

# POLITECNICO DI TORINO

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

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

## **Simulazione MULTYPHYSICS termo- fluidomeccanica di celle al litio per batterie di veicoli ibridi-elettrici**



**Relatore**

prof. Aurelio Somà

**Candidato**

Sebastiano Corona  
Matricola 228294

Dicembre 2018



# Sommario

Abstract.....	I
Introduzione .....	III
Capitolo 1 - Stato dell'arte.....	1
1.2. <i>La batteria al litio: funzionamento e configurazione</i> .....	3
1.3. <i>Analisi termica e problematiche</i> .....	5
1.3.1. <i>Thermal runaway</i> .....	6
1.3.2. <i>Prestazioni a basse temperature</i> .....	8
1.4. <i>Modelli elettrici e termici</i> .....	8
1.4.1. <i>Modello elettrochimico</i> .....	9
1.4.2. <i>Modello circuitale equivalente</i> .....	13
1.4.3. <i>Modello empirico</i> .....	17
1.4.4. <i>Modello termico</i> .....	19
1.5. <i>Sistemi di raffreddamento</i> .....	21
1.5.1. <i>Aria</i> .....	22
1.5.2. <i>Liquido</i> .....	25
1.5.3. <i>Heat pipes</i> .....	28
1.5.4. <i>PCM</i> .....	29
Capitolo 2 – Creazione modello geometrico .....	31
2.1. <i>Geometria batteria</i> .....	31
2.2. <i>Generazione mesh</i> .....	39
Capitolo 3 – Analisi CFD .....	43
3.1. <i>Definizione modello elettro-termico</i> .....	44
3.2. <i>Materiali</i> .....	48
3.2.1. <i>Materiale per gli elementi in tensione</i> .....	49
3.2.2. <i>Materiale per gli elementi non in tensione</i> .....	52
3.3. <i>Condizioni al contorno</i> .....	54
3.4. <i>Risultati simulazione e primo confronto con valori sperimentali</i> .....	55
3.4.1. <i>Risultati analisi CFD</i> .....	55
3.4.2. <i>Validazione preliminare dei risultati</i> .....	59
Capitolo 4 – Analisi numerica strutturale .....	63
4.1. <i>Setup analisi strutturale</i> .....	63
4.2. <i>Proprietà meccaniche materiali</i> .....	65
4.3. <i>Risultati analisi strutturale</i> .....	68
Capitolo 5 – Analisi CFD modulo .....	77

5.1. <i>Confronto raffreddamento in serie e in parallelo</i> .....	78
5.2. <i>Determinazione condizioni di raffreddamento ottimali</i> .....	85
<b>Capitolo 6 – Analisi di sensitività</b> .....	<b>87</b>
6.1. <i>Modifica geometria cella</i> .....	87
6.2. <i>Variazione temperatura ambiente</i> .....	93
6.3. <i>Modifica parametri ECM</i> .....	95
6.3.1 <i>Validazione modello numerico</i> .....	97
<b>Capitolo 7 – Conclusioni</b> .....	<b>105</b>
<b>Appendice</b> .....	<b>109</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>115</b>

## Indice delle figure

<b>Figura 1</b> - Due soluzioni diverse per cella, modulo e pacco batteria per veicoli elettrici [2] .....	3
<b>Figura 2</b> - Principio di funzionamento della batteria al litio durante carica e scarica [2] [6] .....	4
<b>Figura 3</b> - Tipi di cella al litio [2].....	5
<b>Figura 4</b> - Confronto tra la perdita di capacità per cicli UDDS e US06 [10] .....	7
<b>Figura 5</b> - Rappresentazione del modello elettrochimico P2D [3].....	10
<b>Figura 6</b> - Rappresentazione del modello elettrochimico SP [3] .....	13
<b>Figura 7</b> - Rappresentazione dei diversi tipi di circuiti equivalenti [2]: <b>a.</b> Modello Rint; <b>b.</b> Modello RC; <b>c.</b> Modello Thevenin; <b>d.</b> Modello PNGV .....	15
<b>Figura 8</b> - Modello circuitale equivalente di una cella [18] .....	17
<b>Figura 9</b> - Schema generico raffreddamento ad aria [2] [23] [5] .....	22
<b>Figura 10</b> - Confronto tra raffreddamento in serie e in parallelo [21].....	23
<b>Figura 11</b> - Raffreddamento di un modulo con a) convezione naturale e b) convezione forzata [22] .....	24
<b>Figura 12</b> - Schema generico raffreddamento a liquido [2] [23] [5] .....	26
<b>Figura 13</b> – <b>a.</b> raffreddamento con tubi a forma d'onda; <b>b.</b> raffreddamento con modulo avvolto da un involucro [1].....	27
<b>Figura 14</b> - Sistema di raffreddamento “cold plate” [26] .....	27
<b>Figura 15</b> - Schema generale di un raffreddamento con utilizzo di heat pipes [16] .....	28
<b>Figura 16</b> - Schema generale di un raffreddamento tramite PCM [2].....	29
<b>Figura 17</b> - Confronto tra diversi materiali candidati all'utilizzo per soluzioni PCM [16] .....	30
<b>Figura 18</b> - CAD cella .....	32
<b>Figura 19</b> - Dimensioni principali della cella .....	32
<b>Figura 20</b> - Geometria cella di tipo pouch.....	33
<b>Figura 21</b> - Dimensioni parte attiva.....	34
<b>Figura 22</b> - Dimensioni terminali in rame .....	34
<b>Figura 23</b> - CAD cella con strato d'aria .....	35
<b>Figura 24</b> - Dimensioni strato d'aria .....	36
<b>Figura 25</b> - CAD con separatori cartacei .....	37
<b>Figura 26</b> - Dimensioni separatore cartaceo superiore.....	37
<b>Figura 27</b> - Dimensioni separatore cartaceo inferiore.....	38
<b>Figura 28</b> - Dimensioni case esterno .....	38
<b>Figura 29</b> - Mesh ottenuta con MultiZone <b>a.</b> del case; <b>b.</b> della parte attiva .....	40
<b>Figura 30</b> - Mesh ottenuta con MultiZone dei terminali.....	40
<b>Figura 31</b> – Mesh complessiva della cella.....	41
<b>Figura 32</b> - Circuiti elettrici usati nel modello ECM [19].....	44
<b>Figura 33</b> - Model Option del modello MSMD.....	46
<b>Figura 34</b> - Zone conduttive del modello MSMD .....	48
<b>Figura 35</b> - Composizione degli strati della parte attiva [19].....	50
<b>Figura 36</b> - Condizioni al contorno termiche di "wall-case_zone" .....	54
<b>Figura 37</b> - Posizione termoresistenza.....	56
<b>Figura 38</b> - Profilo temperatura con corrente di scarica 1C .....	57
<b>Figura 39</b> - Profilo temperatura con corrente di scarica 2C .....	58
<b>Figura 40</b> - Profilo temperatura con corrente di scarica 3C .....	58
<b>Figura 41</b> - Profilo temperatura con corrente di scarica 0.5C .....	59
<b>Figura 42</b> - Strumentazione per test sperimentali [34].....	60

<b>Figura 43</b> - Confronto profilo temperatura con corrente di scarica 1C .....	61
<b>Figura 44</b> - Confronto profilo temperatura con corrente di scarica 2C .....	61
<b>Figura 45</b> - Confronto profilo temperatura con corrente di scarica 3C .....	62
<b>Figura 46</b> - Mesh per analisi strutturale.....	63
<b>Figura 47</b> - Direzioni principali di inerzia per legno [32].....	67
<b>Figura 48</b> - Andamento temporale del valore massimo dello stress equivalente .....	69
<b>Figura 49</b> - Vista assonometrica della tensione equivalente della cella .....	70
<b>Figura 50</b> - Vista nel piano ZY della tensione equivalente della cella .....	70
<b>Figura 51</b> - Andamento temporale del valore massimo dello strain equivalente .....	71
<b>Figura 52</b> - Vista assonometrica della deformazione equivalente della cella.....	71
<b>Figura 53</b> - Vista nel piano ZY della deformazione equivalente della cella .....	72
<b>Figura 54</b> - Andamento temporale del valore massimo positivo e negativo della deformazione lungo X .....	72
<b>Figura 55</b> - Vista assonometrica della deformazione lungo X della cella .....	73
<b>Figura 56</b> - Andamento temporale del valore massimo e minimo della deformazione lungo Y ....	73
<b>Figura 57</b> - Vista assonometrica della deformazione lungo Y della cella .....	74
<b>Figura 58</b> - Andamento temporale del valore massimo e minimo della deformazione lungo Z.....	74
<b>Figura 59</b> - Vista assonometrica della deformazione lungo Z della cella .....	75
<b>Figura 60</b> - Vista nel piano ZY della deformazione lungo Z della cella .....	75
<b>Figura 61</b> - Modulo composto da due celle in serie.....	77
<b>Figura 62</b> - Dimensioni principali del modulo.....	78
<b>Figura 63</b> – a. Raffreddamento in serie del modulo; b. Raffreddamento in parallelo del modulo .	79
<b>Figura 64</b> – a. Punti P1 e P2; b. Punto P3 .....	80
<b>Figura 65</b> - Punto P4 .....	81
<b>Figura 66</b> - Confronto temperatura punti P1 e P2.....	82
<b>Figura 67</b> - Confronto temperatura punto P3.....	83
<b>Figura 68</b> - Dettaglio temperatura punto P3 .....	83
<b>Figura 69</b> - Confronto temperatura punto P4.....	84
<b>Figura 70</b> - Confronto temperatura punti P1 e P4.....	84
<b>Figura 71</b> - Temperatura ottenuta variando la velocità del flusso nel punto P2 .....	85
<b>Figura 72</b> - Temperatura ottenuta variando la velocità del flusso nel punto P4 .....	85
<b>Figura 73</b> - Temperatura ottenuta variando la velocità del flusso nel punto P2 .....	86
<b>Figura 74</b> - Geometria “G0” .....	87
<b>Figura 75</b> - Geometria “G1” .....	88
<b>Figura 76</b> - Geometria “G2” .....	88
<b>Figura 77</b> - Punto di misurazione esterno .....	89
<b>Figura 78</b> - Punto di misurazione interno .....	90
<b>Figura 79</b> - Confronto temperature con corrente di scarica 0.5C al variare della geometria .....	91
<b>Figura 80</b> - Confronto temperature con corrente di scarica 1C al variare della geometria .....	91
<b>Figura 81</b> - Confronto temperature con corrente di scarica 2C al variare della geometria .....	92
<b>Figura 82</b> - Confronto temperature con corrente di scarica 3C al variare della geometria .....	92
<b>Figura 83</b> - Confronto temperature con corrente di scarica 0.5C al variare della temperatura ambiente.....	94
<b>Figura 84</b> - Confronto temperature con corrente di scarica 3C al variare della temperatura ambiente.....	94
<b>Figura 85</b> - Confronto profilo temperatura con corrente di scarica 25 A .....	97
<b>Figura 86</b> - Confronto tensione con corrente di scarica 25 A .....	98
<b>Figura 87</b> - Confronto profilo temperatura con corrente di scarica 50 A .....	98

<b>Figura 88</b> - Confronto tensione con corrente di scarica 50 A .....	99
<b>Figura 89</b> - Confronto profilo temperatura con corrente di scarica 75 A .....	99
<b>Figura 90</b> - Confronto tensione con corrente di scarica 75 A .....	100
<b>Figura 91</b> - Confronto temperatura con Rs dipendente e indipendente dal SOC .....	100
<b>Figura 92</b> - Confronto temperatura con corrente di scarica 25 A con nuovi parametri Rs/SOC ..	101
<b>Figura 93</b> - Confronto tensione con corrente di scarica 25 A con nuovi parametri Rs/SOC .....	102
<b>Figura 94</b> - Confronto temperatura con corrente di scarica 50 A con nuovi parametri Rs/SOC ..	102
<b>Figura 95</b> - Confronto tensione con corrente di scarica 50 A con nuovi parametri Rs/SOC .....	103
<b>Figura 96</b> - Confronto temperatura con corrente di scarica 75 A con nuovi parametri Rs/SOC ..	103
<b>Figura 97</b> - Confronto tensione con corrente di scarica 25 A con nuovi parametri Rs/SOC .....	104

## Indice delle tabelle

<b>Tabella 1</b> - Proprietà di diverse batterie.....	2
<b>Tabella 2</b> - Named Selection degli elementi della cella.....	41
<b>Tabella 3</b> - Tabella parametri in Model Options.....	47
<b>Tabella 4</b> - Parametri polinomiali di resistenze e condensatori.....	47
<b>Tabella 5</b> - Parametri polinomiali tensione a circuito aperto .....	47
<b>Tabella 6</b> - Proprietà dei terminali .....	49
<b>Tabella 7</b> - Proprietà degli elementi costituenti la parte attiva .....	50
<b>Tabella 8</b> - Valori effettivi delle proprietà della parte attiva .....	52
<b>Tabella 9</b> – Proprietà dell’aria .....	52
<b>Tabella 10</b> - Proprietà del separatore cartaceo .....	53
<b>Tabella 11</b> – Proprietà del case esterno .....	53
<b>Tabella 12</b> - Output analisi CFD per il punto P .....	56
<b>Tabella 13</b> - Parametri simulazioni successive .....	57
<b>Tabella 14</b> - Temperatura media aria esterna durante le prove .....	61
<b>Tabella 15</b> - Output analisi CFD con corrente di scarica 3C.....	64
<b>Tabella 16</b> - Analysis Settings .....	64
<b>Tabella 17</b> - Proprietà meccaniche dei terminali .....	65
<b>Tabella 18</b> - Proprietà meccaniche dei componenti della parte attiva .....	66
<b>Tabella 19</b> - Proprietà meccaniche effettive della parte attiva .....	66
<b>Tabella 20</b> - Proprietà meccaniche dell'aria .....	67
<b>Tabella 21</b> - Proprietà meccaniche del separatore cartaceo .....	67
<b>Tabella 22</b> - Proprietà meccaniche del case esterno.....	68
<b>Tabella 23</b> - Risultati analisi strutturale .....	69
<b>Tabella 24</b> - Input simulazioni per variazione della geometria .....	89
<b>Tabella 25</b> - Input simulazioni per variazione della temperatura ambiente.....	93
<b>Tabella 26</b> - Nuovi valori per le resistenze e le capacità.....	95
<b>Tabella 27</b> - Valori Rs per corrente di scarica pari a 25 A.....	96
<b>Tabella 28</b> - Valori Rs per corrente di scarica pari a 50 A.....	96
<b>Tabella 29</b> - Valori Rs per corrente di scarica pari a 75 A.....	96
<b>Tabella 30</b> - Valore capacità cella al variare della corrente di scarica .....	96
<b>Tabella 31</b> - Nuovi valori della tensione a circuito aperto .....	97
<b>Tabella 32</b> - Parametri polinomiali di Rs con aumento della resistenza nel tratto finale della scarica .....	101



## Abstract

Nell'ambito del trasporto urbano ed extraurbano, le batterie al litio sono usate come fonte di energia per la propulsione di veicoli ibridi-elettrici in quanto rappresentano la migliore soluzione in un'ottica di sostenibilità ambientale. L'obiettivo di questo lavoro è lo studio del comportamento termo-fluido-meccanico di celle di batterie al litio sottoposte a diverse correnti di scarica. Si è dapprima provveduto a sviluppare un modello circuitale equivalente di una cella 23,5 Ah utilizzando il software ANSYS Fluent. Si è poi simulato il comportamento termico attraverso un'analisi CFD, validando il modello attraverso il confronto con i dati ottenuti da prove sperimentali. Successivamente è stato sviluppato un modello FEM della cella con lo scopo di ottenere i valori di tensioni e deformazioni a cui è sottoposta la cella nelle condizioni di lavoro più gravose. Si è, inoltre, reso necessario lo sviluppo di una analisi di sensitività nella quale si è osservato come il profilo di temperatura è influenzato da parametri come la geometria della cella e la temperatura dell'ambiente esterno. Infine, è stato sviluppato un modulo formato da due celle collegate in serie in modo da effettuare un confronto tra raffreddamento in serie e in parallelo.

In urban and suburban transport, lithium batteries are used as an energy source for propulsion of hybrid-electric vehicles because they represent the best solution in terms of environmental sustainability. The objective of this work is the study of the thermo-fluid-mechanical behavior of lithium battery cells subjected to different discharge currents. Initially, It was developed an equivalent circuit model of a 23.5 Ah cell using the ANSYS Fluent software. The thermal behavior was then simulated through a CFD analysis, validating the model through a comparison with the data obtained from experimental tests. Afterwards, a FEM model of the cell was developed in order to obtain the values of stresses and deformations to which the cell is subjected in the most severe working conditions. Furthermore, it was necessary to develop a sensitivity analysis in which it was observed that the temperature profile is influenced by parameters such as the cell geometry and the temperature of the external environment. Finally, a module consisting of two cells connected in series has been developed in order to make a comparison between cooling in series and in parallel.



## Introduzione

Il fine di questa tesi è lo sviluppo di un modello numerico multifisico per la previsione del comportamento termico e meccanico di una cella di batterie al litio sottoposta a convezione naturale. È stato inoltre studiato il comportamento termico di un modulo composto da due celle in contatto tra loro simulando anche l'utilizzo di una convezione forzata. I modelli sviluppati sono stati validati confrontando i valori ottenuti con quelli di prove sperimentali in laboratorio.

Nel primo capitolo vengono presentati inizialmente alcuni concetti sul funzionamento e sulle configurazioni delle batterie al litio descrivendone la forma e i materiali che le compongono. Segue poi una descrizione delle problematiche termiche alle quali sono soggette le celle se adoperate in intervalli di temperatura diversi da quelli consigliati in letteratura. Dopodiché vi è una descrizione dei modelli termici e elettrochimici utilizzati in letteratura per simulare il comportamento termo-elettro-chimico delle celle descrivendone le leggi costitutive e i principali pregi e difetti. La parte finale del capitolo è dedicata ai sistemi di raffreddamento utilizzati in campo automotive.

Il secondo capitolo è dedicato alla creazione del modello geometrico della cella descrivendo gli elementi utilizzati e la loro dimensione. Viene poi effettuata una discretizzazione del modello attraverso la creazione di una griglia (mesh) composta da elementi finiti più semplici.

Nel terzo capitolo viene esposta la procedura eseguita per svolgere un'analisi fluidodinamica (CFD) sul modello tramite il software ANSYS Fluent. Si è dapprima descritto il modello circuitale equivalente utilizzato per descrivere il comportamento termo-elettrico della cella. Segue poi una descrizione di tutti gli input forniti al modello come la scelta dei materiali, dei parametri termici ed elettrici e le condizioni al contorno da porre al problema. Infine, vi è un primo confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali ottenuti in laboratorio.

Oggetto del quarto capitolo è l'analisi strutturale effettuata sul modello sottoposto alle condizioni di scarica più gravose utilizzando il software ANSYS Mechanical APDL. La maggior parte del capitolo è dedicata alla preparazione del modello, effettuando una ricerca sugli input da utilizzare e sulle proprietà meccaniche degli elementi costituenti la cella. Infine, sono presentati i risultati ottenuti evidenziando lo sforzo e le deformazioni dovute ai carichi termici agenti sulla batteria durante la scarica.

Il quinto capitolo è dedicato all'analisi CFD effettuata su un modulo composto da due celle affiancate dove, nella prima parte, sono stati posti a confronto due metodi diversi di raffreddamento utilizzando una convezione forzata. Nella seconda parte si è, invece, investigato sugli input che garantiscono le condizioni ottimali di raffreddamento.

Nel sesto capitolo è presentata un'analisi di sensitività sul modello in modo da studiare come modificando gli input si ottengano risultati diversi per il modello numerico. Inizialmente si

è modificata la geometria della cella creando tre diverse configurazioni e confrontando le temperature ottenute. Successivamente si è mantenuta costante la geometria della cella modificando la temperatura dell'aria da utilizzare nella convezione naturale. Infine, si sono modificati i parametri necessari per il modello circuitale equivalente e successivamente è stata effettuata la validazione del modello confrontando la temperatura e la tensione ottenuta con quelle sperimentali.

Il settimo ed ultimo capitolo è dedicato alle conclusioni. Nel capitolo è riassunto il lavoro svolto e vengono suggeriti alcuni miglioramenti possibili per il modello presentato.

