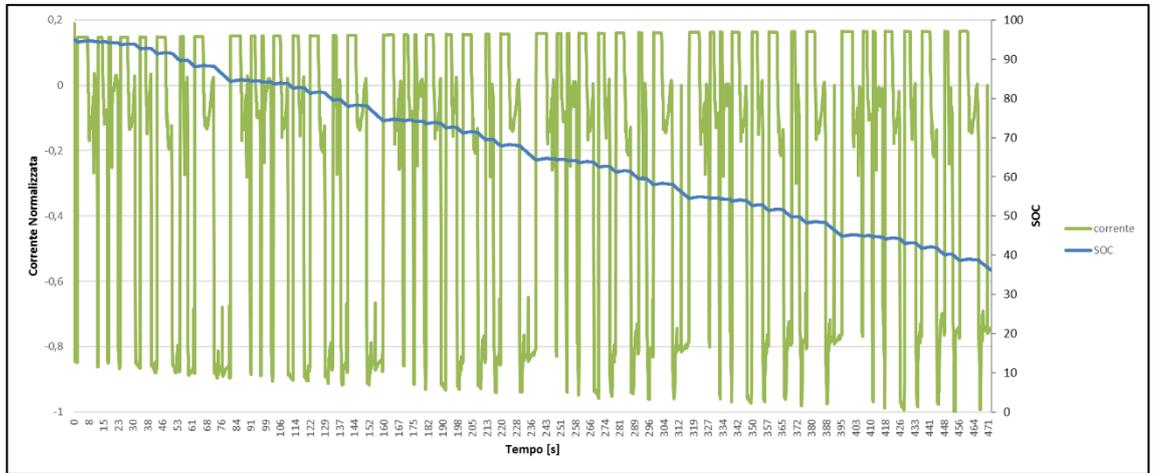


Figura 35- Ciclo di corrente C

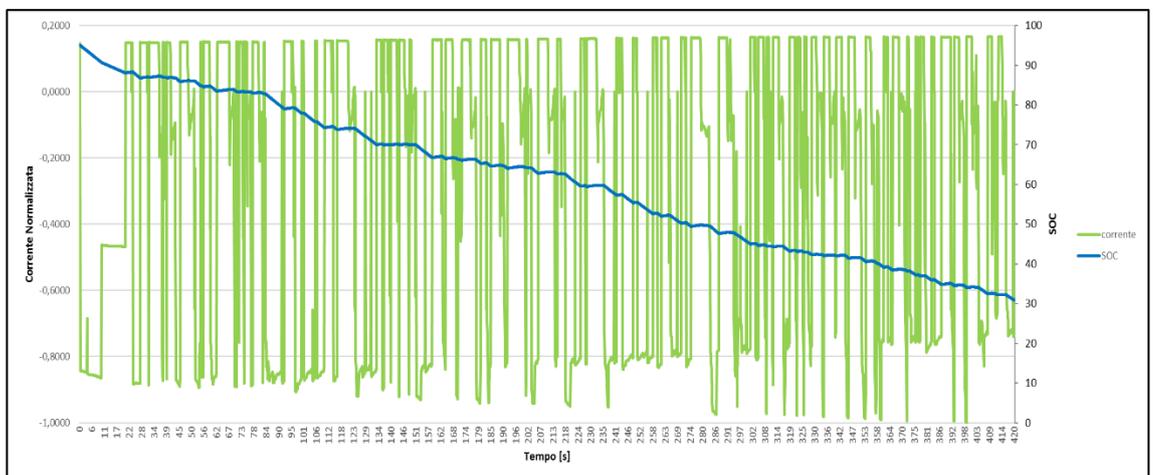


Figura 36- Ciclo di corrente D

### 3.6 Risultati delle simulazioni

I risultati delle simulazioni sono riportati di seguito: viene riportata istante per istante la temperatura media e massima sulla cella per i quattro diversi cicli di corrente. Per alcuni istanti temporali sono riportati anche i *contour* di temperatura in diverse parti del dominio.

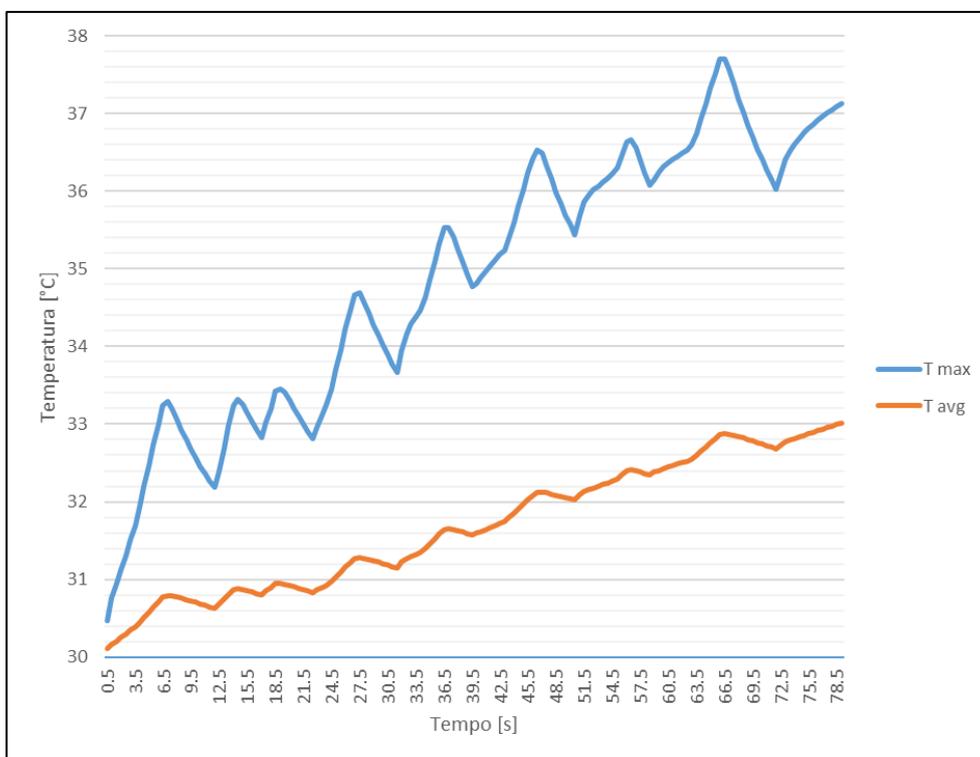


Figura 37- Temperatura massima e media sulla cella centrale, ciclo A

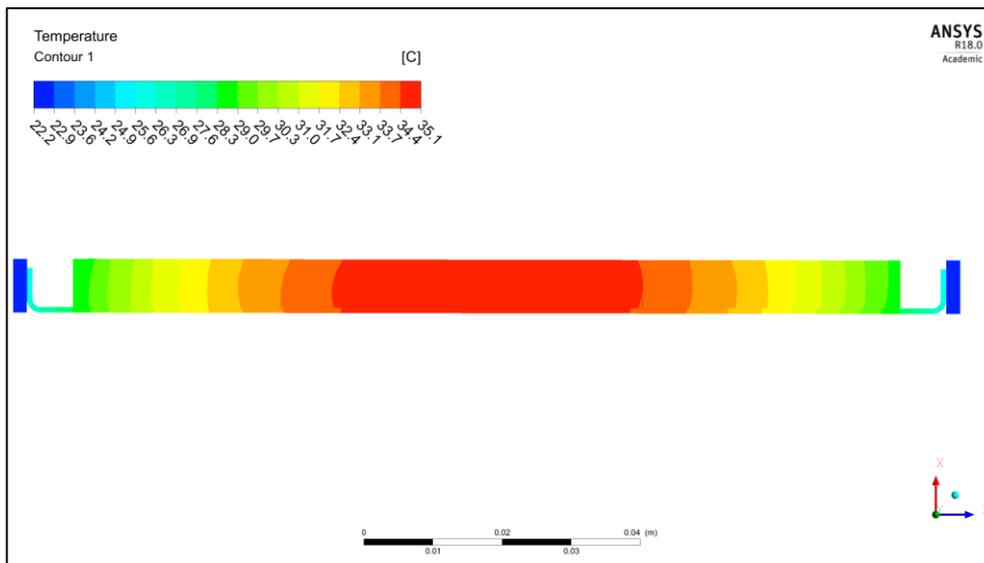


Figura 38- Contour di temperatura a fine ciclo A, sezione XZ della cella

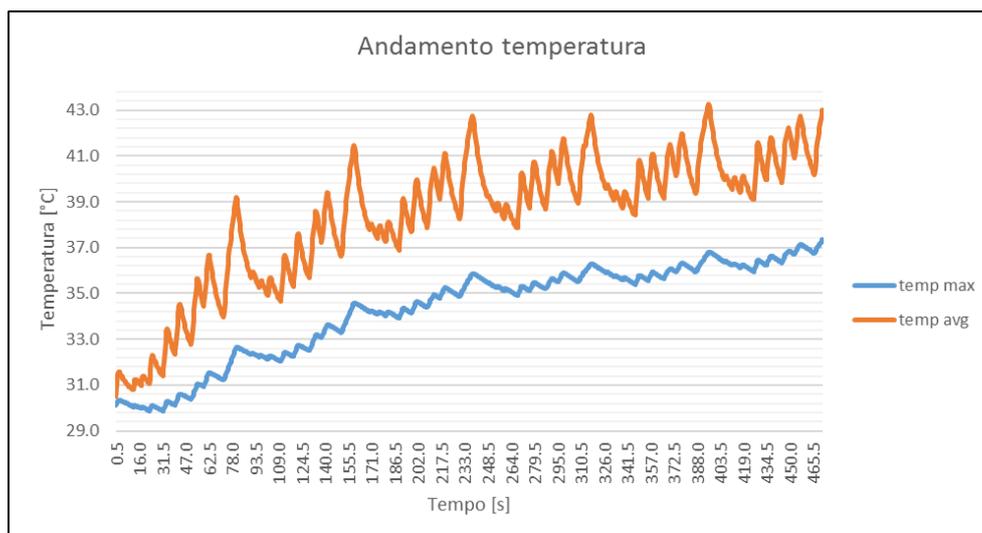


Figura 39- Temperatura massima e media sulla cella, ciclo B

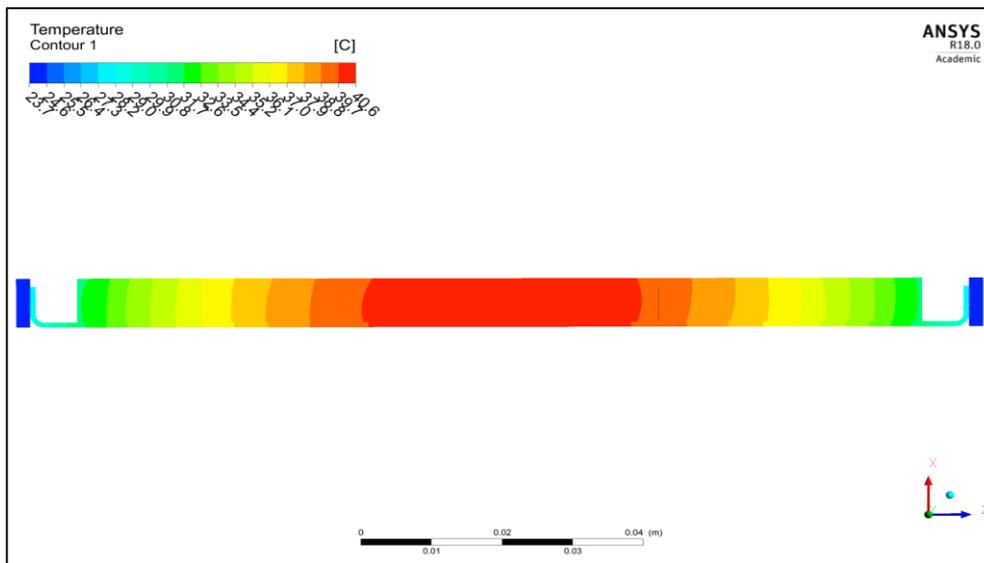


Figura 40- Contour di temperatura a fine ciclo B, sezione XZ della cella

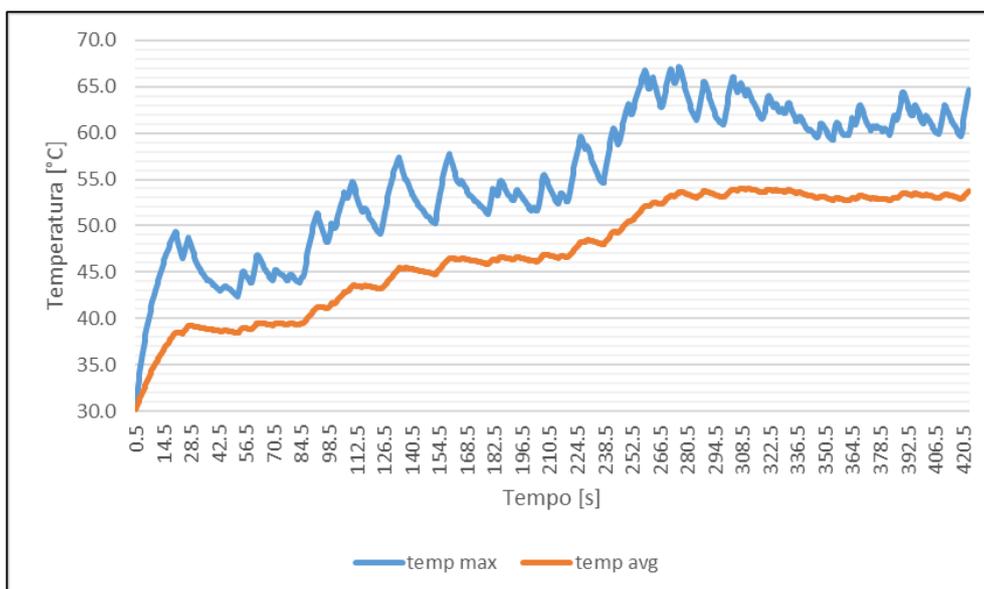


Figura 41- Temperatura massima e media sulla cella, ciclo C