## Capitolo 1 - Stato dell'arte

Nella prima parte di questo capitolo viene presentata una classificazione generale dei diversi tipi di batterie utilizzate in ambito industriale ed automobilistico e del loro principio di funzionamento.

Segue una seconda parte nel quale si riassumono le condizioni ideali di funzionamento e vengono presentate nel dettaglio le principali problematiche derivanti dall'utilizzo in presenza di temperature differenti da quelle ottimali.

I principali modelli elettrici e termici sono argomento della terza parte del capitolo dove oltre alle equazioni necessarie per ogni modello vengono descritti anche i principali pregi e difetti.

Infine, nell'ultima parte del capitolo vengono descritte le principali tecniche di raffreddamento e riscaldamento utilizzate in ambito automobilistico per mantenere la temperatura di funzionamento desiderata.

### *1.1. Introduzione*

Oggigiorno inquinamento ambientale e crisi energetica rappresentano due delle grandi problematiche globali, soprattutto nell'ambito del trasporto urbano ed extraurbano. Governi di tutto il mondo puntano sempre di più all'incentivazione di veicoli a emissione zero tramite politiche preferenziali. È così che negli ultimi anni veicoli puramente elettrici (EVs), ibridi (HEV) e ibridi plug-in (PHEV) hanno riscosso via via sempre più attenzione da parte di costruttori e utilizzatori [1].

Rispetto ai veicoli tradizionali che utilizzano derivati dal petrolio, questi offrono minor emissione di inquinanti e nel caso di veicoli puramente elettrici si ha la completa eliminazione delle emissioni in loco (per esempio all'interno delle città dove vi è più alta densità di popolazione), lasciando l'emissione di sostanze inquinanti alle fabbriche elettriche che, in genere, sono lontane dai centri abitati. Si è osservato infatti, che l'utilizzo di veicoli elettrici limita le emissioni di GHG (Greenhouse Gasses) (come anidride carbonica, CO<sub>2</sub>; metano, CH<sub>4</sub>; protossido di azoto, N<sub>2</sub>O; ecc.) del 20% e se si sono utilizzate fonti rinnovabili per la produzione dell'energia elettrica tale percentuale sale al 40% [2] [3]. La necessità di creare veicoli con elevata capienza e potenza energetica per rappresentare una vera alternativa ai carburanti petrolchimici ha spinto la ricerca nella creazione di batterie sempre più performanti e capienti. Sono così state proposte soluzioni al piombo-acido (Pb-acid), basate sul nickel o sul sodio e batterie agli ioni di litio (Li-ion). Un confronto tra le diverse soluzioni è visibile nella **Tabella 1**.

**Tabella 1** - Proprietà di diverse batterie

Tipo	Energia specifica (W h kg <sup>-1</sup> )	Potenza specifica (kW kg <sup>-1</sup> )	Tensione nominale cella (V)	Cicli di vita	Tempo di ricarica (h)	Auto scarica (%)
Lead-acid	25-40	150-250	2	200-700	8	5
Nickel-cadmium	45-80	200	1.2	500-2000	1	20
Nickel-metal hydride	60-120	200	1.2	500-1000	1	30
Nickel-iron	50	100	1.2	2000	/	20-40
Nickel-zinc	70	150	1.7	300	/	20
Sodium-sulphur	100	150-200	2	~1000	8	Quite low
Sodium metal chloride	100	150	2	>1000	8	/
Li-ion	100-180	300	3.6	>1000	2-3	10
Li-polymer	100-130	300	3.6	300-500	2-4	10

Tra queste le batterie al litio rappresentano la soluzione migliore per essere adottate in veicoli elettrici o ibridi grazie alla loro elevata densità di energia e di potenza, all'elevato numero di cicli vitali e alla bassa auto scarica [3]. Infatti, dal 2011 al 2015 la produzione di batterie al litio nel mondo e in particolare in Cina è aumentata significativamente passando da 46.63 GWh a 100.75 GWh [1].

L'utilizzo di queste batterie ha però introdotto anche delle problematiche legate alla sicurezza, al costo di produzione e di riciclo. Anche la necessità di infrastrutture per la ricarica rappresenta un ulteriore problema alla diffusione dei veicoli EV o HEV.

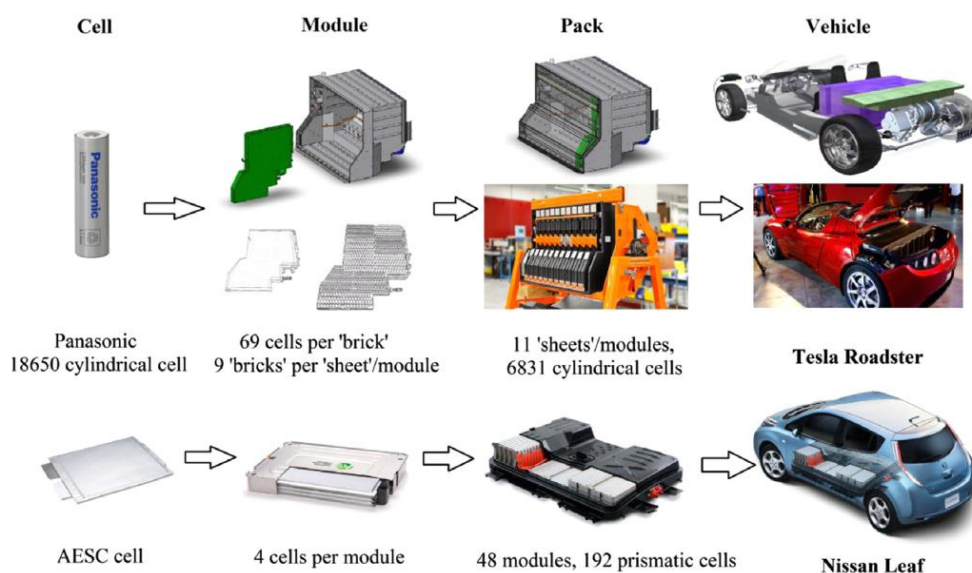
A queste vanno poi aggiunte una serie di problematiche dovute alla temperatura di utilizzo. Le batterie a litio sono infatti molto sensibili alle variazioni di temperatura. L'intervallo ottimale di funzionamento si attesta tra i 15 °C e i 35°C [4] [5], mentre al di fuori di questo si ha bassa efficienza in condizioni di basse temperature (al di sotto dei 0°C) e possibile degradazione per temperature superiori ai 45 °C con conseguente danno permanente. Se si è poi in presenza di pacchi di batterie aventi più moduli al suo interno è necessario limitare la differenza di temperatura tra le varie celle a circa 5°C [5].

Diventa così necessario un controllo attivo della temperatura tramite strategie (BTM, Battery thermal management) che consentono alla batteria di lavorare nell'intervallo di temperatura ottimale. Queste possono utilizzare raffreddamento (o riscaldamento) attivo o passivo e possono essere adoperati materiali diversi in base alle esigenze.

## 1.2. La batteria al litio: funzionamento e configurazione

La batteria o accumulatore è un dispositivo elettrochimico in grado di accumulare carica elettrica e restituirla nella fase di scarica.

L'unità fondamentale di una batteria è la cella, questa unita in serie o in parallelo ad altre celle uguali crea il modulo. L'unione di più moduli crea il pacco batteria (**Figura 1**).

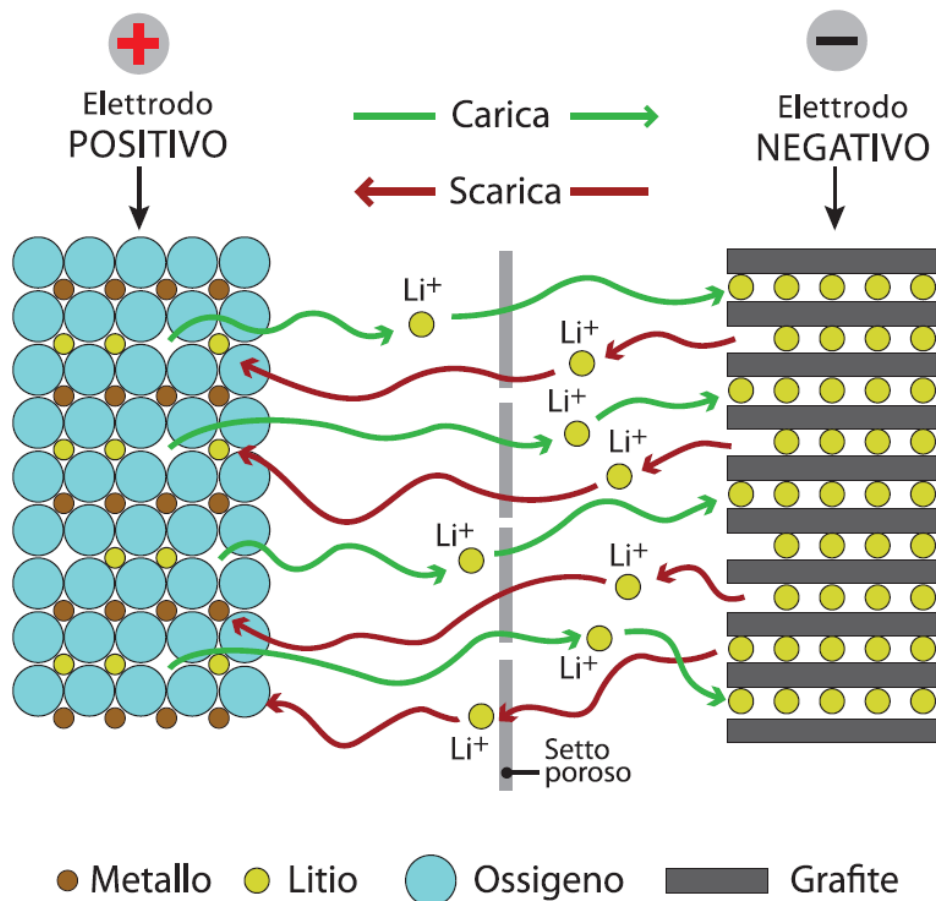


**Figura 1** - Due soluzioni diverse per cella, modulo e pacco batteria per veicoli elettrici [2]

Il principio base su cui si basa la cella di una batteria al litio è la migrazione di ioni da un elettrodo all'altro come mostrato in **Figura 2**. Si ha che, durante la scarica, lo ione positivo del litio ( $\text{Li}^+$ ) si muove dall'elettrodo negativo (anodo) verso quello positivo (catodo) attraverso un elettrolita attraversando un separatore poroso, mentre segue il percorso inverso durante la carica.

L'anodo è fatto di carbonio e, in genere, viene utilizzata la grafite. Il catodo è invece realizzato tramite ossidi metallici e può essere di tipo litio-ossido di cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ ), litio-ferro-fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ) oppure litio-ossido di manganese ( $\text{LiMnO}_4$ ). Tra questi  $\text{LiCoO}_2$  rappresenta una buona soluzione in termini di elevata capacità e maturità nel processo di creazione. Ha, però, un'importante limitazione in quanto è molto tossico, il materiale è molto costoso e ha bassa stabilità termica. Per tutti questi motivi si tende ad usare maggiormente le celle  $\text{LiFePO}_4$  in quanto più sicure e più stabili termicamente. L'elettrolita è un conduttore ionico, ma non elettrico, che permette la chiusura del circuito permettendo la migrazione degli ioni verso gli elettrodi ed è realizzato tramite un sale di litio disciolto in un solvente organico come carbonato di etilene (EC), dietilcarbonato (DEC), carbonato di propilene (PC) oppure dimetilcarbonato (EMC) [3].

I collettori di corrente sono in rame (Cu) per l'elettrodo negativo e in alluminio (Al) per quello positivo [2].



**Figura 2** - Principio di funzionamento della batteria al litio durante carica e scarica [2] [6]

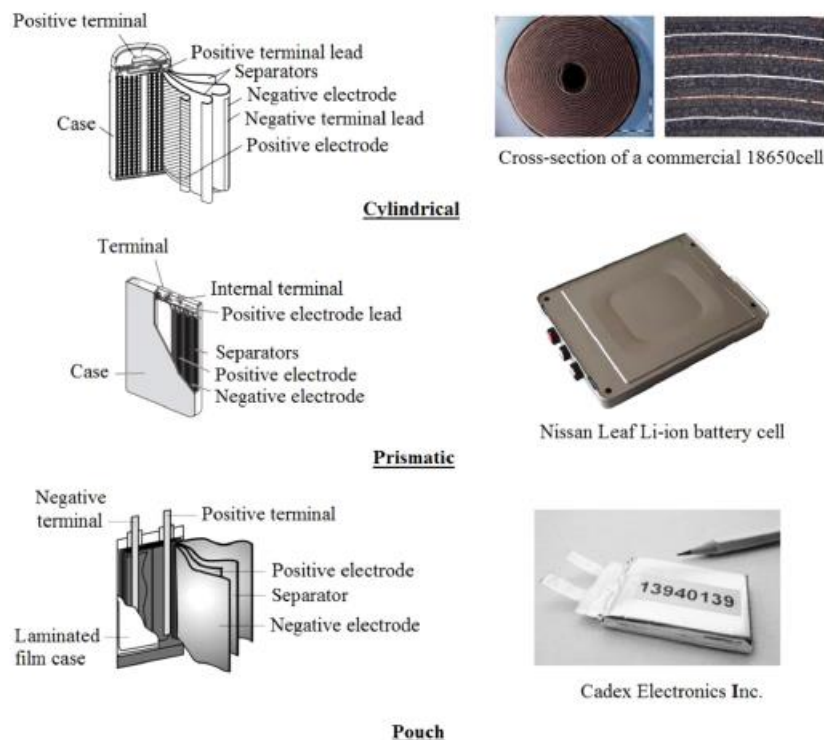
Tra le batterie al litio è possibile effettuare una distinzione tra celle cilindriche, prismatiche e pouch (**Figura 3**).

Le celle pouch sono batterie molto sottili e quindi adatte ad essere utilizzate quando lo spazio a disposizione è molto limitato (ad esempio per la telefonia mobile). Non presentano un contenitore rigido e di conseguenza anche il peso è ridotto. Utilizzano la tecnologia Litio polimero, ovvero utilizzano come elettrolita un polimero il che elimina la possibilità di perdite di liquidi. Presentano l'ulteriore vantaggio di raffreddarsi facilmente grazie alle ampie superfici, ma necessitano di un impacchettamento idoneo avendo una bassa resistenza meccanica.

Le celle prismatiche presentano un contenitore prismatico di alluminio o di acciaio sottile, il che aumenta la resistenza meccanica. La costruzione permette elevata densità di energia, ottima dissipazione del calore e sfruttamento dello spazio.



Le celle cilindriche sono diffuse sia per essere utilizzate nei veicoli elettrici (celle di grandi dimensioni) sia nei dispositivi elettronici come i computer portatili (celle di piccole dimensioni) [6].



**Figura 3** - Tipi di cella al litio [2]

Come è visibile in **Figura 1** produttori diversi utilizzano soluzioni diverse per la formazione del pacco batterie dei propri veicoli elettrici. Tesla, ad esempio, utilizza 7104 batterie cilindriche 18.650 (dove 18 è il diametro in millimetri; 65 indica l'altezza in millimetri e 0 è un codice che identifica la cella cilindrica) organizzate in 16 moduli per un totale di 85 kWh.

### **1.3. Analisi termica e problematiche**

Come detto in precedenza le batterie al litio necessitano che la temperatura di funzionamento ricada all'interno di un preciso intervallo in modo da ottenere le migliori condizioni dal punto di vista della sicurezza e dell'efficienza energetica. Pesaran, in due diversi studi [4] [5], indica come intervallo ottimale la temperatura tra i 15°C e i 35°C per le batterie utilizzate nei veicoli puramente elettrici. L'intervallo è fortemente dipendente dalla struttura chimica utilizzata e, più in generale, un intervallo compreso tra 25 e 40°C è

ottimale per la maggior parte delle batterie (batterie piombo-acido, batterie basate sul nickel, batterie agli ioni di litio). Pesaran sottolinea anche la necessità che la differenza di temperatura tra moduli adiacenti sia inferiore a 5°C.

Al di fuori di questo intervallo è possibile osservare due comportamenti diversi per la cella: per basse temperature si ha perdita di efficienza con difficoltà di carica e di scarica, mentre ad alte temperature si ha una degradazione delle specie chimiche costituenti la cella che causa il danneggiamento irreversibile di quest'ultima e in casi estremi anche l'esplosione con conseguente pericolo per la sicurezza dell'utilizzatore.

### ***1.3.1. Thermal runaway***

La degradazione delle prestazioni delle batterie basate sugli ioni di litio può essere dovuta alla perdita di energia disponibile (ovvero una diminuzione della capacità della batteria) oppure di potenza. L'energia disponibile diminuisce quando il materiale attivo della cella si trasforma in fase non attiva, il che diminuisce la capacità della cella per qualunque corrente di scarica. Di contro la potenza si riduce quando l'impedenza interna aumenta, si ha così una diminuzione della tensione operativa per qualunque corrente di scarica.

Al variare della chimica costituente la batteria è possibile notare una diversa influenza della temperatura sulle prestazioni della cella. È però possibile osservare che al di sopra dei 50°C per ogni tipo di batteria al litio si ha un aumento della degradazione con diminuzione di capacità e potenza erogabile.

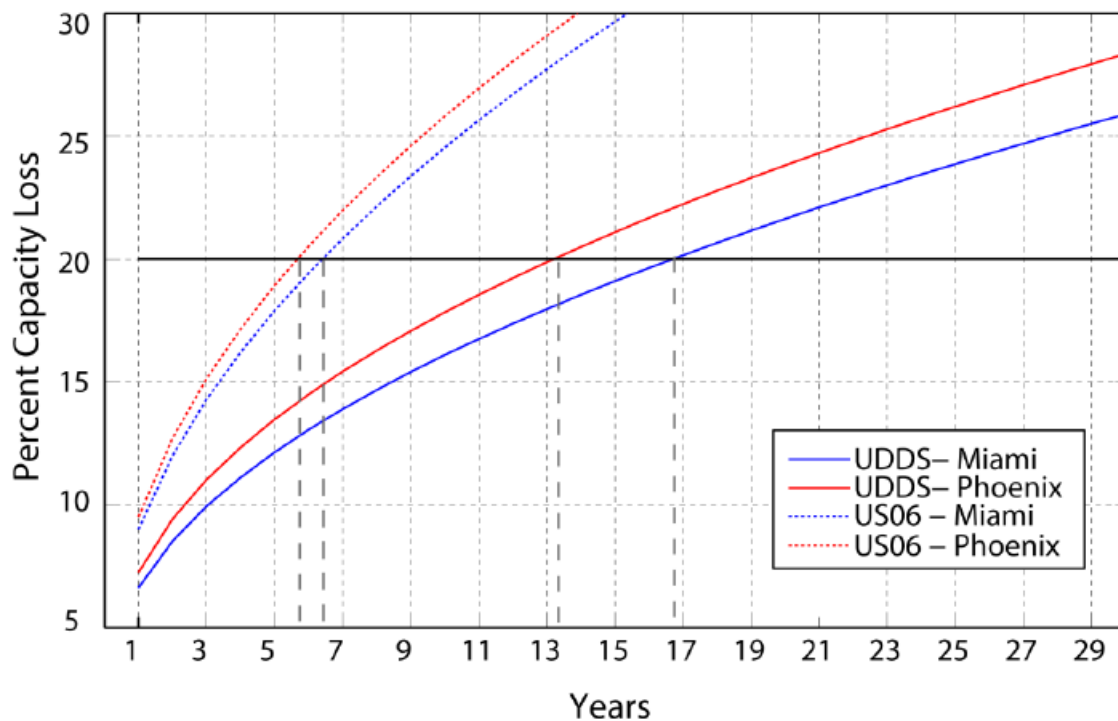
La diminuzione della capacità e della potenza può accadere anche quando le batterie sono conservate e non utilizzate. Questo fenomeno aumenta quando la batteria è conservata avendo un elevato SOC (State of charge) ed in un ambiente ad elevata temperatura. Si è infatti osservato che la perdita di potenza nelle prime quattro settimane è funzione della temperatura e che al di sopra dei 45°C si ha un aumento della perdita sostanziale [7].