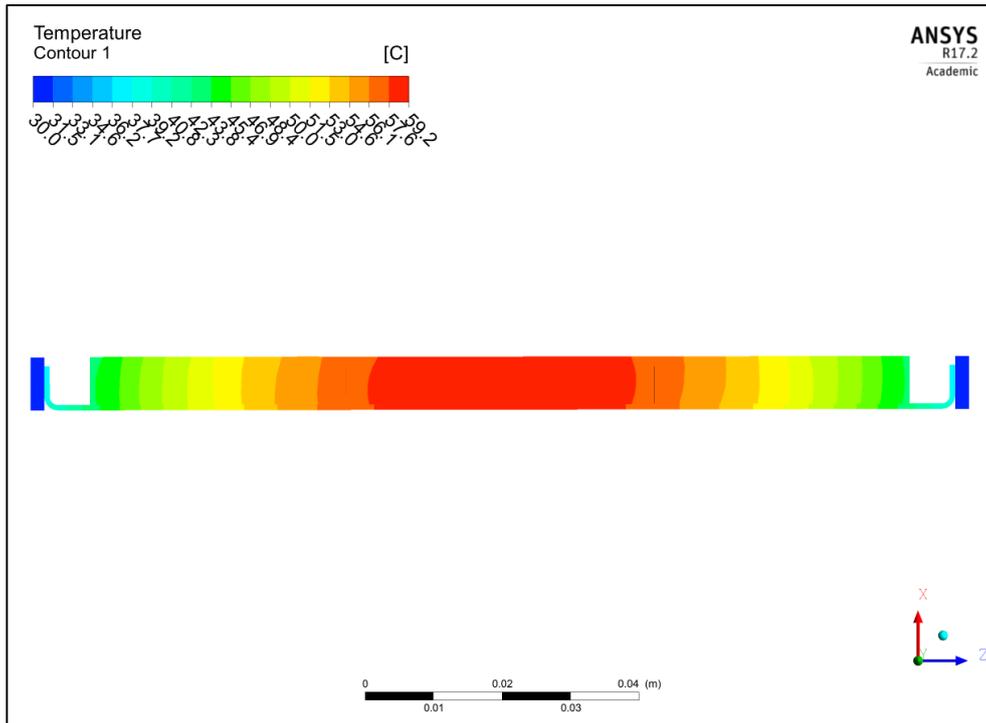


Figura 42- Contour di temperatura a fine ciclo C, sezione XZ della cella

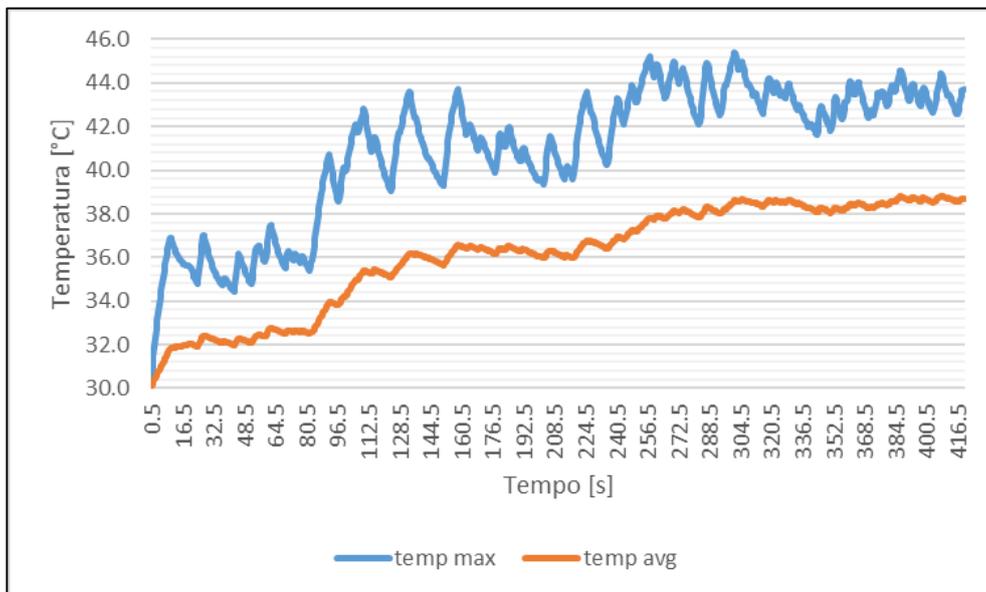


Figura 43- Temperatura massima e media sulla cella, ciclo D

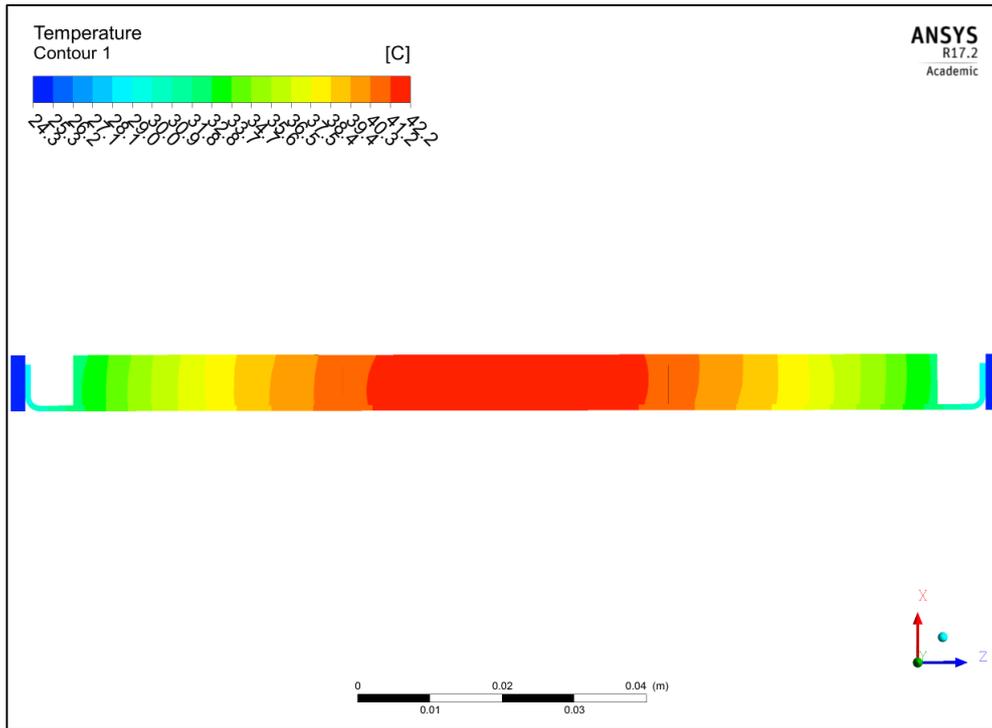


Figura 44- Contour di temperatura a fine ciclo D, sezione XZ della cella

La temperatura massima raggiunta sulla cella è sempre mantenuta sotto controllo dal sistema di raffreddamento e ampiamente al di sotto dei limiti di sicurezza della cella su tutti i cicli. L'unica criticità è individuabile nell'ultima parte del ciclo C. In tali condizioni può risultare necessario un incremento della potenza dissipata dal sistema di raffreddamento (ad esempio incrementando la portata del sistema di raffreddamento) per limitare l'invecchiamento della cella. Va comunque tenuto conto del fatto che, non avendo considerato nel modello alcuni componenti (si veda "considerazioni preliminari") che ne aumentano la massa, le temperature simulate sono maggiori rispetto a quelle che si avranno sperimentalmente sulla cella.

La differenza di temperatura massima all'interno del materiale attivo della cella, nei cicli più critici dal punto di vista termico supera per alcuni intervalli di tempo i 5 °C, che è il valore massimo consigliato. Anche in questo caso va tenuta in conto la massa aggiuntiva della batteria che porta ad un abbattimento dei picchi di temperatura e si può considerare un incremento della potenza asportata dal fluido per portare ad una diminuzione della differenza di temperatura sulla cella.