Il runaway termico si verifica quando, essendo sottoposte a temperature elevate, le batterie innescano delle reazioni esotermiche che generano calore al loro interno causando un innalzamento ulteriore della temperatura [8]. Il solid electrolyte interphase (SEI) è un sottile film che riveste l'elettrodo negativo in grafite fungendo da separatore tra l'elettrodo e l'elettrolita in tal modo impedisce l'innescio di reazioni tra i 2 materiali. Il SEI contiene sia componenti stabili (ad esempio  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) che metastabili (ad esempio  $(\text{CH}_2\text{OCO}_2\text{Li})_2$ ), quest'ultimi se sottoposti a temperature comprese tra 90 e 120°C decompongono generando reazioni chimiche esotermiche [7].

Yang [9] ha proposto un percorso generale che tutte le batterie al litio percorrono durante il runaway termico. Si ha che quando la batteria raggiunge gli 85°C il SEI sull'elettrodo negativo in grafite inizia a decomporsi esotermicamente. Se la temperatura aumenta ulteriormente fino a circa 100°C, non essendoci più una protezione, si ha l'innescio di reazioni tra l'elettrodo negativo e l'elettrolita. Parte dell'energia rilasciata in questa fase può

essere assorbita o dall'evaporazione dell'elettrolita (a circa 140°C) oppure dallo scioglimento del separatore (tra 130 e 190°C). Questi fenomeni possono causare ulteriori problemi. Se, infatti, il vapore causato dall'evaporazione dell'elettrolita viene a contatto con l'ossigeno può innescarsi una combustione interna. Mentre lo scioglimento del separatore può causare un cortocircuito interno con ulteriore aumento di temperatura. Un aumento ulteriore della temperatura può causare la generazione di reazioni chimiche nell'elettrodo negativo (a circa 330°C) e la fusione del collettore in alluminio (a circa 660°C).

Yuksel [10] nel suo lavoro ha osservato come sia la temperatura dell'ambiente esterno che le condizioni di lavoro che la batteria deve sostenere influiscano significativamente sulla vita delle batterie. Nel suo test Yuksel studia il comportamento di batterie cilindriche LiFePO<sub>4</sub> sottoposte a due diversi cicli di emissione diversi (UDDS e US06) a condizioni climatiche e di lavoro diverse (auto che circola sulle strade di Miami e Phoenix). Si osserva che nonostante le temperature di Phoenix siano più basse o uguali durante la maggior parte dell'anno rispetto a quelle di Miami, la vita media delle batterie testate a Phoenix sia di circa 3 anni più corta. Ciò è dovuto al fatto che durante la stagione estiva le temperature di Phoenix sono decisamente più elevate di quelle di Miami facendo sì che le batterie lavorino ad elevate temperature e di conseguenza danneggiandosi. Dalla **Figura 4** è poi possibile notare come il ciclo US06 sia più aggressivo rispetto al UDDS il che, a parità di condizioni climatiche, riduce la vita della batteria.



**Figura 4** - Confronto tra la perdita di capacità per cicli UDDS e US06 [10]

### ***1.3.2. Prestazioni a basse temperature***

Come detto in precedenza anche a basse temperature il comportamento delle batterie al litio non è ottimale. Essendo le batterie utilizzate anche per particolari applicazioni ed in ambito aerospaziale è stato necessario indagare il comportamento a temperature inferiori ai  $-30^{\circ}\text{C}$ . Si è notato come le prestazioni a queste temperature siano molto scarse. Ad esempio, alcuni studi hanno verificato che celle agli ioni di litio, sottoposte a una temperatura di  $-40^{\circ}\text{C}$ , mostrano una perdita della capacità del 12% rispetto a quella a temperatura ambiente. Questo fenomeno è stato ricondotto dapprima alla bassa mobilità degli ioni nell'elettrolita a queste temperature e alle proprietà di trasporto del SEI film. È stato poi osservato da Huang [11] che le basse prestazioni sono da ricondursi alla lenta diffusione degli ioni di litio all'interno dell'anodo in grafite e non nell'elettrolita o alla passivazione del SEI sull'anodo.

Lin [12] evidenzia come la causa delle basse prestazioni a basse temperature ( $<-20^{\circ}\text{C}$ ) non sia dovuto principalmente alla conduttività della soluzione, ma alla polarizzazione all'anodo (la polarizzazione al catodo risulta molto minore rispetto a quella all'anodo). Egli suggerisce che la causa della perdita permanente della capacità è probabilmente dovuta all'aumento della resistenza del SEI dovuta alla decomposizione degli ossidi metallici durante la carica. La crescita del SEI dovuta alle reazioni degli ossidi metallici durante la carica a bassa temperatura sembra essere il principale fattore limitante che porta alla perdita permanente di capacità.

Numerosi studi [7] [13] osservano come, a basse temperature, il processo di carica sia più difficile di quello di scarica. Ciò è dovuto al fatto che per temperature inferiori ai  $-10^{\circ}\text{C}$  la resistenza "charge-transfer" ( $R_{ct}$ ) abbia un considerevole incremento creando di fatto un ostacolo alla carica stessa.

Gli effetti della bassa temperatura possono quindi riassumersi come: formazione del "lithium plating" sull'anodo durante la carica [8]; riduzione della conduttività ionica dell'elettrolita e del SEI formato sulla superficie della grafite; limitata diffusività degli ioni di litio all'interno della grafite; elevata polarizzazione dell'anodo in grafite; e aumento della resistenza di carica tra elettrolita ed elettrodo [13] [14].

### ***1.4. Modelli elettrici e termici***

L'utilizzo di modelli per simulare il comportamento delle batterie è fondamentale per identificare i parametri di lavoro come ad esempio la tensione, la corrente di carica o scarica e la temperatura, e per poter implementare strategie volte al mantenimento delle temperature necessarie per il corretto funzionamento della batteria (BTM).

I modelli delle batterie sono definiti da una serie di equazioni matematiche le quali legano differenti meccanismi fisici che avvengono all'interno della batteria. La scelta delle

equazioni o della descrizione matematica delle batterie è significativa nel predire il comportamento del sistema.

Essendo impossibile utilizzare esclusivamente modelli matematici o numerici è necessario affiancare a questi delle prove sperimentali con lo scopo di validare i risultati ottenuti dalle simulazioni. La simulazione numerica deve quindi essere vista come un potente strumento in grado di poter sopperire alla necessità di effettuare numerose prove sperimentali, le quali rappresentano un costo elevato e soffrono di alcune limitazioni (è infatti molto più semplice misurare la temperatura sulla superficie rispetto a misurarla nel cuore della batteria).

La classificazione dei modelli può avvenire in base al differente meccanismo fisico studiato e/o in base alle dimensioni utilizzate. Dal punto di vista fisico si può distinguere tra modelli circuitali equivalenti elettrici (ECM), modelli elettrochimici e modelli empirici. Dal punto di vista dimensionale si può distinguere tra modelli monodimensionali (1D), bidimensionali (2D), tridimensionali (3D) e modelli a parametri concentrati.

È poi possibile effettuare una distinzione tra modelli accoppiati e non accoppiati termicamente. I primi sono modelli che oltre che studiare il comportamento elettrico rilevano anche quale sia il comportamento termico del modello fornendo così un andamento evolutivo della temperatura sui vari componenti che costituiscono la batteria.

#### ***1.4.1. Modello elettrochimico***

Il modello elettrochimico è sicuramente il modello più completo utilizzabile per lo studio di batterie al litio. Tale modello è infatti molto utilizzato in quanto risulta il modello più preciso ed accurato, ma allo stesso tempo è il modello più lento nel fornire i risultati a causa dell'elevata potenza di calcolo necessaria.

I primi lavori per la creazione di un modello elettrochimico sono stati condotti da Newman utilizzando parametri macroscopici (come ad esempio la tensione e la corrente) e parametri microscopici (come le dimensioni delle particelle). Tale modello ha preso il nome di "Pseudo Two-dimensional (P2D) model". Nel modello viene considerato solo un trasporto monodimensionale dall'elettrodo negativo a quello positivo attraverso il separatore e si assume la fase solida attiva sia costituita da particelle sferiche aventi tutte le stesse dimensioni [3]. Il modello P2D è rappresentato graficamente in **Figura 5**.

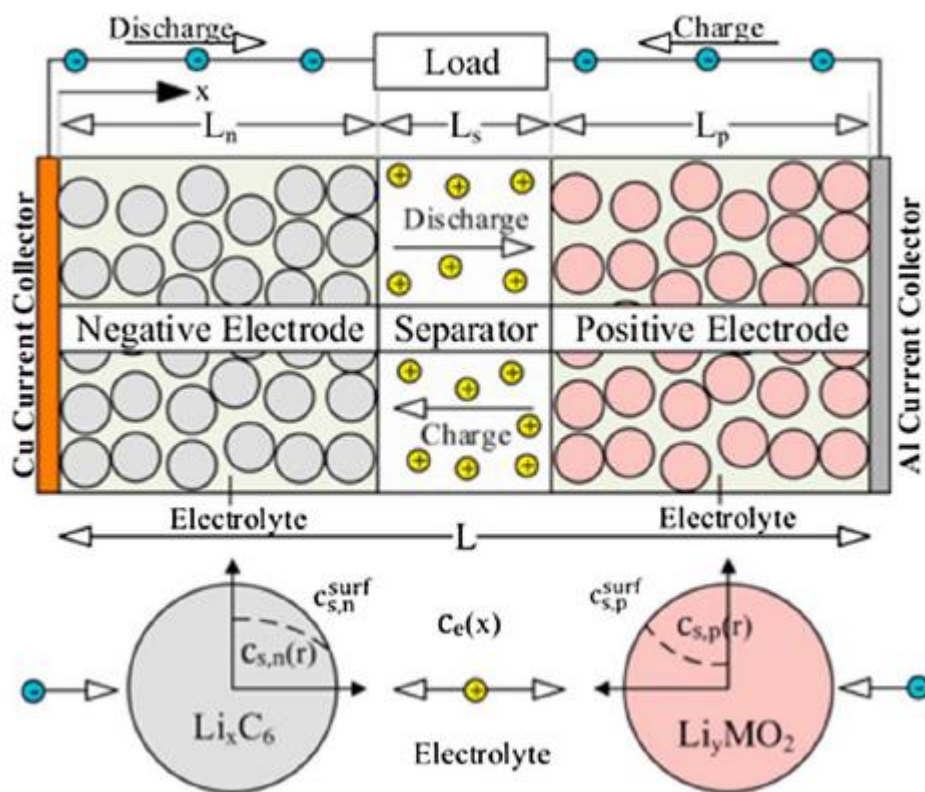


Figura 5 - Rappresentazione del modello elettrochimico P2D [3]

Doyle e Newman [15] hanno comparato i risultati delle simulazioni del modello P2D con test sperimentali per una cella agli ioni di litio costituita da ossido di manganese per l'elettrodo positivo e carbonio per quello negativo. È stato osservato come i risultati ottenuti fossero in linea con quelli sperimentali confermando la bontà del modello.

Un ulteriore passo in avanti si è avuto con Song e Evans i quali hanno adattato il modello di Newman unendo il modello elettrochimico con il modello termico. In tal modo è stato possibile studiare il calore scambiato e le procedure di controllo termico (BTM) per batterie al litio [16].

Il modello elettrochimico è, in genere, un modello fisico che si basa su una serie di equazioni che descrivono la cinetica, i fenomeni di trasporto e l'energia dissipativa di una cella [2].

La cinetica viene presa in considerazione calcolando la densità di corrente locale attraverso l'equazione di Butler-Volmer [17] descritta dall'equazione (1):

$$j_n = j_0 \left\{ \exp\left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_c F}{RT} \eta\right) \right\} \quad (1)$$

Dove:

- $j_0$  è la densità di corrente di scambio;
- $\alpha_a$  e  $\alpha_c$  sono i coefficienti adimensionali chiamati "coefficiente anodico di simmetria della barriera" e "coefficiente catodico di simmetria della barriera";
- $\eta$  è la sovratensione di superficie locale;
- $F$  è la costante di Faraday;
- $R$  è la costante dei gas;
- $T$  è la temperatura assoluta (K).

La densità di corrente di scambio,  $j_0$ , è definita come:  $j_0 = Fk_0c_2^{\alpha_a}(c_{1,max} - c_{1,surf})^{\alpha_a} c_{1,surf}^{\alpha_c}$

Dove:

- $k_0$  è una costante della reazione;
- $c_{1,max}$  è la concentrazione massima di litio negli elettrodi;
- $c_{1,surf}$  è la concentrazione di litio sulla superficie delle particelle attive;
- I numeri 1 e 2 indicano rispettivamente la fase solida e l'elettrolita.

La sovratensione,  $\eta$ , è definita come:  $\eta = \phi_1 - \phi_2 - U_{eq}$

Dove:

- $\phi_1$  è il potenziale della fase solida;
- $\phi_2$  è il potenziale dell'elettrolita;
- $U_{eq}$  è il potenziale di equilibrio.

Il cambiamento di fase e il trasporto degli ioni è descritto attraverso le equazioni (2) e (3), dove l'equazione (2) rappresenta la conservazione degli ioni di litio per la fase solida, mentre l'equazione (3) è la conservazione degli ioni di litio per l'elettrolita [17]:

$$\frac{\partial}{\partial t} c_1 - \frac{D_1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( -r^2 \frac{\partial}{\partial r} c_1 \right) = 0 \quad (2)$$

con le condizioni al contorno:  $D_1 \frac{\partial c_1}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$ ;  $-D_1 \frac{\partial c_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = j_n$

Dove:

- $c_1$  è la concentrazione di litio nelle particelle attive dell'elettrodo;
- $t$  è il tempo;
- $D_1$  rappresenta il coefficiente di diffusione del litio nella fase solida;
- $r$  è la coordinata radiale all'interno della particella sferica;

- $R_1$  è il raggio della particella sferica.

$$\varepsilon_2 \frac{\partial c_2}{\partial t} + \nabla \cdot J_2 = \frac{S_a j_n}{F} \quad (3)$$

Con:  $J_2 = -D_2^{eff} \nabla c_2 + \frac{i_2 \cdot t_+}{F}$

e le condizioni al contorno:  $\frac{\partial c_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial c_2}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0$

Dove:

- $J_2$  è il flusso molare di ioni di litio;
- $D_2^{eff}$  è il coefficiente di diffusione effettiva nell'elettrolita (ricavabile dalla relazione di Bruggeman);
- $\varepsilon_2$  è la frazione di volume dell'elettrolita.

La dissipazione di energia è descritta attraverso le equazioni (4) e (5), dove l'equazione (4) rappresenta la conservazione della carica nella fase solida, mentre l'equazione (5) è la conservazione della carica per l'elettrolita [3]:

$$\nabla \cdot (\sigma^{eff} \nabla \phi_1) - j^{Li} = 0 \quad (4)$$

con le condizioni al contorno:  $-\sigma^{eff} \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\sigma^{eff} \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{I}{A}$

$$\nabla \cdot (k^{eff} \nabla \phi_2) + \nabla \cdot (k_D^{eff} \nabla \ln c_2) + j^{Li} = 0 \quad (5)$$

con le condizioni al contorno:  $\frac{\partial \phi_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0$

Dove:

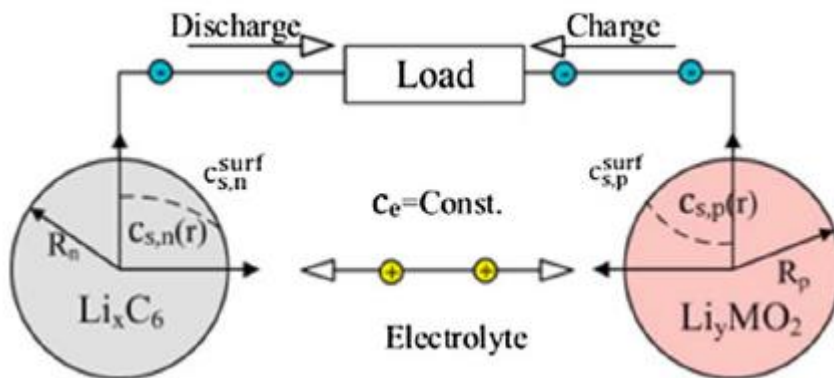
- $j^{Li}$  è la corrente di scambio dovuta al passaggio del litio tra l'interfaccia elettrodo/elettrolita;
- $\sigma^{eff}$  è la conduttività effettiva della fase solida;
- $k^{eff}$  è conduttività diffusionale (ricavabile dalla relazione di Bruggeman);
- $k_D^{eff}$  è la conduttività ionica effettiva.

Come è possibile osservare dalle equazioni scritte precedentemente, il modello P2D è caratterizzato dalla presenza di molte equazioni differenziali parziali non lineari (PDEs) che



necessitano di un numero elevato di risorse computazionali. Per semplificare il problema sono stati proposti negli anni varie semplificazioni matematiche e fisiche. È stato sviluppato, per esempio, un modello (PP model) nel quale la concentrazione della fase solida è stata approssimata attraverso un profilo parabolico. Come conseguenza si ha che l'equazione (2) (equazione di tipo PD) è stata sostituita da un'equazione differenziale ordinaria (ODE) rappresentata dall'equazione e da un'equazione algebrica [17].

Un altro metodo per semplificare il problema è quello di adottare un modello a singola particella (SP model). Questo modello elimina la teoria dell'elettrodo costituito da varie particelle e considera entrambi gli elettrodi come se fossero una singola particella la cui superficie è uguale a quella dell'elettrodo costituito da tante particelle. Inoltre, viene anche trascurata la diffusione del litio nell'elettrolita. Si ha che la concentrazione degli ioni di litio e il potenziale della fase solida sono in funzione solo del tempo e rimangono costanti lungo lo spessore dell'elettrodo. In **Figura 6** si ha una rappresentazione schematica di questo modello.



**Figura 6** - Rappresentazione del modello elettrochimico SP [3]

Confrontando i tre diversi modelli (P2D, PP e SP) si è osservato che dato l'utilizzo di equazioni differenziali ordinarie invece di equazioni differenziali parziali, il modello SP risulta essere molto più veloce rispetto al modello P2D. Si è però anche notato che per correnti di scarica superiori a 1C le simulazioni con i due modelli forniscono risultati profondamente diversi, limando di fatto il vantaggio computazionale del modello SP. Il modello PP invece pur essendo più lento del modello SP nel fornire i risultati, garantisce elevata accuratezza (comparabile con il modello P2D) e allo stesso tempo garantisce un elevato risparmio di tempo [3].

### 1.4.2. Modello circuitale equivalente

A differenza del modello elettrochimico, il modello circuitale equivalente (ECM) non utilizza complesse equazioni differenziali parziali per descrivere i meccanismi elettrici e

chimici che avvengono all'interno della batteria. Il modello EC per descrivere il comportamento della batteria utilizza, invece, un semplice circuito elettrico costituito da resistenze, condensatori e generatori di tensione. Oltre a non dover risolvere complesse equazioni, il modello circuitale ha un ulteriore vantaggio che consiste nel non utilizzo di parametri chimici ed elettrici che implicano una profonda conoscenza della fisica della batteria. Questi fattori hanno contribuito profondamente al largo utilizzo di questo modello [3].

I modelli tipici utilizzati per le batterie di autoveicoli sono il modello Rint (Internal Resistance model), il modello RC (Resistance Capacitance), il modello Thevenin e il modello PNGV (Partnership for New Generation of Vehicles).

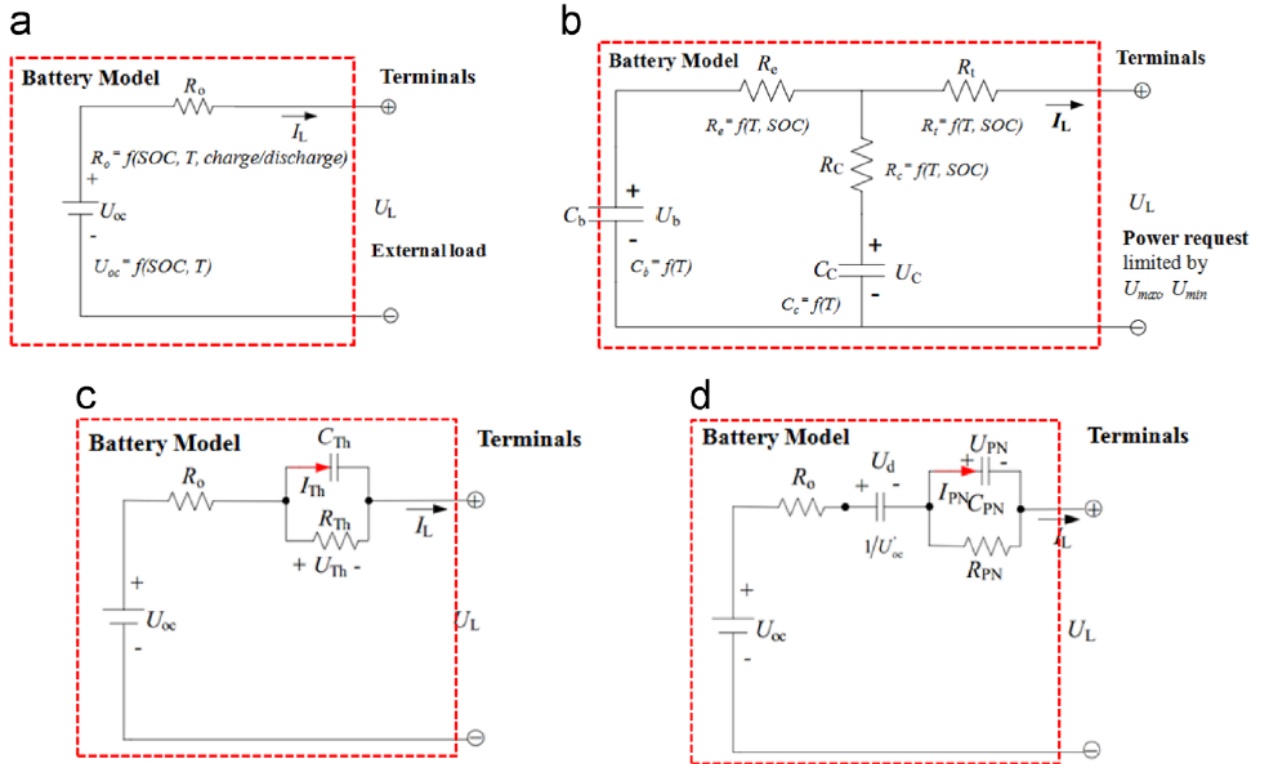
Il modello Rint (**Figura 7a**) è il più semplice circuito equivalente. Quest'ultimo assume che la batteria sia equivalente ad un generatore ideale di tensione,  $U_{OC}$ , in serie con una resistenza,  $R_0$ . La tensione ai terminali,  $U_L$ , di questo modello è descritta dall'equazione (6) dove  $I_L$  è positiva se siamo in fase di scarica, mentre è negativa se stiamo caricando la batteria.

$$U_L = U_{OC} - I_L R_0 \quad (6)$$

Dove:

- $U_L$  è la tensione ai terminali;
- $U_{OC}$  è la tensione del circuito aperto;
- $I_L$  è la corrente di carico;
- $R_0$  è la resistenza interna.

Questo modello è facilmente integrabile in qualunque BMS essendo molto semplice, di contro non è in grado di fornire risultati sufficientemente adeguati.



**Figura 7** - Rappresentazione dei diversi tipi di circuiti equivalenti [2]: **a.** Modello Rint; **b.** Modello RC; **c.** Modello Thevenin; **d.** Modello PNGV

Il modello RC è stato sviluppato da SAFT Battery Company e contiene anche dei condensatori in modo da simulare più accuratamente il comportamento della batteria. Il numero di blocchi RC determina la fedeltà del modello alla realtà. Le equazioni che descrivono il modello RC in **Figura 7b** sono l'equazione (7) e l'equazione (8) elencate di seguito:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b(R_e + R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{1}{C_c(R_e + R_c)} & \frac{-1}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{-R_e}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} [I_L] \quad (7)$$

$$[U_L] = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{R_e + R_c} & \frac{R_e}{R_e + R_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} - \left[ R_t + \frac{R_c R_e}{R_e + R_c} \right] [I_L] \quad (8)$$

Dove:

- $C_c$  è il condensatore di superficie (piccola capacità che rappresenta l'effetto della superficie della batteria);

- $C_b$  è il condensatore di massa (grande capacità che rappresenta la capacità della batteria di accumulare la carica);
- $U_b, U_c$  sono le tensioni a cavallo dei condensatori  $C_b$  e  $C_c$ ;
- $R_t, R_c, R_e$  sono le resistenze del circuito.

Il modello Thevenin (**Figura 7** - Rappresentazione dei diversi tipi di circuiti equivalenti : **a.** Modello Rint; **b.** Modello RC; **c.** Modello Thevenin; **d.** Modello PNGV) è stato largamente usato nei primi BMS ed è stato sviluppato utilizzando come base il modello Rint aggiungendo un blocco RC in serie alla resistenza e tiene in considerazione anche la polarizzazione. Il modello è descritto dalle equazioni (9) e (10):

$$\dot{U}_{Th} = -\frac{U_{Th}}{R_{Th} + C_{Th}} + \frac{I_L}{C_{Th}} \quad (9)$$

$$U_L = U_{OC} - U_{Th} - I_L R_0 \quad (10)$$

Dove:

- $C_{Th}$  è la capacità equivalente che riflette la risposta transitoria durante la carica e la scarica;
- $U_{Th}$  è la tensione a cavallo di  $C_{Th}$ ;
- $R_{Th}$  è la resistenza di polarizzazione.

In ultimo, il modello PNGV (**Figura 7d**) è stato sviluppato modificando il modello di Thevenin aggiungendo un ulteriore condensatore ( $1/U'_{OC}$ ). Le equazioni che descrivono questo modello sono l'equazione (11), (12) e (13):

$$\dot{U}_d = U'_{OC} I_L \quad (11)$$

$$\dot{U}_{PN} = -\frac{U_{PN}}{R_{PN} + C_{PN}} + \frac{I_L}{C_{PN}} \quad (12)$$

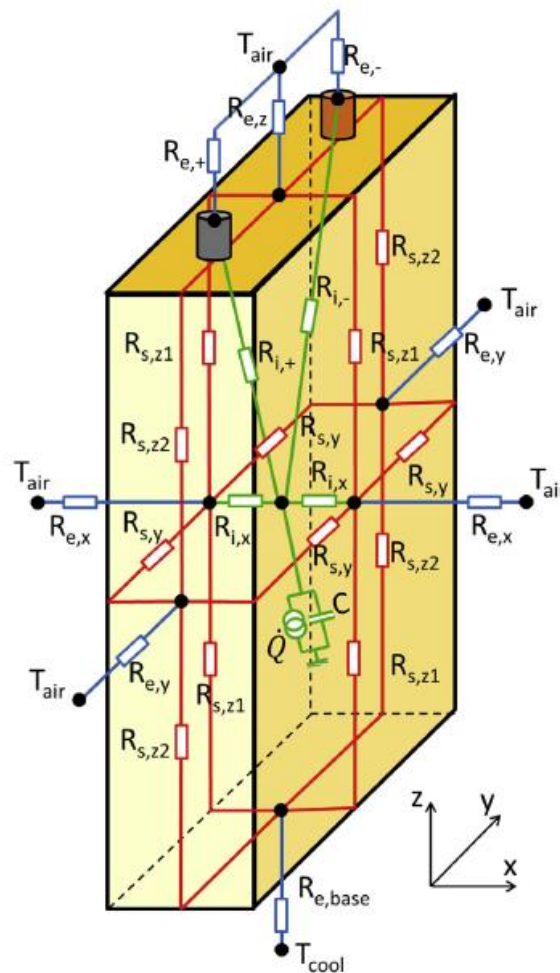
$$U_L = U_{OC} - U_d - I_L R_0 \quad (13)$$

Dove:

- $U_d$  e  $U_{PN}$  sono le tensioni a cavallo di  $1/U'_{OC}$  e  $C_{PN}$ .

Dal confronto con modelli elettrochimici si è visto come un semplice modello RC presenta lo stesso tempo simulativo di un modello SP, mentre i risultati ottenuti sono molto meno precisi del modello elettrochimico. Si è però anche visto come aumentando la complessità del circuito (utilizzando più blocchi RC o usando modelli più complessi) i risultati siano molto simili a quelli ottenuti con modelli elettrochimici, mentre il tempo necessario per la simulazione sia sempre inferiore [3].

Un esempio dell'utilizzo del modello ECM è rappresentato dal lavoro di Damay [18] dove è stata studiata la risposta termica di un pacco batteria composto da più celle prismatiche  $\text{LiFePO}_4/\text{grafite}$ . La cella è stata modellata come in **Figura 8** dove si ha un nodo centrale, un nodo per ogni terminale e un nodo per faccia.



**Figura 8** - Modello circuitale equivalente di una cella [18]

### 1.4.3. Modello empirico

Come avviene per il modello circuitale equivalente, il modello empirico si pone come un'alternativa più semplice del modello elettrochimico. Il modello empirico è costituito da

semplici equazioni che descrivono il comportamento della batteria attraverso parametri dedotti sperimentalmente e che variano per ogni batteria.

Il più semplice modello empirico è rappresentato dall'equazione di Peukert [16] (equazione (14)), la quale descrive la relazione non lineare tra la capacità della batteria e la corrente di scarica:

$$C_p = I^k \cdot t \quad (14)$$

Dove:

- $C_p$  è la capacità;
- $I$  è la corrente di scarica;
- $k$  è la costante di Peukert;
- $t$  è il tempo della scarica.

Altri modelli più complessi sono stati sviluppati nell'obiettivo di ottenere risultati migliori. Uno di questi è il modello semi-empirico elettrochimico NTGK (modello Newman, Tiedemann, Gu e Kim) proposto per la prima volta da Kwon. Le equazioni che costituiscono il modello sono elencate di seguito [19]:

$$j_{ECh} = aY[U - (\varphi_+ - \varphi_-)] \quad (15)$$

Dove:

- $a$  è un parametro che rappresenta l'area dell'elettrodo;
- $Y$  e  $U$  sono parametri del modello che sono in funzione della profondità di scarica (DoD).

$$DoD = \frac{Vol}{3600Q_{Ah}} \left( \int_0^t j dt \right) \quad (16)$$

Dove:

- $Vol$  è il volume della batteria;
- $Q_{Ah}$  è la capacità elettrica totale della batteria espressa in Ampere per ora.

$$Y = \left( \sum_5^{n=0} a_n (DoD)^n \right) \exp \left[ -C_1 \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (17)$$

$$U = \left( \sum_3^{n=0} b_n (DoD)^n \right) [-C_2 (T - T_{ref})] \quad (18)$$

Dove:

- $C_1$  e  $C_2$  sono le costanti specifiche della batteria del modello NTGK.

#### 1.4.4. Modello termico

Durante il processo di carica e di scarica all'interno della batteria si ha la generazione di calore. Quest'ultimo, in presenza di un buon sistema di raffreddamento, viene (per la maggior parte) dissipato dall'aria dell'ambiente esterno o da altri materiali refrigeranti. Si ha così la propagazione del calore dall'interno della batteria alla superficie esterna (materiale che avvolge la batteria). Parte del calore viene però assorbito dalla batteria stessa con la conseguenza che la temperatura interna aumenta il che come esplicitato nel capitolo b può rappresentare una fonte di danneggiamento per la batteria stessa.

Nel corso degli anni sono stati proposti vari modelli termici. Il modello più completo tiene in considerazione l'accumulo del calore, la convezione e la generazione del calore. Tale modello prende il nome di "energy balance equation" e può essere descritto dall'equazione (19):

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) \approx \frac{\partial (\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda \nabla T + q \quad (19)$$

Dove:

- $\rho$  è la densità media della batteria;
- $c_p$  è la capacità specifica medio:  $\rho c_p = \frac{\sum_i \rho_i c_{p,i} V_i}{\sum_i V_i}$ ;
- $v$  è la velocità dell'elettrolita;
- $\lambda$  è la conduttività termica media nella direzione x, y e z;
- $q$  è la generazione del calore.

Il termine a sinistra dell'uguale rappresenta l'energia accumulata all'interno della batteria, mentre i termini a destra sono la conduzione del calore nelle tre direzioni e la generazione

del calore,  $q$ . È possibile notare come il termine  $\rho c_p v \cdot \nabla T$  che rappresenta il calore convettivo trasferito, è spesso omesso in quanto l'elettrolita ha una mobilità limitata.

Per batterie cilindriche l'equazione (19) può essere riscritta come:

$$\begin{aligned} \rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) &\approx \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda_\varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \end{aligned}$$

Per ridurre la complessità del problema si è soliti utilizzare un modello a parametri concentrati nel quale la temperatura è considerata come uniformemente distribuita lungo tutte le direzioni durante il trasferimento del calore. Questa assunzione può essere fatta quando si ha che lo spessore della singola cella sia contenuto, ovvero quando il numero di Biot ( $B_i = \frac{hL}{\lambda} \ll 1$ ) è minore di 1. Questo modello viene espresso tramite l'equazione (20):

$$\frac{d(\rho c_p T)}{dt} = h A_s (T - T_\infty) + q \quad (20)$$

Dove:

- $h$  è il coefficiente di scambio termico di tipo convettivo;
- $A_s$  è l'area della cella esposta alla convezione;
- $T_\infty$  è la temperatura dell'ambiente nel quale risiede la cella.

Indipendentemente dall'equazione del bilancio di energia scelta (equazione (19) o la più semplice equazione (20)) è necessario definire la generazione del calore,  $q$ . Quest'ultimo include sia il calore reversibile che quello irreversibile. Il calore reversibile deriva dalla variazione di entropia associata alle reazioni chimiche che avvengono all'interno della batteria. Viene, perciò, anche chiamato calore di reazione o calore entropico. Il calore irreversibile deriva invece dal calore dovuta alla polarizzazione della fase attiva e dal calore dovuto all'effetto Joule. Il primo è il calore generato a causa della deviazione tra la tensione del circuito aperto e la tensione operativa. Il secondo è l'energia dissipata a causa della resistenza che la fase solida e l'elettrolita oppongono all'attraversamento da parte degli ioni di litio [3].

L'equazione (21) più completa e complessa utilizzata per descrivere la produzione di calore locale è derivata direttamente dalle analisi elettrochimiche.

$$\begin{aligned} q = & a_{1j} i_{nj} (\phi_1 - \phi_2 - U_j) + a_{1j} i_{nj} \left( T \frac{\partial U_j}{\partial T} \right) + \sigma^{eff} \nabla \phi_1 \cdot \nabla \phi_1 \\ & + k^{eff} \nabla \phi_2 \cdot \nabla \phi_2 + k_D^{eff} \nabla \ln c_2 \cdot \nabla \phi_2 \end{aligned} \quad (21)$$



Dove:

- Il primo termine rappresenta il calore irreversibile;
- Il secondo termine è il calore reversibile o entropico;
- Il terzo è il calore dovuto all'effetto Joule della fase solida;
- Il quarto e il quinto è il calore dovuto all'effetto Joule dell'elettrolita.

Questa equazione, data la presenza di numerosi parametri elettrochimici, richiede eccessivi costi computazionali. È per questo che in caso di piccole batterie al litio nelle quali si può assumere non ci sia calore dovuto ad un cambiamento di fase e che sia presente una sola reazione elettrochimica, si è soliti preferire una formulazione più semplice proposta per la prima volta da Bernardi [20]:

$$q = I(U_{oc} - V) - I \left( T \frac{dU_{oc}}{dT} \right) \quad (22)$$

Al fine di dimostrare la validità delle equazioni (21) e (22) sono stati sviluppati due metodi sperimentali per determinare il valore del calore irreversibile di “q”. Questi metodi sono: “accelerated-rate calorimetry” (ARC) e “isothermal battery calorimeter” (IBC). Il metodo ARC misura il calore espulso dalla batteria e lascia che la temperatura della superficie aumenti adiabaticamente durante l'operazione. È per questo usato in genere nei test per misurare il runaway termico. Il metodo IBC invece mantiene la temperatura della superficie costante durante tutta l'operazione e utilizza sofisticate termocoppie posizionate sulla superficie per misurare il calore [1].

### ***1.5. Sistemi di raffreddamento***

Come visto in precedenza le batterie lavorano in intervalli di temperature ben definiti (15-40 °C) in quanto al di fuori di questi si innescano reazioni chimiche che possono causare problemi di sicurezza e/o diminuzione delle prestazioni operative. Inoltre, bisogna considerare che è necessario che vi sia una variazione di temperatura contenuta (circa 5 °C) tra diverse celle dello stesso modulo e allo stesso modo anche tra moduli diversi di uno stesso sistema. È perciò necessaria una gestione termica della batteria (Battery Thermal Management BTM) in modo da garantire le migliori condizioni di funzionamento per la batteria.

Il BTM può essere sia passivo che attivo e può essere classificato in base al tipo di materiale utilizzato:

- Aria;

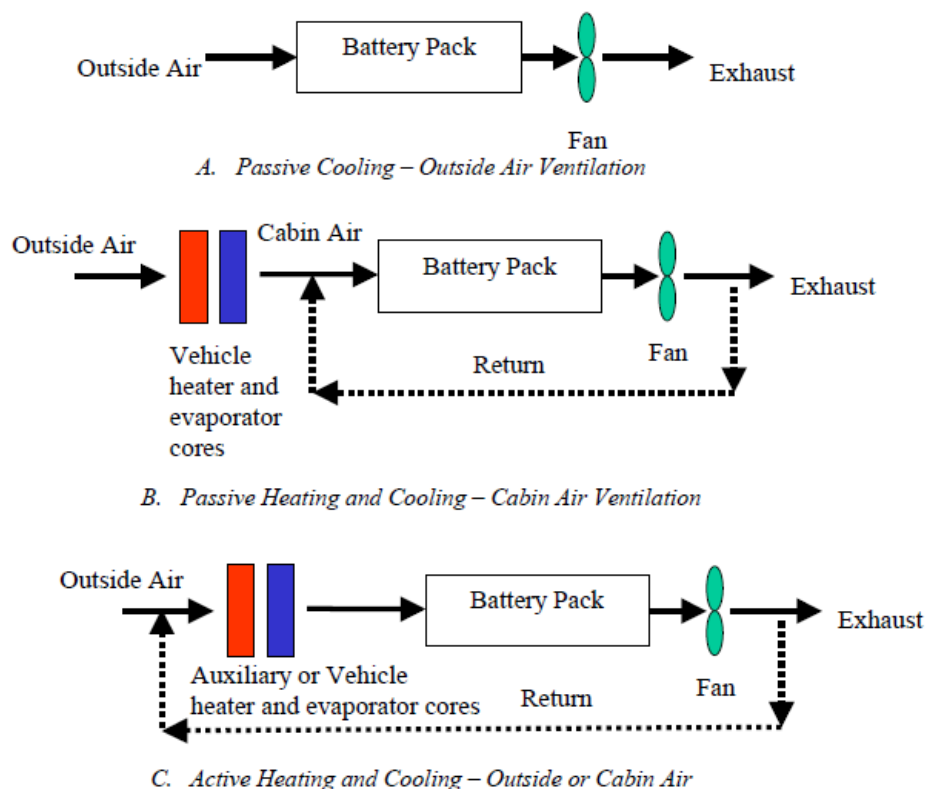
- Liquido;
- PCM (phase change materials);
- Combinazione dei precedenti.

Un BTM si dice passivo quando ad esempio solo l'ambiente esterno viene utilizzato, mentre si definisce attivo quando vi è una fonte integrata nel sistema che riscalda o raffredda quest'ultimo [21].

### 1.5.1. Aria

L'utilizzo dell'aria come mezzo per raffreddare le batterie è stato affrontato in numerosi studi.

I sistemi di raffreddamento che utilizzano l'aria sono sicuramente quelli usati più comunemente in quanto l'attrezzatura necessaria è molto semplice [22]. Possono essere sia passivi, utilizzando una convezione naturale con l'ambiente esterno, sia attivi utilizzando, ad esempio, una convezione forzata utilizzando l'aria esterna o quella interna alla cabina (**Figura 9**).