I punti più caldi risultano essere sempre corrispondenti ai tab. Il contatto fra i tab di materiale diverso comporta una omogeneizzazione della temperatura tra i due rispetto ai casi rilevati nei paragrafi 2.2 e 2.3.

Un passo ulteriore in avanti sarà considerare anche la resistenza aggiuntiva determinata dal processo di saldatura fra i tab di due celle distinte collegate fra di loro.



## 4 SVILUPPI FUTURI

Il passo successivo al modello qui presentato può essere una validazione, tramite una campagna sperimentale, delle temperature raggiunte sia dalla singola cella “in aria” che delle celle all’interno del pacco batteria. Validato il modello, può essere utile passare alla costruzione di un modello CFD completo del pacco batteria, incluse le connessioni fra le celle (che avvengono tramite saldature che possono generare una resistenza elettrica e termica aggiuntiva) e il flusso del refrigerante all’interno del cooling plate.

Migliorare il sistema di raffreddamento della batteria significa anche minimizzare la resistenza termica presente fra la cella e il fluido refrigerante. Questo può essere ottenuto ad esempio utilizzando materiali tecnologicamente più avanzati come ad esempio il TPG (*thermal pyrolytic graphite*), come indicato in [12], a parziale sostituzione dell’alluminio delle alette o scegliendo materiali di interfaccia termica con una maggiore conducibilità termica.

Il TPG offre i seguenti vantaggi:

- conducibilità termica molto elevata di circa  $1700 \frac{W}{m^2K}$
- densità di  $2260 \frac{Kg}{m^3}$  (consente la costruzione di un pacco batteria più leggero)

Nello studio di cui qui sono riportati i risultati si è analizzata la temperatura raggiunta dalle celle ipotizzando di utilizzare come materiale delle alette il TPG in un caso e utilizzando un materiale con una conducibilità di  $5 \frac{W}{mK}$  come interfaccia termica (esistono materiali sul mercato con queste caratteristiche) nell’altro.

Da questa analisi preliminare risulta evidente come la maggiore resistenza termica sia dovuta al flusso di calore nell’aletta.

Una conseguenza importante dell’abbassamento della resistenza termica è la diminuzione della differenza di temperatura sulla cella. Dai dati di temperatura riportati si evince che l’introduzione di un eccellente conduttore come il TPG porta ad una forte omogeneizzazione della temperatura sulla cella.

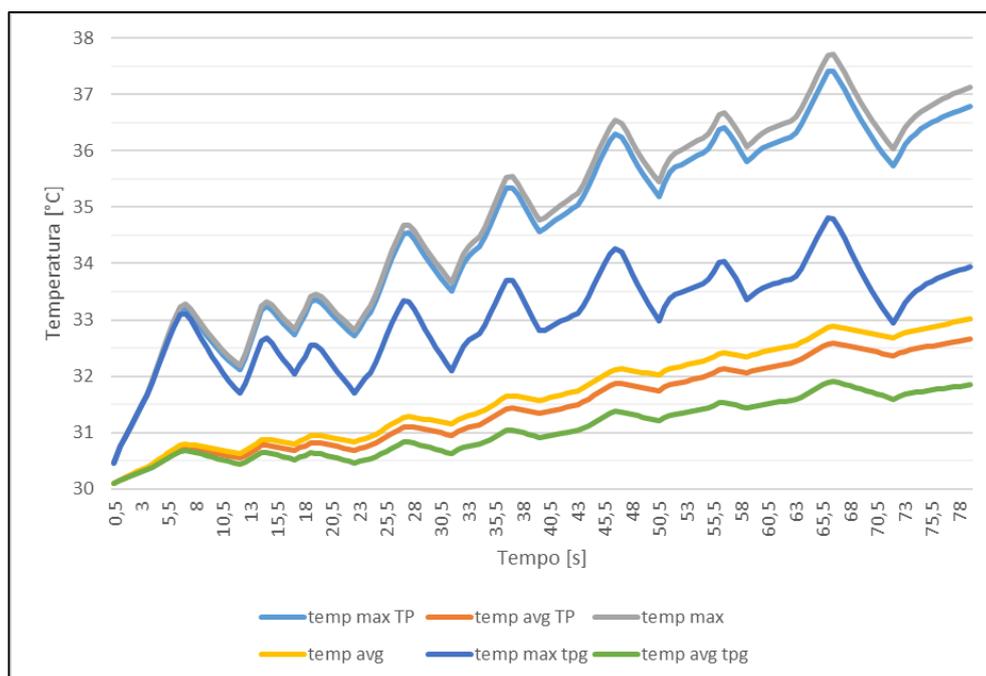


Figura 45- andamento sul ciclo A della temperatura massima e media con l'applicazione di TPG e di un materiale come thermal pad (TP) più conduttivo