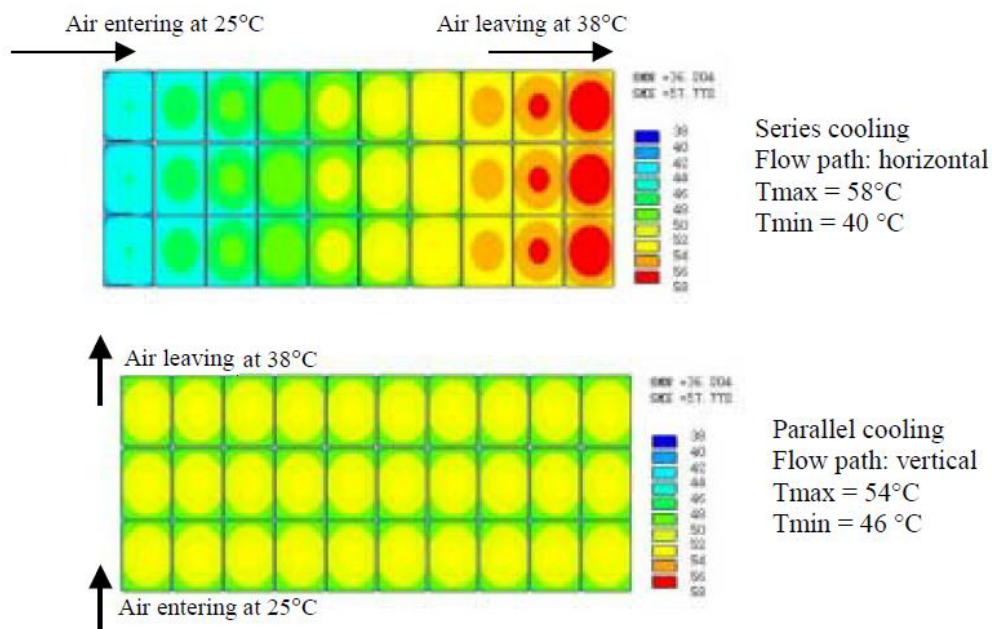
**Figura 9** - Schema generico raffreddamento ad aria [2] [23] [5]

Il trasferimento di calore con l'aria è ottenuto facendo passare (naturalmente o forzatamente) l'aria attraverso i moduli. Esistono due metodi per far fluire aria all'interno di un pacco batterie. Il primo metodo consiste in un raffreddamento in serie dove l'aria entra da un lato del pacco ed esce dal lato opposto. Si ha così che tutti i moduli sono attraversati dalla stessa quantità d'aria. Ciò implica che la temperatura dell'aria in ingresso del pacco è minore di quella in uscita, si ha ovvero che man mano che l'aria fluisce all'interno del pacco batteria si riscalda sempre di più. Si avrà allora che la capacità di raffreddare i moduli sarà massima vicino all'entrata, mentre andrà via via diminuendo nel mentre ci si avvicina all'uscita.

Il secondo metodo è un raffreddamento in parallelo dove la portata d'aria viene divisa in parti uguali e ogni parte di questa raffredda un modulo diverso. Questo è il metodo più diffuso ed è usato in molti veicoli elettrici o ibridi come Toyota e Honda (Toyota RAV4-EV, Toyota Prius e Honda Insight HEV). Rispetto al raffreddamento in serie, quello in parallelo risulta essere più efficace in quanto l'aria lambisce un singolo modulo e così si ottiene una distribuzione della temperatura più uniforme all'interno del pacco batteria.

È possibile avere anche combinazioni dei due metodi in base alla geometria e alle dimensioni dei moduli [5].

Uno studio quantitativo dei due metodi è stato affrontato da Pesaran [21]. Egli osserva che utilizzando il raffreddamento in parallelo si ottiene una distribuzione della temperatura più uniforme tra i moduli del pacco batteria (**Figura 10**), ma nota anche che un modulo sottoposto a raffreddamento in serie raggiunge prima lo stato stazionario in quanto questo metodo utilizza una portata maggiore (nel sistema in parallelo la portata viene divisa equamente tra i moduli).

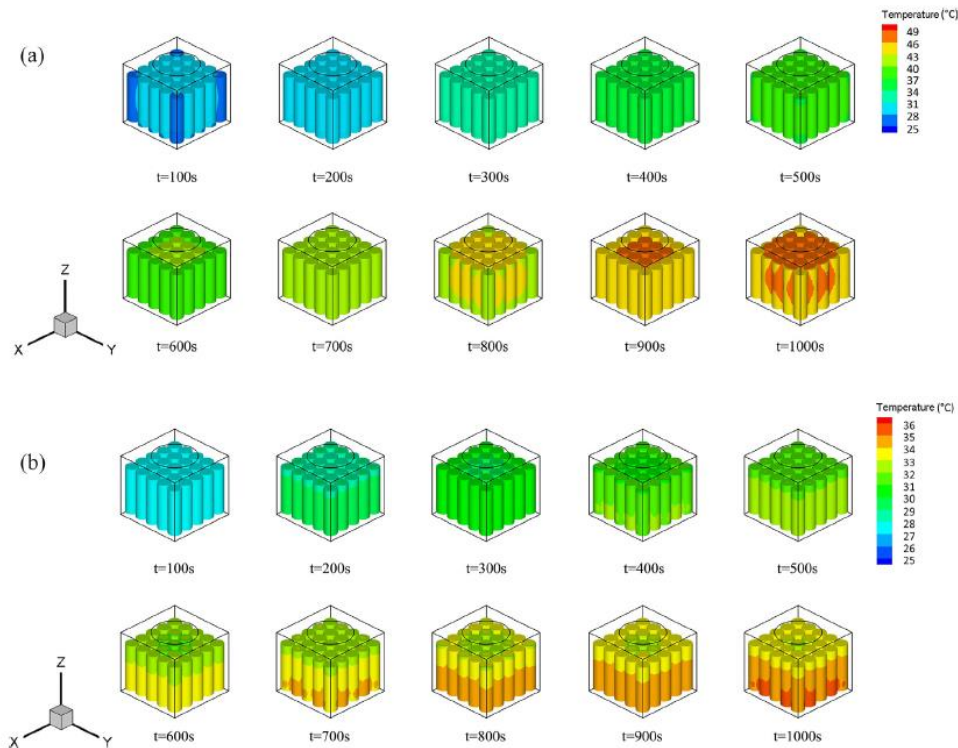


**Figura 10** - Confronto tra raffreddamento in serie e in parallelo [21]

Rispetto ai sistemi basati sull'utilizzo di liquido, quelli ad aria necessitano di meno massa e non soffrono di problematiche dovute alle perdite di materiali che in altri sistemi possono causare (nei peggiori dei casi) cortocircuiti. Inoltre, necessitano di un minor numero di componenti e di conseguenza anche il loro costo è ridotto. Però, poiché l'aria ha un basso coefficiente convettivo rispetto agli altri materiali e poiché ha anche una bassa capacità termica è difficile ottenere le stesse prestazioni degli altri sistemi ed avere temperatura uniforme all'interno di una cella o tra più celle in uno stesso modulo [24].

Sono numerosi gli articoli che testimoniano l'inefficienza dei sistemi di raffreddamento a base d'aria quando si utilizzano correnti di scarica elevate. A testimonianza di ciò si elencano di seguito alcuni lavori.

Nello studio condotto da Wang [22] si evince che per batterie di piccola capacità (nello studio si usano batteria aventi capacità nominali di 1.5 Ah) l'utilizzo dell'aria come sistema di raffreddamento è sufficiente. Il modulo utilizzato in questo studio è visibile in **Figura 11**, dove si può osservare la presenza di batterie cilindriche.



**Figura 11** - Raffreddamento di un modulo con a) convezione naturale e b) convezione forzata [22]

Wang osserva che è possibile utilizzare la sola convezione naturale per raffreddare il modulo quando la temperatura ambiente è inferiore ai 20 °C e, contemporaneamente, la corrente di scarica è al più 3C. Se invece la temperatura ambiente è superiore a 35 °C è necessario utilizzare una convezione forzata, con una velocità dell'aria superiore a 1 m/s. Lo studio mostra inoltre che la convezione naturale non è in grado di mantenere tutte le celle dello stesso modulo ad ugual temperatura, facendo sì che le celle al centro del modulo siano quelle a temperatura maggiore, come mostrato in Figura 11a. Mentre nel caso di convezione forzata (Figura 11b), essendo l'aria soffiata dall'alto si ha che la temperatura maggiore si ha per le celle più esterne poiché la velocità dell'aria vicino ai bordi è minore rispetto alla parte centrale del modulo.

Anche Pesaran nel suo studio mostra che per veicoli ibridi (HEV) l'aria è adeguata come mezzo di raffreddamento solo se si ha un ibrido parallelo, mentre per ibrido serie e per veicoli puramente elettrici è necessario utilizzare soluzioni diverse come, ad esempio, sistemi basati sull'utilizzo di materiali liquidi [21].

Chen e Evans invece osservano che usando correnti di scarica elevate la temperatura sulla superficie diminuisce anche se di poco se si migliora il raffreddamento ad aria (si passa da convezione naturale a forzata), mentre il miglioramento non ha effetti sensibili sul cuore del modulo [25]. Se invece si utilizzano bassi C-rate si osserva che anche all'interno del modulo vi è un abbassamento delle temperature.

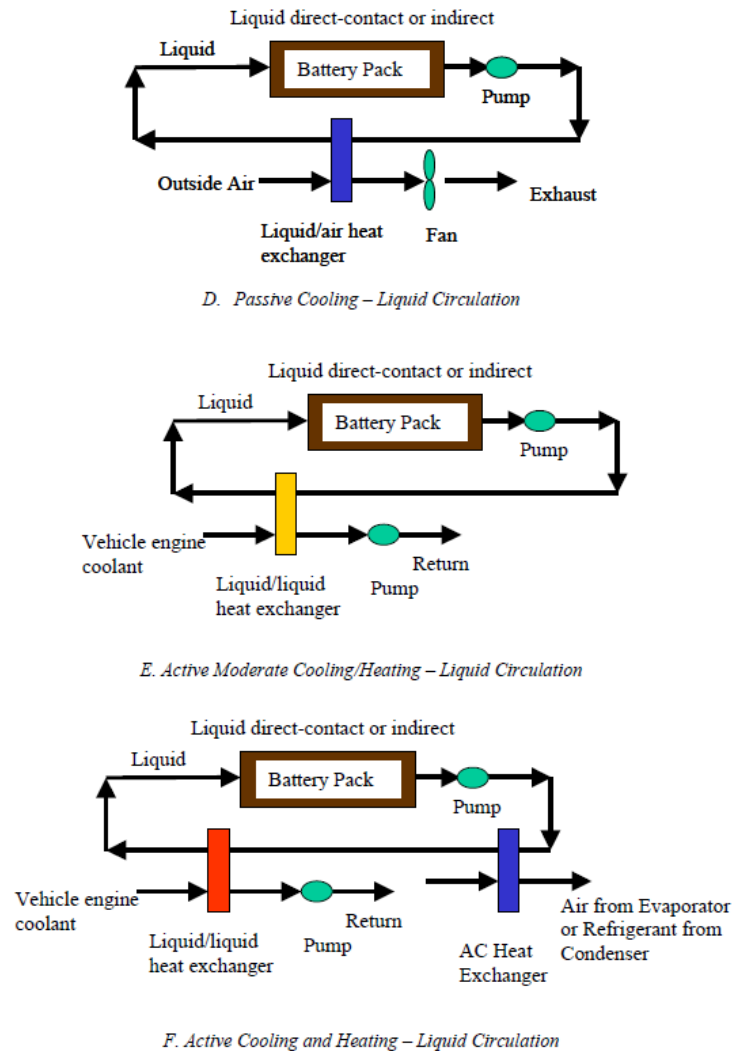
### ***1.5.2. Liquido***

Il trasferimento di calore tramite liquido può essere ottenuto attraverso l'utilizzo di piccole tubazioni che circondano i moduli; tramite un involucro che avvolge il modulo; sommergendo i moduli in un fluido dielettrico; oppure ponendo il modulo a contatto con un cold plate. In base al tipo di raffreddamento scelto è necessario utilizzare un liquido diverso: se il liquido non è in contatto con i moduli allora si può usare acqua, glicole o refrigeranti usati in campo automobilistico ad esempio; se invece si ha contatto diretto è necessario usare un liquido dielettrico, come olii minerali o liquidi siliconici [5].

Il raffreddamento a liquido può essere classificato anche come: raffreddamento a fase singola (il fluido non cambia mai di fase) oppure come raffreddamento con cambiamento di fase (evaporizzazione e/o condensazione del fluido/vapore) [1].

A parità di portata un sistema di raffreddamento a liquido di tipo a immersione riesce a smaltire maggior calore rispetto all'aria grazie al fatto che l'olio utilizzato ha maggior conducibilità termica [5] [24]. Però, poiché l'olio ha alta viscosità si devono usare piccole perché altrimenti sarebbe necessario avere pompe dall'elevata potenza. Ciò limita il vantaggio dell'olio rispetto all'aria che invece non ha particolari restrizioni sulla portata utilizzabile. Se invece si utilizzano metodi indiretti di raffreddamento si ha una perdita prestazionale dovuta al fatto che il liquido deve fluire all'interno di tubi che generano resistenza al passaggio del fluido [5].

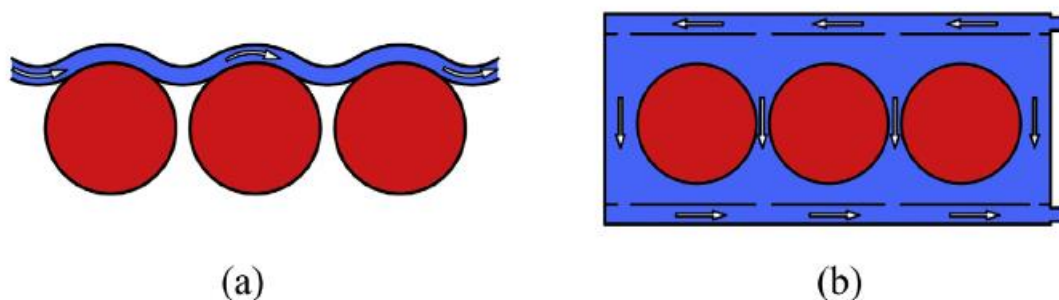
Come per l'aria anche per i sistemi di raffreddamento a liquido possono essere attivi o passivi. Di seguito viene proposto da Pesaran uno schema generico per il raffreddamento a liquido (**Figura 12**).



**Figura 12** - Schema generico raffreddamento a liquido [2] [23] [5]

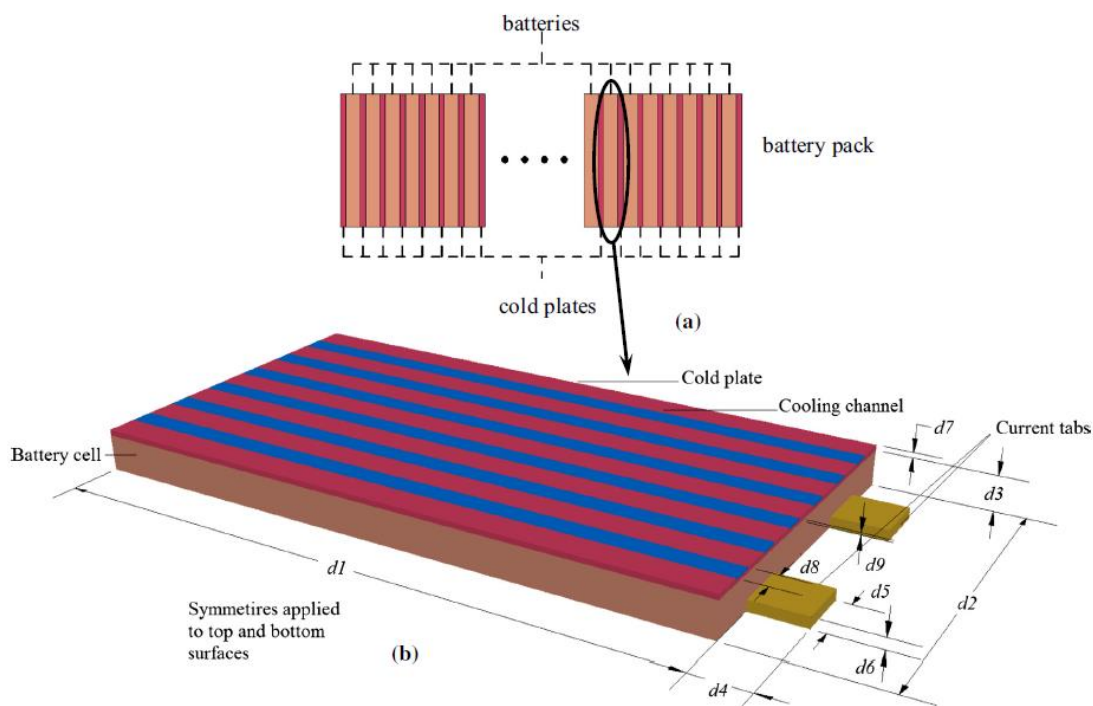
I raffreddamenti a liquido sono sicuramente più performanti ed occupano meno volume di quelli ad aria, ma possono essere soggetti a perdite e, a causa della complessità del sistema e del numero di componenti necessari, hanno anche un costo maggiore. Inoltre, bisogna considerare che per questi sistemi sia la manutenzione che la riparazione dei guasti comporta un ulteriore aumento dei costi [24].

Produttori di veicoli puramente elettrici, come Tesla hanno utilizzato tubi a forma di onda per raffreddare le batterie (**Figura 13a**). Questa soluzione anche se non permette di avere le stesse prestazioni di un raffreddamento diretto, in quanto solo una parte della superficie esterna della batteria entra a contatto con la tubazione, risulta però essere la migliore in quanto a sicurezza. Rispetto alla soluzione rappresentata in **Figura 13b** (modulo avvolto da un involucro), l'utilizzo di tubi a forma di onda permette che i collegamenti tra il serbatoio che contiene il liquido e i tubi siano esterni al modulo limitando al minimo la presenza di possibili perdite. Un ulteriore vantaggio è sicuramente rappresentato dalla diminuzione dello spazio e del peso del modulo [1].



**Figura 13** – **a.** raffreddamento con tubi a forma d’onda; **b.** raffreddamento con modulo avvolto da un involucro [1]

Un compromesso tra prestazioni di raffreddamento e sicurezza può essere ottenuto usando i cold plates. Huo nel suo lavoro [26] utilizza un sistema di raffreddamento “cold plate” dotato di piccoli canali per dissipare il calore prodotto da una batteria pouch a ioni di litio (**Figura 14**).



**Figura 14** - Sistema di raffreddamento “cold plate” [26]

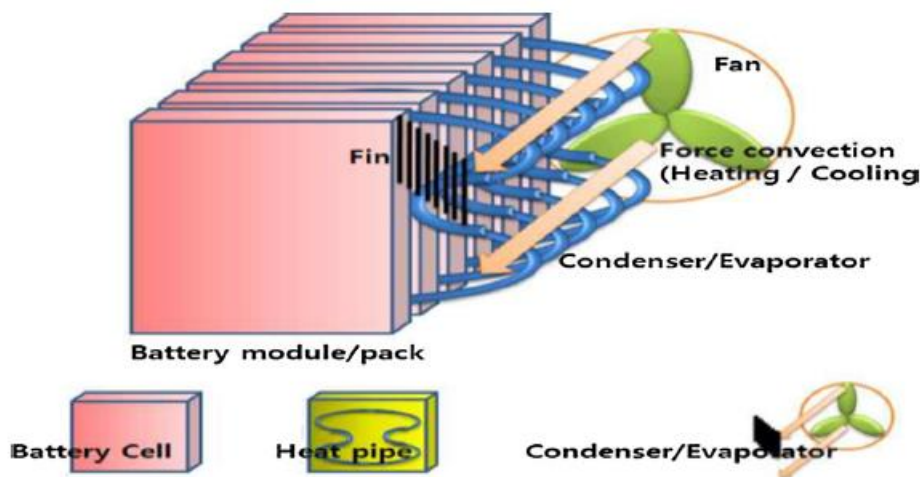
Questo sistema, infatti, permette prestazioni migliori dell’aria (ma peggiori dell’immersione della batteria in un liquido dielettrico), ma al contempo limita i rischi dovuti a perdite o a infiltrazioni di liquido all’interno della cella. Questo sistema a liquido permette la rimozione del calore della cella attraverso la parete metallica attraversata al suo interno da piccoli canali contenenti il liquido, garantendo una diminuzione della temperatura massima e mantenendo uniforme la temperatura lungo la superficie. Il confronto conto con un



raffreddamento ad aria mostra che la cella se sottoposta alla stessa corrente di scarica rimane ad una temperatura accettabile col raffreddamento a liquido, mentre si ha un runaway termico utilizzando l'aria.