Un altro aspetto di grande importanza è il dimensionamento del sistema di raffreddamento: a seconda della potenza termica che si vuole asportare dalla batteria si deve dimensionare il circuito del fluido refrigerante, che a sua volta può essere raffreddato ad esempio da un ciclo frigorifero a compressione, un sistema altamente energivoro. Nel caso di un carico termico ciclico come quello a cui sono sottoposte le celle della batteria (essendo questa una fonte di energia limitata) può essere utile l'implementazione di un sistema ad accumulo di calore latente tramite l'utilizzo di PCM (*phase change materials*) abbinati ad un sistema di raffreddamento a calore sensibile (come quello oggetto della presente tesi ma sottodimensionato). L'effetto di questi materiali tecnologicamente avanzati è analogo a quello della massa ma con potenzialità energetiche molto più elevate. Come citato nel capitolo 3.5 si sta andando verso pacchi batteria sempre più leggeri e pertanto con minore inerzia termica e dunque risulta sempre più utile individuare un sistema di accumulo passivo di energia termica alternativo e più efficiente [8].

Questi materiali permettono di accumulare il calore latente grazie al cambiamento di fase consentendo di mantenere temperature più basse nella fase di scarica della batteria, rilasciando il calore latente più avanti nel tempo (durante la fase di condensazione del PCM)

quando non è richiesta un'elevata corrente alla batteria. Ciò è possibile poiché per molti materiali la quantità di energia accumulabile come calore latente è fra 1 e 2 ordini di grandezza più grande di quella accumulabile come calore sensibile. Naturalmente il PCM deve essere tale da avere la temperatura di fusione ad una temperatura compatibile con la vita ottimale della batteria ed una elevata stabilità se sottoposto ai cicli termici caratteristici di una batteria. Di non secondaria importanza è la compatibilità chimica fra PCM e cella che non deve comprometterne la sicurezza.

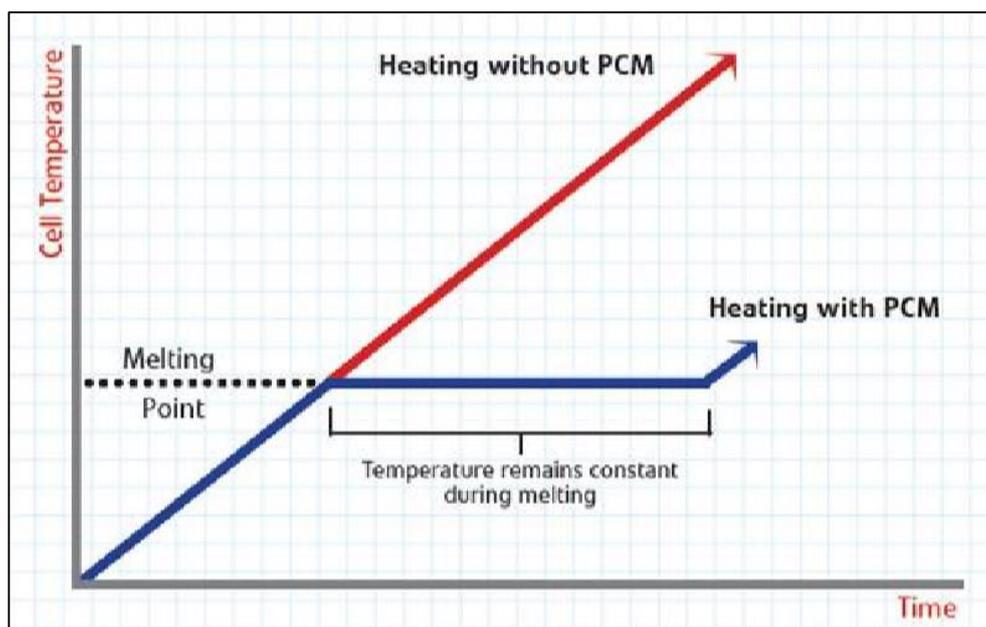


Figura 46- principio di funzionamento dei PCM

Nell'immagine sopra riportata, tratta da [14], è riportato il meccanismo di funzionamento dei PCM. In base allo studio riportato in tale elaborato, il sistema di raffreddamento a PCM risulta essere uno dei più efficaci dal punto di vista delle temperature e uno dei meno energivori rendendolo uno dei possibili candidati per i sistemi di raffreddamento del futuro.