### 1.5.3. Heat pipes

I tubi di calore o heat pipes sono stati oggetto di numerosi studi negli ultimi anni. Un heat pipe è composto da una coppia concentrica di tubi di metallo termoconduttori, ad esempio in rame o alluminio, dove quello esterno di contenimento è sigillato e contiene una certa quantità di fluido refrigerante; il resto del tubo è riempito unicamente dal vapore del liquido stesso, di modo che non siano presenti altri gas (**Figura 15**). Il fenomeno fisico per cui è possibile lo scambio termico tra le sorgenti senza nessun'altro apporto energetico esterno, si basa unicamente sui passaggi di stato di evaporazione (da liquido a gassoso) e condensazione (cambiamento di stato inverso, da gassoso a liquido) del liquido refrigerante interno.



**Figura 15** - Schema generale di un raffreddamento con utilizzo di heat pipes [16]

Essendo utilizzato un fluido in alcune ricerche questo sistema di raffreddamento viene catalogato con raffreddamento a liquido [23].

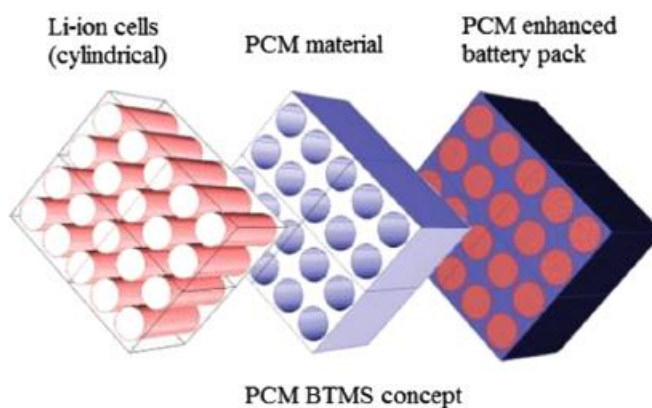
Nei primi studi si sono effettuate prove usando la combinazione di heat pipes e aria. Wu, ad esempio, suggerì l'utilizzo di heat pipes con alette in alluminio per raffreddare grandi batterie al litio, ma osservò la difficoltà di dissipare il calore al centro della batteria senza la presenza di ventole di raffreddamento lungo la sezione di condensazione. Anche Tran ha proposto piatti heat pipes per raffreddare le batterie di un sistema ibrido (HEV) sotto condizioni di convezioni naturali o forzate [2].

Al contrario, Rao ha sperimentalmente esaminato la possibilità di utilizzare un raffreddamento tramite heat pipes combinato con liquido per raffreddare batterie

commerciali di tipo  $\text{LiFePO}_4$ . Questi ha osservato che per potenze minori di 50 W la massima temperatura può essere controllata sotto i  $50^\circ\text{C}$ , mentre per ottenere una differenza di temperatura sotto i  $5^\circ\text{C}$  è necessaria una potenza inferiore ai 30 W [27].

#### 1.5.4. PCM

I sistemi che utilizzano liquido o aria fanno sì che il sistema finale si voluminoso, costoso e complesso (si devono usare pompe, ventole, soffiatori e altri accessori) [23]. Il PCM (phase change material) è un metodo di raffreddamento passivo e sfrutta la capacità del materiale di cambiare fase. Il calore prodotto dalla batteria dapprima va verso il PCM, dopodiché si ha uno scambio di calore tra il PCM e l'involucro esterno e infine il case esterno scambia calore con l'aria dell'ambiente (**Figura 16**). In questo modo il PCM riesce a raffreddare la batteria quando la temperatura esterna è elevata, ma può anche riscaldare la batteria quando l'ambiente è freddo [2].



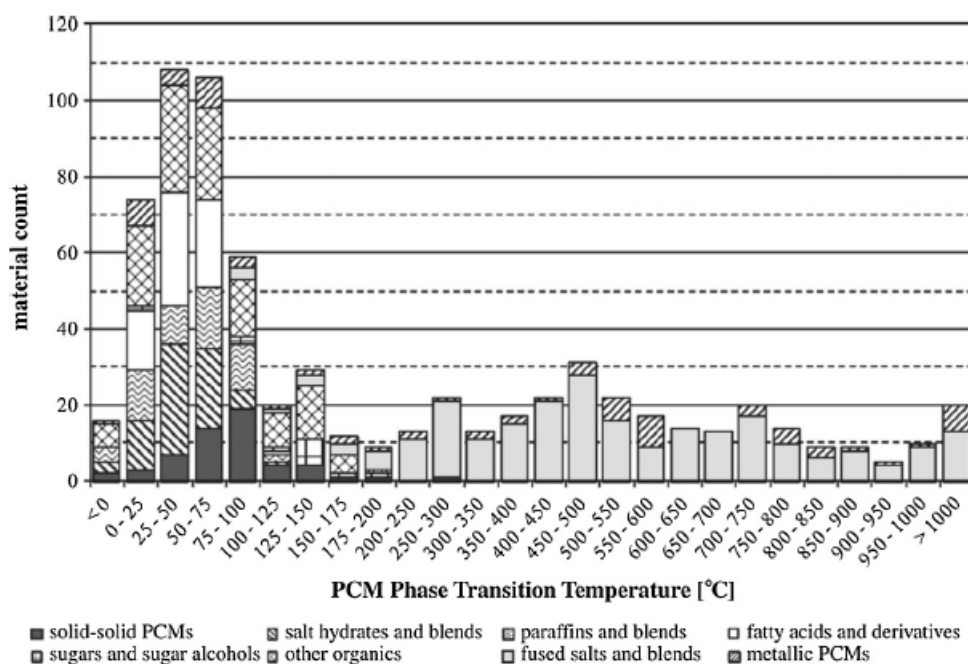
**Figura 16** - Schema generale di un raffreddamento tramite PCM [2]

Il PCM è una cera di paraffina che si scioglie tra i  $40$  e i  $45^\circ\text{C}$  e ha un calore latente di fusione/solidificazione di  $195\text{ kJ/kg}$ . La cera riempie tutti gli spazi tra più celle ed ha una densità pari a  $822\text{ kg/m}^3$  in forma solida e di  $910\text{ kg/m}^3$  in forma liquida [2].

La scelta del materiale viene effettuata in base: alla temperatura di fusione in modo che rientri nell'intervallo di lavoro desiderato; al calore latente; alla variazione di volume durante il cambiamento di fase che deve essere più piccolo possibile in modo da non creare tensioni all'interno del modulo. Inoltre, è necessario che sia stabile, non velenosa e non infiammabile ed infine che sia disponibile in grandi quantità a un costo contenuto [23].

Un confronto tra i diversi materiali è visibile in **Figura 17**.

La paraffina riesce a soddisfare queste richieste essendo non tossica, non corrosiva, stabile, economica ed avente un elevato calore latente.



**Figura 17** - Confronto tra diversi materiali candidati all'utilizzo per soluzioni PCM [16]

Si è ricavato che è preferibile avere PCM aventi una temperatura di fusione inferiore a 45 °C e una temperatura massima della batteria inferiore a 50 °C [28].

Nello studio condotto da Khateeb [29] si evidenzia come la bassa conduttività termica sia un problema dei PCM. Si osserva, infatti, che usando il PCM al centro delle celle le temperature aumentano di 26.25-30 °C, mentre agli estremi di 18.75-22.5 °C. Ciò è dovuto al fatto che il PCM vicino al centro delle celle sia completamente fuso durante la scarica, mentre la parte vicino alle estremità no.

Per migliorare la conduttività termica della paraffina, molti materiali aventi alta conduttività sono stati aggiunti alla paraffina. L'utilizzo di questi materiali però modificare la stabilità e la robustezza del modulo batteria. Proprio per questo motivo vi è ancora molta ricerca su quali siano i PCM composti migliori e pochi riferimenti in letteratura.

## Capitolo 2 – Creazione modello geometrico

In questo capitolo viene descritto il modello geometrico utilizzato per le successive fasi di simulazione e la mesh necessaria per mappare il solido.

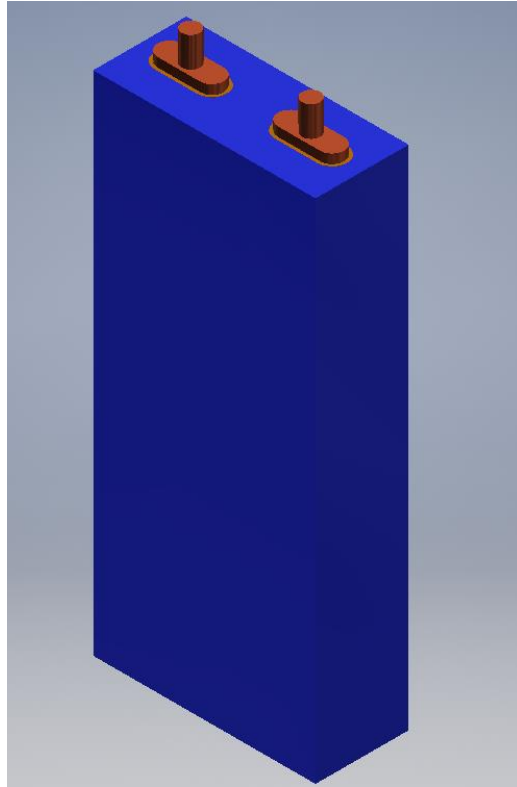
Si è proceduto dapprima a creare ogni elemento solido mediante il software Autodesk Inventor. Successivamente si è generato il file CAD .stp dell'assieme costituito dai singoli componenti. Si è poi importato il CAD all'interno del software ANSYS Fluent.

Infine, è stata eseguita una “meshatura” della geometria necessaria per mappare correttamente il solido.

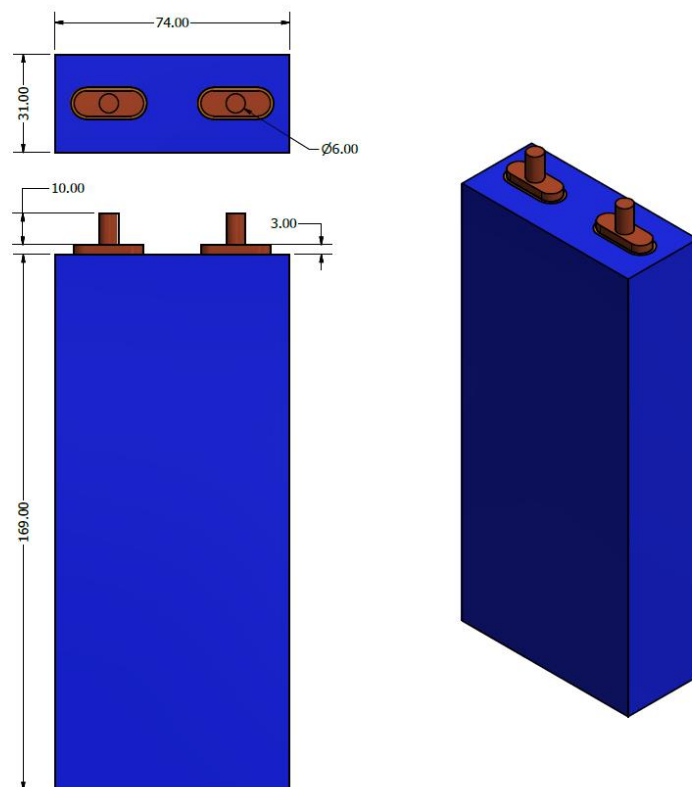
### *2.1. Geometria batteria*

In questa sezione è presentata la geometria e le dimensioni della cella e di tutti gli elementi che la compongono.

La cella utilizzata in questo lavoro è rappresentata in **Figura 18** e in **Figura 19** dove nella prima immagine è possibile osservare la geometria CAD completa della cella. Questa è costituita da due terminali in rame, da una parte attiva, da un case esterno in alluminio e due separatori cartacei. Vi è infine uno strato d'aria molto sottile (1 mm) avente lo scopo di evitare il contatto diretto tra parte attiva e case esterno. Nella seconda immagine sono, invece, indicate le dimensioni degli elementi in vista della cella.

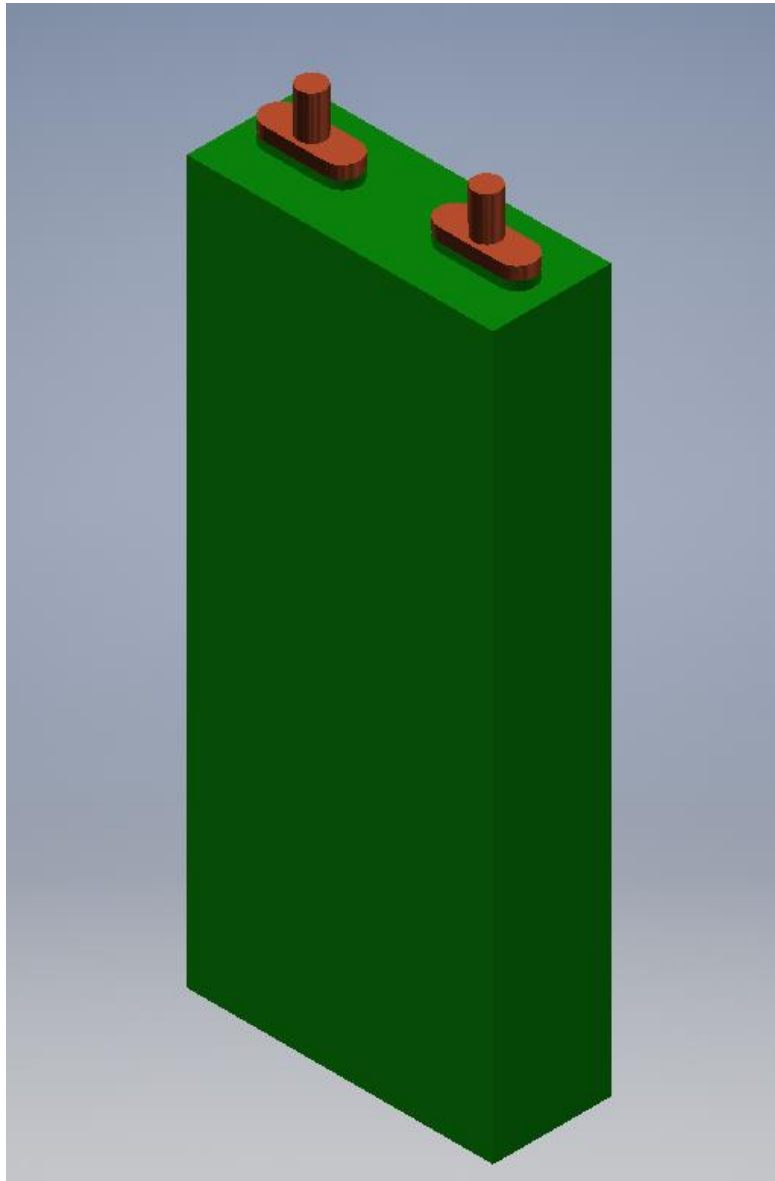


**Figura 18 - CAD cella**

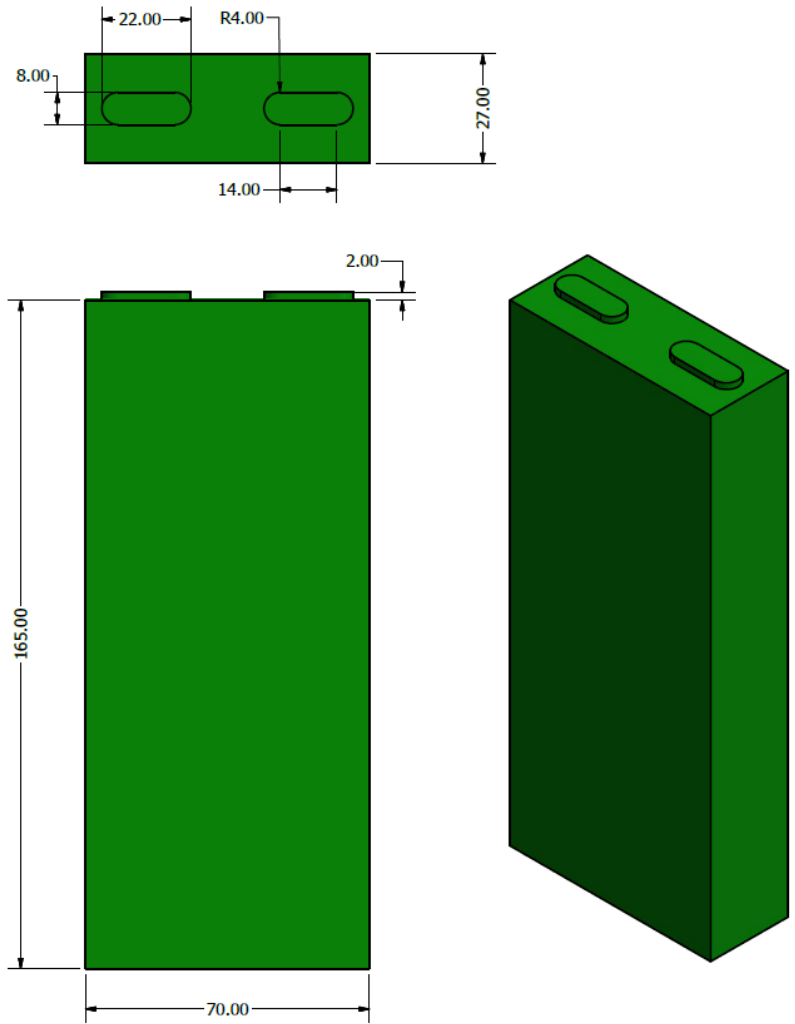


**Figura 19 - Dimensioni principali della cella**

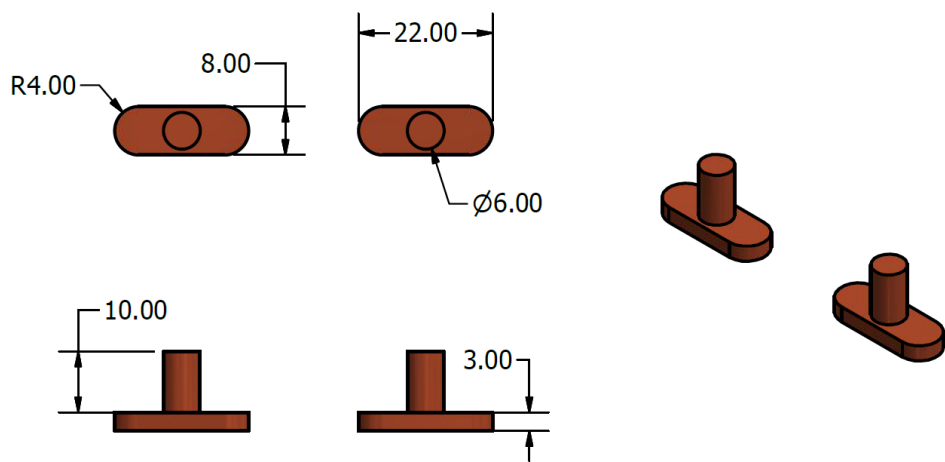
Punto di partenza per la definizione del modello geometrico è stato l'utilizzo di un solido geometrico molto semplice avente lo scopo di replicare la geometria di una cella prismatica di tipo pouch. La cella è costituita essenzialmente da una parte attiva (rappresentata dal parallelepipedo verde, **Figura 21**) che ha la funzione di rappresentare la struttura jerry roll tipica delle batterie prismatiche e da due terminali in rame (**Figura 22**) necessari per collegare gli elettrodi interni alla cella con la cavetteria esterna (**Figura 20**).



**Figura 20** - Geometria cella di tipo pouch

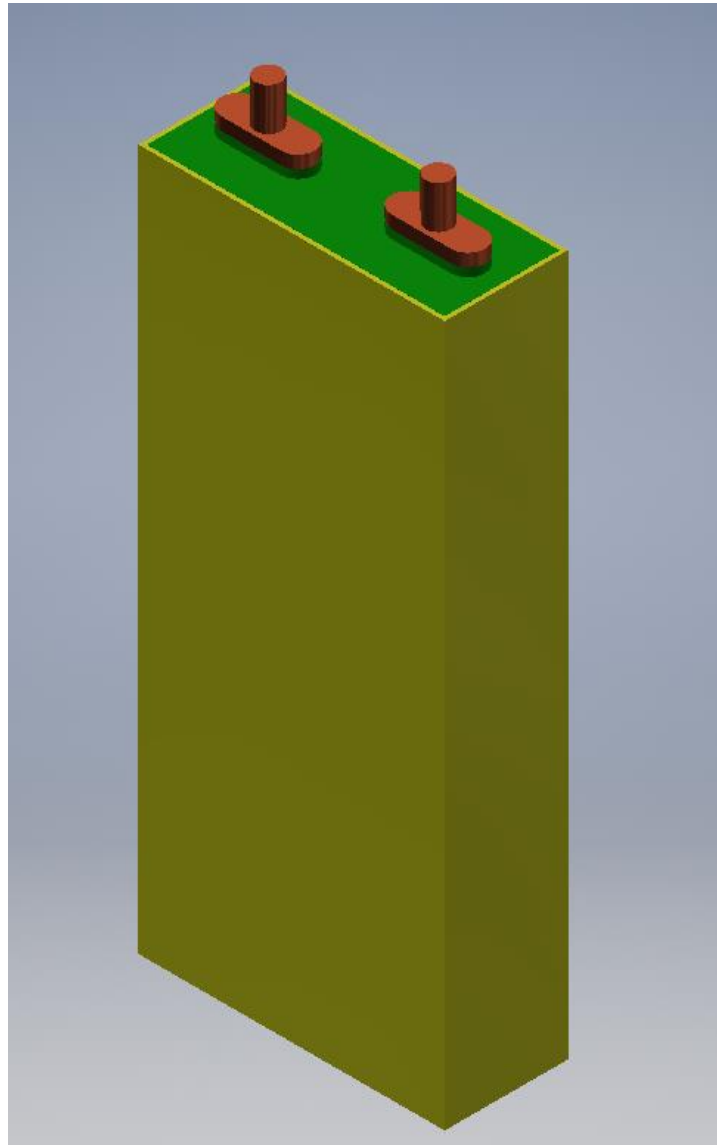


**Figura 21 - Dimensioni parte attiva**



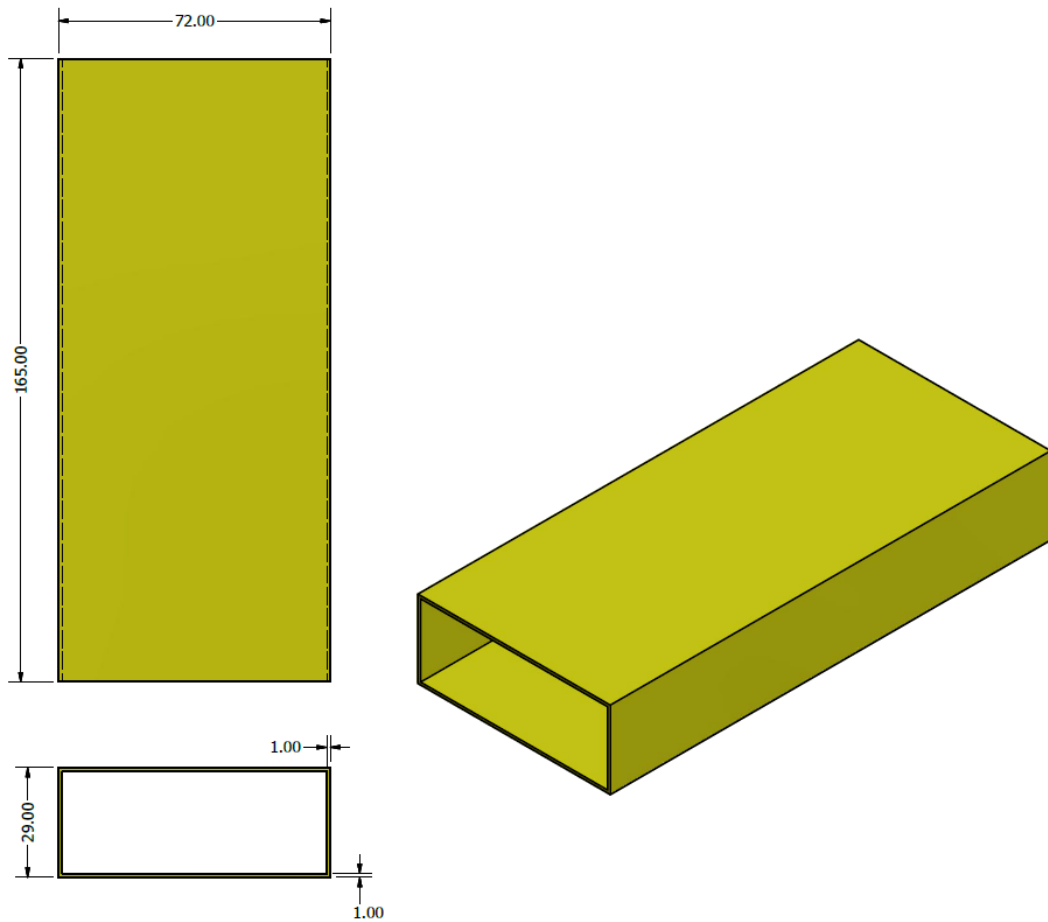
**Figura 22 - Dimensioni terminali in rame**

Il passo successivo è stato l'implementazione di uno strato d'aria attorno alla parte attiva, osservabile in **Figura 23** - CAD cella con strato d'aria. **Figura 23** dove lo strato d'aria è rappresentato in giallo. L'utilizzo di quest'ultimo si è reso necessario in quanto il diretto contatto tra parte attiva e case in alluminio avrebbe generato un cortocircuito. Si è, perciò, optato per la creazione di uno strato d'aria molto sottile (1 mm come è possibile osservare in **Figura 24**, dove sono rappresentate tutte le dimensioni dello strato d'aria).



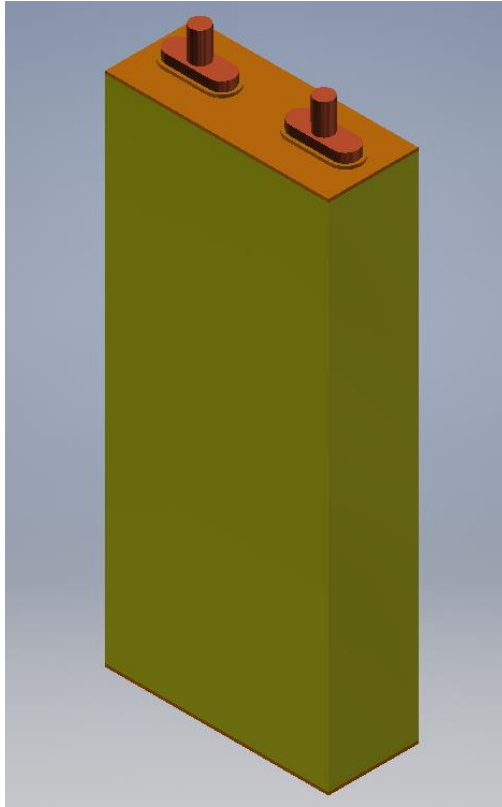
**Figura 23** - CAD cella con strato d'aria



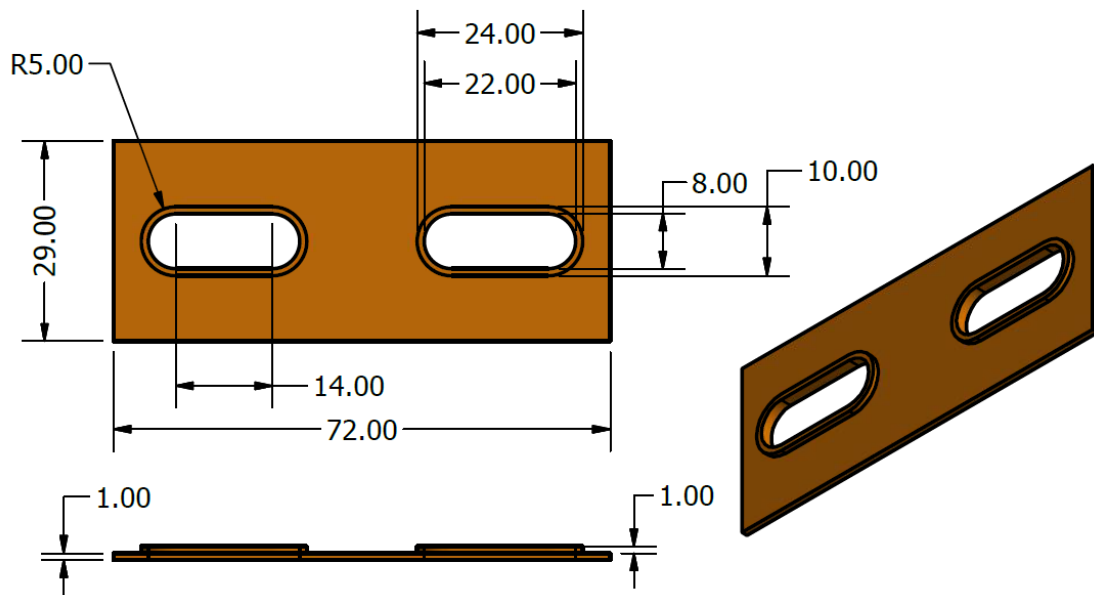


**Figura 24** - Dimensioni strato d'aria

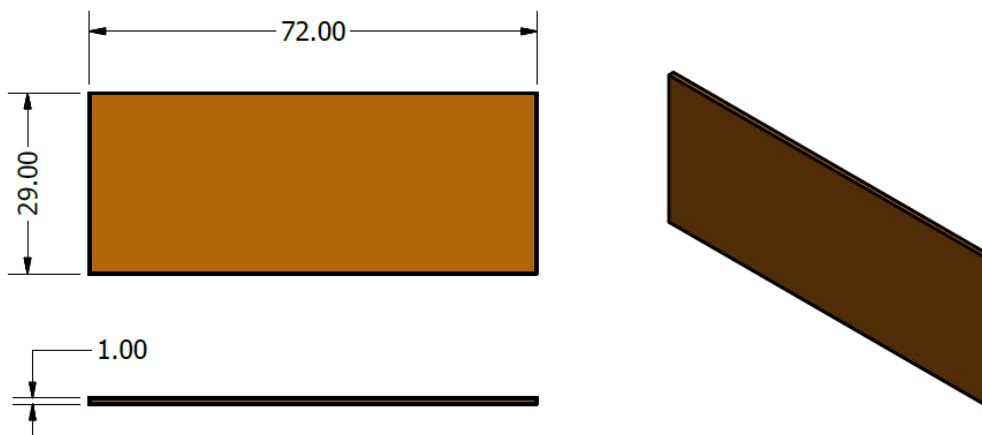
La separazione tra case e parte attiva superiormente e inferiormente è stata invece affidata a due separatori come è possibile osservare in **Figura 25** in arancione. Entrambi i separatori sono costituiti da materiale isolante elettricamente come la carta, aventi uno spessore di 1 mm come è visibile in **Figura 26** e in **Figura 27**. Il separatore è stato sagomato in modo da permettere il contatto tra i terminali e la parte attiva e al tempo stesso separare il case dai terminali.



**Figura 25** - CAD con separatori cartacei

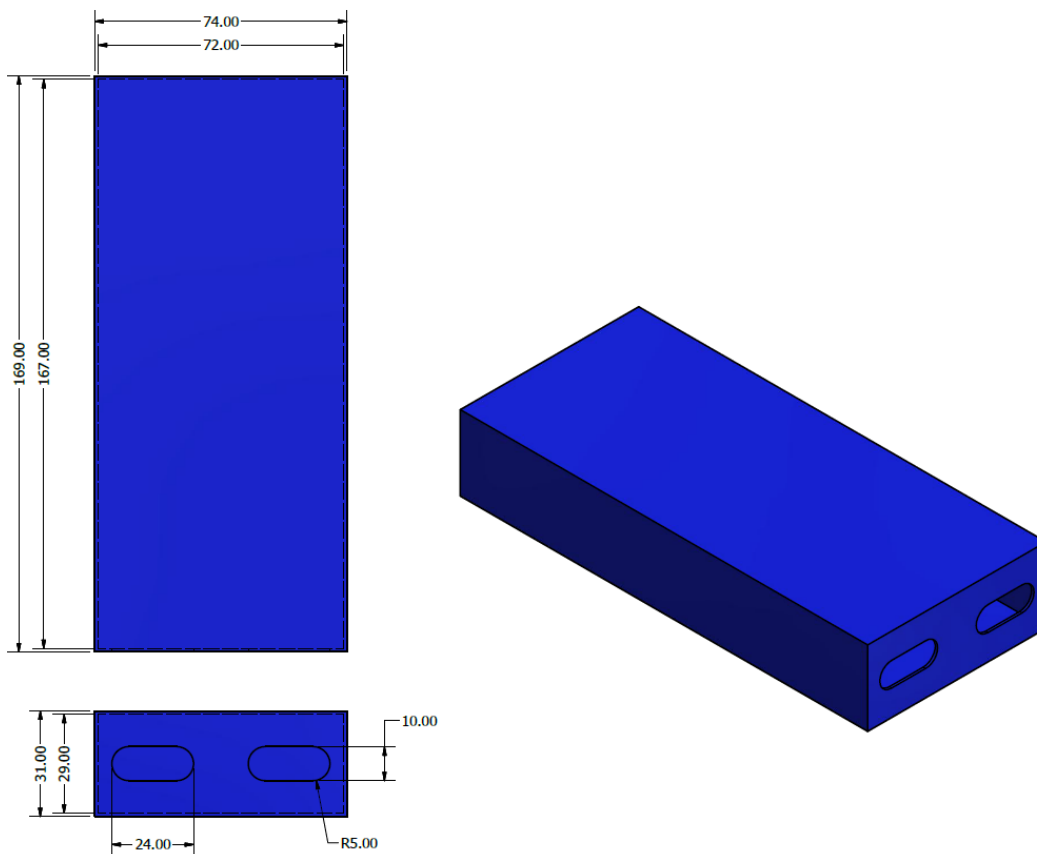


**Figura 26** - Dimensioni separatore cartaceo superiore



**Figura 27** - Dimensioni separatore cartaceo inferiore

Infine, si è implementato il case esterno in alluminio, le cui dimensioni sono indicate in **Figura 28**.



**Figura 28** - Dimensioni case esterno

## 2.2. Generazione mesh

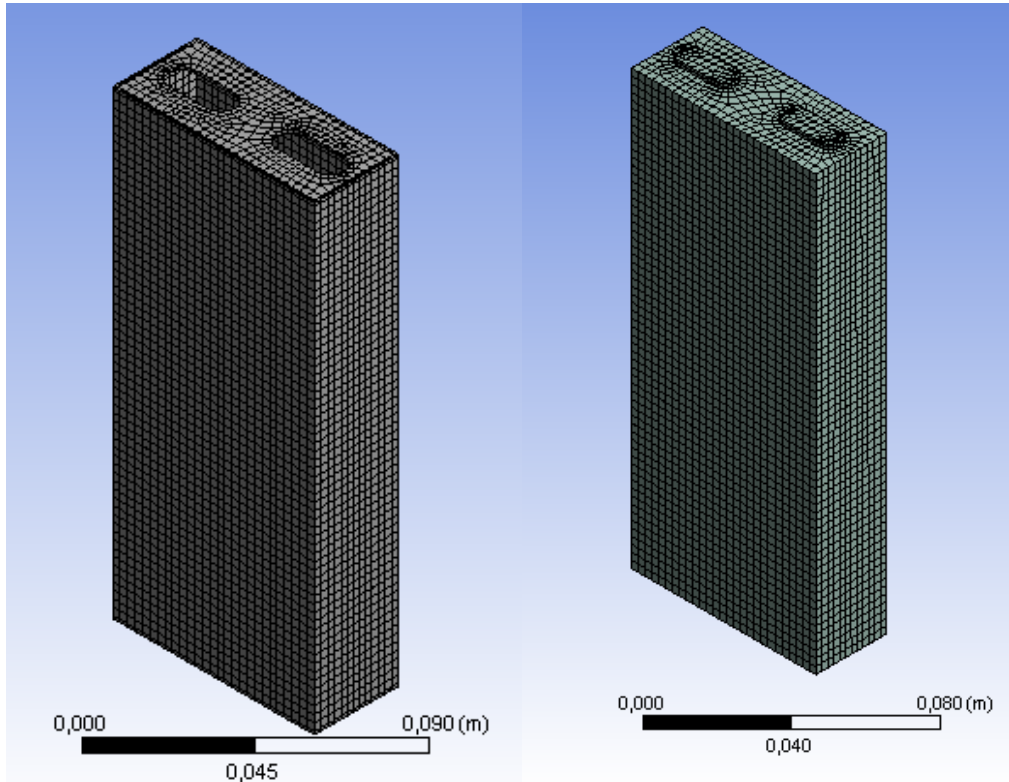
Dopo aver modellato la geometria della cella si è proceduto alla discretizzazione del modello attraverso la creazione di una griglia (mesh) composta da elementi finiti più semplici utilizzando il software ANSYS.

Il primo passo è stato scegliere CFD come *Physics Preference* e Fluent in *Solver Preference* in modo da ottenere una mesh che risultasse più favorevole per il software scelto per la risoluzione del problema. Dopodiché si è agito sulla voce *Relevance Center* che permette di controllare la finezza della mesh dell'intero modello. Una mesh più fine permette di ottenere risultati più accurati, mentre una più grossolana utilizza meno elementi, ma è meno accurata. Nel nostro caso si è scelto per una mesh più accurata, nonostante siano necessarie più risorse computazionali, scegliendo l'opzione *Fine* nel tab *Relevance Center*.

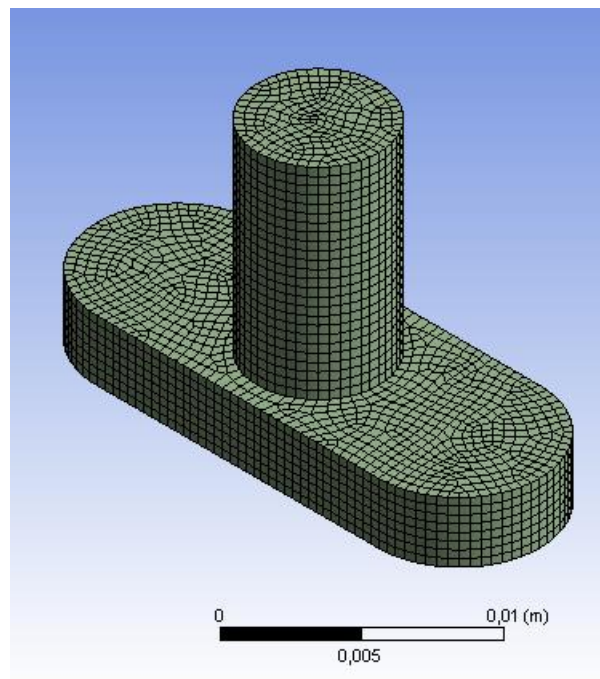
Per ottenere una mesh più "ordinata" ovvero avente elementi più simili tra loro si è utilizzato un *Method Control* per la mesh ovvero uno strumento che applicato ad un solo corpo geometrico genera una mesh automatizzata indipendente da quella di altri elementi adiacenti. Nello specifico si è scelto di utilizzare il metodo *MultiZone* ovvero una tecnica di meshing che genera una mappatura indipendente dalla mesh degli altri corpi geometrici. La scelta del *MultiZone* permette di ottenere una mesh composta esclusivamente da esaedri (elementi geometrici a sei facce) selezionando *Hexa* in *Mapped Mesh Type*. Il metodo *MultiZone* è stato utilizzato per quattro elementi diversi: i due terminali in rame, il case esterno e la parte attiva.