## 5 CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi verte alla definizione di un modello termico di cella agli ioni di litio per applicazione su veicoli ibridi allo scopo di valutare il comportamento termico di un pacco batteria.

La validazione del modello tramite dati sperimentali ha portato risultati molto buoni sia in termini quantitativi che qualitativi su entrambe le celle considerate, sia a corrente costante che su un ciclo di corrente rappresentativo della missione del componente.

Questo modello è stato poi applicato al pacco batteria completo, comprensivo di sistema di *cooling*, allo scopo di valutarne l'efficacia. Un ulteriore passo avanti è rappresentato dalla modellazione completa di tutti gli elementi interni alla batteria, la cui capacità termica può influenzare la temperatura raggiunta dalle celle.

La metodologia riportata in questo lavoro di tesi può essere utile nelle prime fasi di sviluppo e progettazione delle batterie per valutare la corretta scelta dei materiali, della geometria, del refrigerante, delle lavorazioni e delle diverse tipologie del sistema di raffreddamento.

Infine, è stata fatta un'analisi termica comparativa sulle celle per valutare l'impatto dell'introduzione di materiali diversi ed innovativi che potrebbero migliorare l'efficienza del pacco batteria.



## Bibliografia

[1] An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The finite volume method, H.K. Versteeg and W. Malalasekera, Pearson.

[2] Characterizing Thermal Runaway of Lithium-ion Cells in a Battery System Using Finite Element Analysis Approach, Kim F.Yeow and Ho Teng, AVL Powertrain Engineering Inc.

[3] 3D electro-thermal modelling and experimental validation of lithium polymer-based batteries for automotive applications, Zul Hilmi Che Daud, Daniela Chrenko, Fabien Dos Santos, El-Hassane Aglzim, Alan Keromnes and Luis Le Moyne.

[4] Thermal Management of Lithium-Ion Pouch Cell with Indirect Liquid Cooling using Dual Cold Plates Approach, Satyam Panchal, Scott Mathewson, Roydon Fraser, Richard Culham, and Michael Fowler, University of Waterloo.

[5] Application of CAEBAT Full Field Approach for a Liquid-Cooled Automotive Battery Pack, Erik Yen, Kuo-huey Chen, Taeyoung Han, and Bahram Khalighi General Motors Co.

[6] Heat generation in high power prismatic Li-ion battery cell with  $\text{LiMnNiCoO}_2$  cathode material, Yasir Abdul-Quadir, Tomi Laurila, Juha Karppinen, Kirsi Jalkanen, Kai Vuorilehto, Lasse Skogström and Mervi Paulasto-Kröckel, Aalto University.

[7] Thermal Design for the Pouch-Type Large-Format Lithium-Ion Batteries. Thermo-Electrical Modeling and Origins of Temperature Non-Uniformity, BinWu, Zhe Li and Jianbo Zhang, State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing, People's Republic of China.

[8] Thermal management of electric vehicle battery systems, Ibrahim Dincer, Halil S. Hamut, Nader Javani, Wiley.

[9] A Complete Li-Ion Battery Simulation Model, Xiao Hu and Scott Stanton, Ansys Inc.

[10] Slides del corso di Termofluidodinamica Applicata M, Antonio Barletta.

[11] Battery Electrical Vehicles-Analysis of Thermal Modelling and Thermal Management, Ahmadou Samba.

[12] Reducing Temperature Gradients in High-Power, Large-Capacity Lithium-Ion Cells through Ultra-High Thermal Conductivity Heat Spreaders Embedded in Cooling Plates for Battery Systems with Indirect Liquid Cooling, Kim F. Yeow and Ho Teng, AVL Powertrain Engineering Inc.

[13] Battery modeling based on the coupling of electrical circuit and computational fluid dynamics, Shaohua Lin and Scott Stanton, Ansys, Wenyu Lian, General Motors.

[14] Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles, Jiling Li and Zhen Zhu, Chalmers University of Technology.

[15] Electro-thermal Modeling of Lithium-ion Batteries, Maryam Yazdan Pour, M.Sc., Iran University of Science and Technology, 2011

[16] Modern Electric Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, Fundamentals Theory and Design, Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi.

[17] Turbulent Flows. S.B. Pope, Cambridge University Press.

[18] Design and Simulation of Lithium-Ion Battery Thermal Management System for Mild Hybrid Vehicle Application, Uddin, A. and Ku, J. ; SAE Technical Paper 2015-01-1230