In **Figura 29 a.** e **b.** è possibile osservare la mesh ottenuta su ANSYS tramite il metodo *MultiZone* per i corpi "case" e "parte attiva". In **Figura 30** viene invece mostrata la mesh dei terminali.

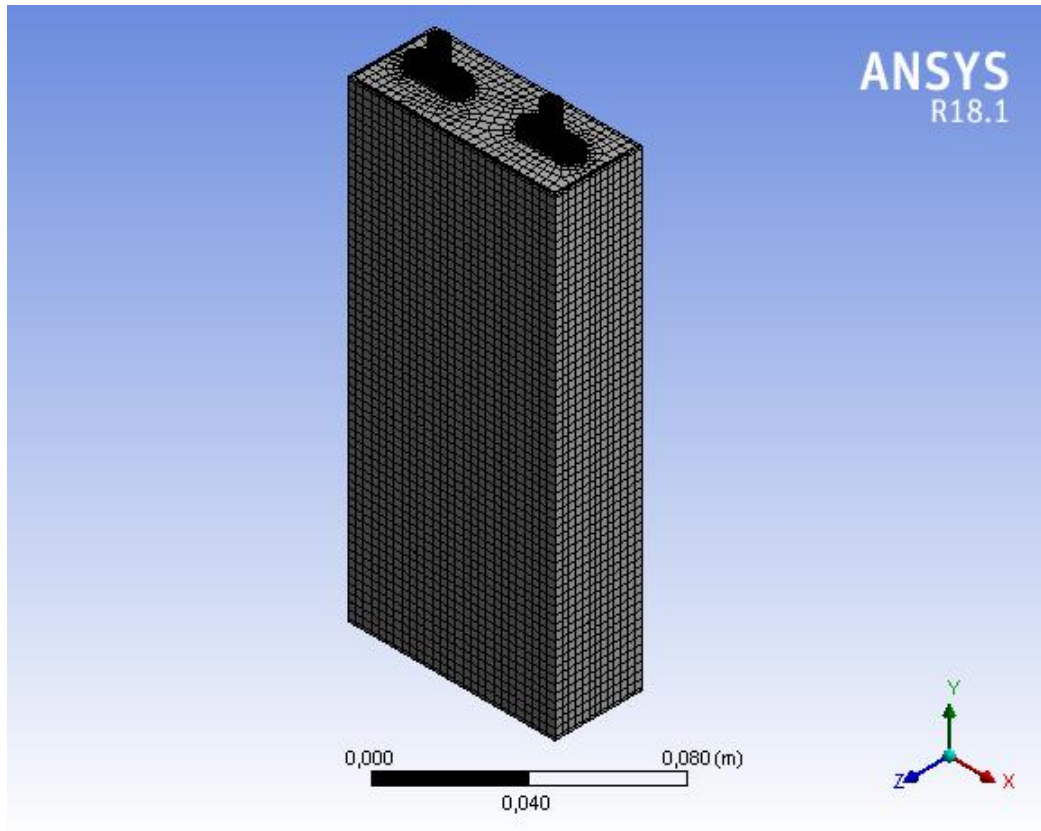
La mesh complessiva della cella è visibile in **Figura 31** dove è possibile osservare come l'utilizzo di *MultiZone* determini l'utilizzo di elementi più piccoli per i due terminali rispetto a quelli utilizzati per il case in modo da ottenere maggiore precisione durante le simulazioni CFD.



**Figura 29** - Mesh ottenuta con *MultiZone* **a.** del case; **b.** della parte attiva



**Figura 30** - Mesh ottenuta con *MultiZone* dei terminali



**Figura 31** – Mesh complessiva della cella

Prima di procedere con l'analisi CFD è stato necessario rinominare gli elementi della cella in modo che questi potessero essere correttamente letti dal software Fluent. Si sono così selezionati sia il solido 3D che le superfici ottenendo le *Named Selection* raccolte nella **Tabella 2**.

**Tabella 2** - *Named Selection* degli elementi della cella

Elemento	<i>Named Selection</i> solido	<i>Named Selection</i> superficie
Parte attiva	e_zone	wall- e_zone
Case	case_zone	wall-case_zone
Terminale positivo	tabp_zone	wall-tabp_zone
Terminale negativo	tabn_zone	wall-tabn_zone
Tab del terminale positivo		tab_p
Tab del terminale negativo		tab_n



## Capitolo 3 – Analisi CFD

In questo capitolo viene presentato il modello Dual-Potential MSMD (Multi-Scale Multi-Dimensional) utilizzato in ANSYS Fluent e la fase preparatoria necessaria per ottenere gli andamenti temporali della temperatura della cella.

La fluidodinamica computazionale o CFD (Computational fluid dynamics) è una branca della meccanica dei fluidi nella quale, grazie all'utilizzo di analisi numeriche e di modelli fisici, è possibile risolvere problemi fluidodinamici. È così possibile studiare l'interazione di liquidi e gas con superfici all'interno di specifiche condizioni al contorno. L'analisi CFD viene principalmente utilizzata per risolvere le equazioni di Navier-Stokes e le equazioni ad esse collegate. I vantaggi di tale analisi rispetto al solo sperimentale sono:

- Costi di progettazione ridotti in quanto è necessario un modello CAD e un computer per effettuare le analisi;
- Tempi di simulazione ridotti;
- Possibilità di analizzare grandezze difficili da misurare direttamente o condizioni difficilmente ripetibili.

La cella di una batteria è costituita da più strati a sandwich di anodo-separatore-catodo che possono essere arrotolati oppure modellati per formare una struttura di tipo jerry roll o prismatica. Risolvere in maniera esplicita ogni strato sarebbe molto costoso in termini di risorse computazionali e di tempo. Per ovviare a questo problema in ANSYS Fluent è presente il modello Dual-Potential MSMD attraverso il quale è possibile studiare la batteria come se fosse un continuo ortotropo. Il modello include tre sottomodelli elettrochimici, ovvero il modello circuitale equivalente (ECM), il modello Pseudo-2D di Newman (P2D) e, infine, il modello empirico di Newman, Tiedemann, Gu e Kim (NTGK).

Con l'utilizzo del modello Dual-Potential MSMD è possibile effettuare un'analisi termica risolvendo le equazioni differenziali nel dominio CFD:

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \sigma_+ |\nabla \phi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \phi_-|^2 + \dot{q}_{ECh} + \dot{q}_{short} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \phi_+) &= -(j_{ECh} - j_{short}) \\ \nabla \cdot (\sigma_- \nabla \phi_-) &= (j_{ECh} - j_{short}) \end{aligned} \quad (24)$$

Dove:

- $\sigma_+$  e  $\sigma_-$  sono le conduttività elettriche effettive per l'elettrodo positivo e negativo;
- $\phi_+$  e  $\phi_-$  sono i potenziali di fase per l'elettrodo positivo e negativo;

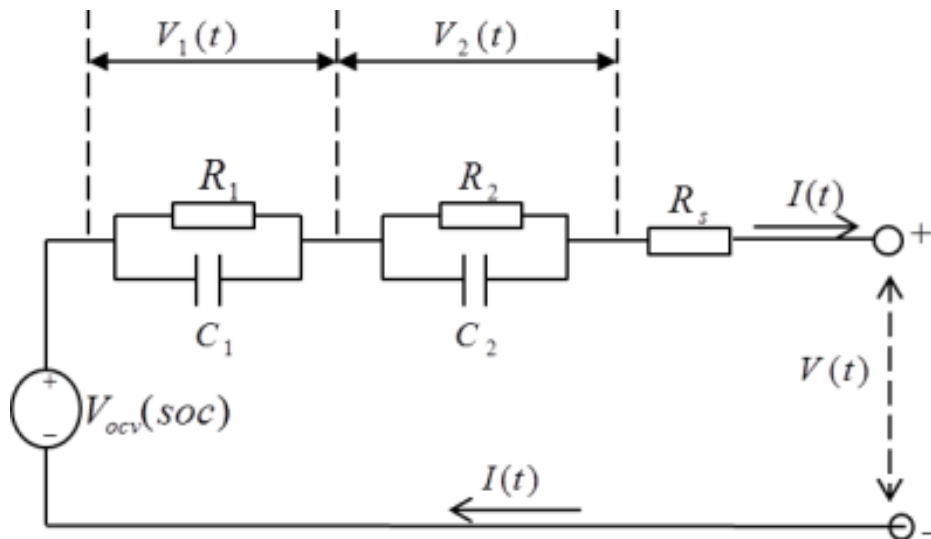


- $j_{ECh}$  e  $\dot{q}_{ECh}$  sono la densità di corrente di scambio e il calore generato dalle reazioni elettrochimiche;
- $j_{short}$  e  $\dot{q}_{short}$  sono la densità di corrente e il calore generato dovuti alla presenza di cortocircuiti interni.

I termini  $j_{ECh}$  e  $\dot{q}_{ECh}$  sono calcolati utilizzando uno dei tre sottomodelli elettrochimici, mentre  $j_{short}$  e  $\dot{q}_{short}$  sono nulli in caso non sia presente alcun cortocircuito.

### 3.1. Definizione modello elettro-termico

Come detto nel capitolo 1.4.2 il modello circuitale equivalente è largamente utilizzato per studiare il comportamento della cella in quanto garantisce precisione nei risultati e al contempo non richiede elevata capacità di calcolo non utilizzando complesse equazioni elettro-chimiche. In ANSYS Fluent il modello circuitale equivalente è ripreso dal lavoro di Chen [30] (modello a sei parametri). Il circuito elettrico che ne risulta è mostrato in **Figura 32**.



**Figura 32** - Circuiti elettrici usati nel modello ECM [19]

La relazione tensione-corrente può essere facilmente ottenuta risolvendo le equazioni del circuito elettrico:

$$V(t) = V_{ocv}(soc) + V_1 + V_2 - \frac{1}{C_1(soc)} I(t) \quad (25)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{1}{R_1(soc)C_1(soc)}V_1 - \frac{1}{C_1(soc)}I(t)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{1}{R_2(soc)C_2(soc)}V_2 - \frac{1}{C_2(soc)}I(t)$$

$$\frac{d(soc)}{dt} = I(t)/3600Q_{Ah}$$

I valori della tensione a circuito aperto, delle resistenze e delle capacità dei condensatori sono espressi in funzione dello stato di carica (SOC) della batteria. Queste funzioni possono essere espresse in due diversi modi in ANSYS Fluent:

- Attraverso una forma polinomiale del quinto ordine:

$$R_s = a_0 + a_1(soc) + a_2(soc)^2 + a_3(soc)^3 + a_4(soc)^4 + a_5(soc)^5 \quad (26)$$

$$R_1 = b_0 + b_1(soc) + b_2(soc)^2 + b_3(soc)^3 + b_4(soc)^4 + b_5(soc)^5$$

$$C_1 = c_0 + c_1(soc) + c_2(soc)^2 + c_3(soc)^3 + c_4(soc)^4 + c_5(soc)^5$$

$$R_2 = d_0 + d_1(soc) + d_2(soc)^2 + d_3(soc)^3 + d_4(soc)^4 + d_5(soc)^5$$

$$C_2 = e_0 + e_1(soc) + e_2(soc)^2 + e_3(soc)^3 + e_4(soc)^4 + e_5(soc)^5$$

$$V_{ocv} = f_0 + f_1(soc) + f_2(soc)^2 + f_3(soc)^3 + f_4(soc)^4 + f_5(soc)^5$$

- Attraverso una funzione esponenziale proposta da Chen [30] :

$$R_s = a_0 \exp[a_1(soc)] + a_2$$

$$R_1 = b_0 \exp[b_1(soc)] + b_2$$

$$C_1 = c_0 \exp[c_1(soc)] + c_2$$

$$R_2 = d_0 \exp[d_1(soc)] + d_2$$

$$C_2 = e_0 \exp[e_1(soc)] + e_2$$

$$V_{ocv} = f_0 \exp[f_1(soc)] + f_2$$

I termini sorgenti dell'equazione (23) e dell'equazione (24) sono sostituite dalle seguenti relazioni:

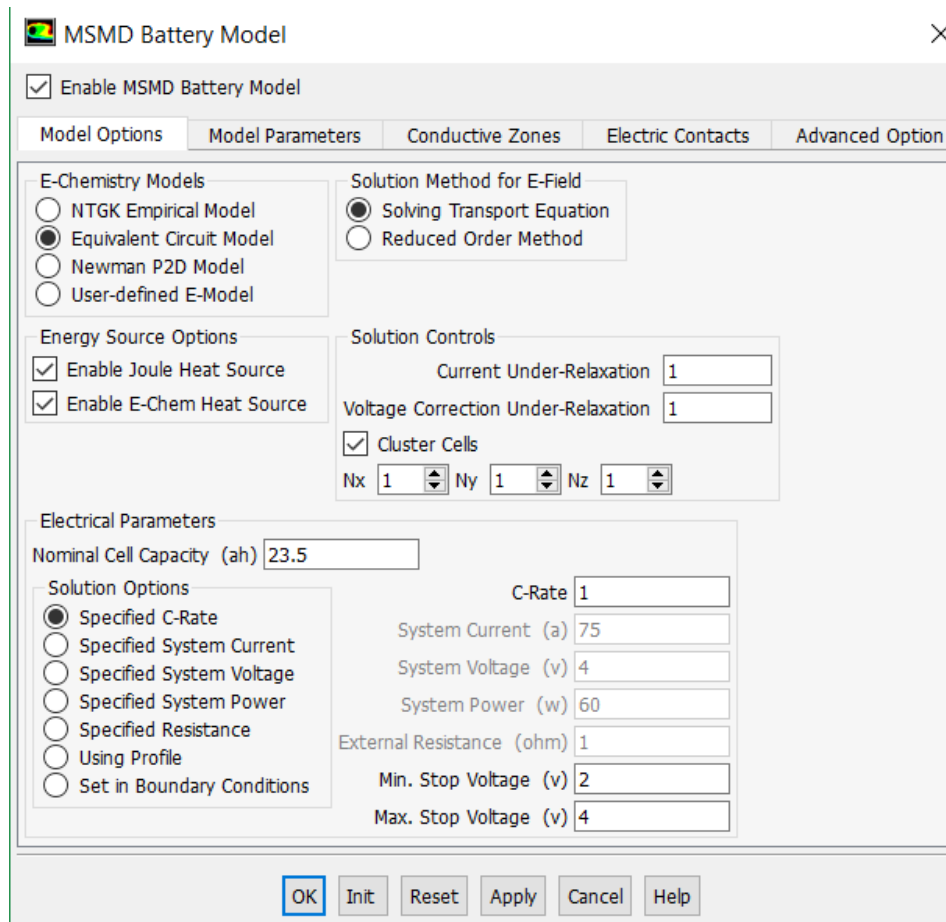
$$j_{Ech} = I/Vol$$

$$\dot{q}_{ECh} = \frac{I}{Vol} \left[ V_{ocv} - (\varphi_+ - \varphi_-) - T \frac{dU}{dT} \right]$$

Dove  $Vol$  è il volume della batteria,  $I$  la corrente e  $V_{ocv}$  la tensione di circuito aperto.

Nel corso del nostro studio, una volta scelto il modello elettro-termico più soddisfacente per le nostre esigenze, si è proceduto a caricare l'add-on necessario per lo studio della cella all'interno del software ANSYS Fluent. Si è quindi caricato il modello Dual-Potential MSMD attraverso il comando *define/models/addon-module* e selezionando la voce "8. Dual-Potential MSMD Battery Model".

Una volta caricato il modello MSMD, in *Model Options* (**Figura 33**) si è selezionato il modello elettrochimico *Equivalent Circuit Model* e si sono definiti i valori della capacità della cella, del C-rate, della minima e massima tensione di funzionamento (**Tabella 3**).



**Figura 33** - Model Option del modello MSMD

**Tabella 3** - Tabella parametri in Model Options

Capacità cella (Ah)	23.5
C-rate	1
Tensione minima (V)	2.0
Tensione massima (V)	4.0

Successivamente si è impostato lo stato di carica iniziale pari a 1, ovvero cella completamente carica e, inoltre, si sono definiti i parametri da utilizzare per il modello ECM nel tab *Model Parameters*. Nel nostro caso si è optato per l'utilizzo dei parametri polinomiali (e non attraverso delle funzioni esponenziali) e, almeno inizialmente, si è deciso di utilizzare per le resistenze e i condensatori parametri indipendenti dal SOC. Si ha così che le equazioni (26) hanno come termini non nulli sono i termini aventi 0 come pedice. I parametri utilizzati per il modello ECM sono sintetizzati nella **Tabella 4**.

**Tabella 4** - Parametri polinomiali di resistenze e condensatori

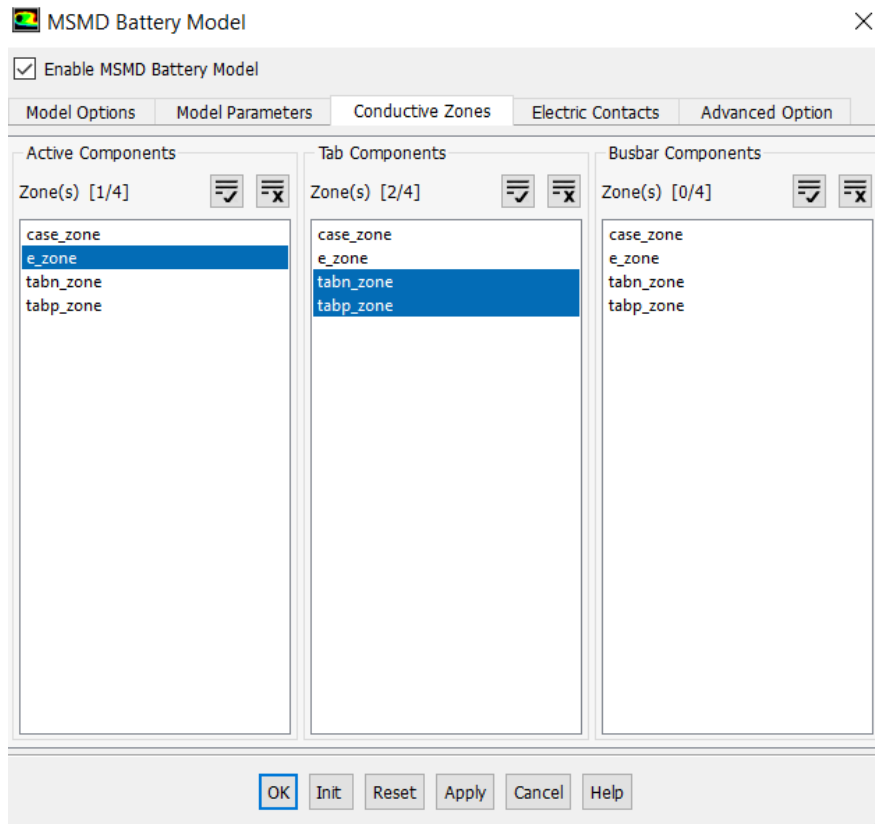
$R_s$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
	0.0032	0	0	0	0	0
$R_1$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
	0.0013	0	0	0	0	0
$C_1$	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
	10615	0	0	0	0	0
$R_2$	$d_0$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
	0.0015	0	0	0	0	0
$C_2$	$e_0$	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$
	4766700	0	0	0	0	0

Per la tensione a circuito aperto si sono utilizzati i parametri in **Tabella 5**.

**Tabella 5** - Parametri polinomiali della tensione a circuito aperto

$V_{ocv}$	$f_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
	2.8683	5.3118	-24.6182	51.7546	-49.6825	17.76

Proseguendo all'interno del modello MSMD si sono definiti gli elementi responsabili della conduzione elettrica nel tab *Conductive Zones* (**Figura 34**). In particolare, si è imposto come *Active Components* la parte attiva indicata dalla named-selection “e-zone”, mentre come *Tab Components* i due terminali in rame (“tabn\_zone” per il terminale positivo e “tabn\_zone” per quello negativo).



**Figura 34** - Zone conduttive del modello MSMD

Infine, nel tab *Electric Contacts* si è provveduto ad assegnare le due superfici “tab\_p” e “tab\_n” come connettori esterni, rispettivamente positivo e negativo.

### **3.2. Materiali**

In questa sezione sono descritti i materiali utilizzati per gli elementi che costituiscono la batteria. Inoltre, viene anche specificato come sono state ricavate alcune proprietà della parte attiva essendo questa costituita da più elementi.

### 3.2.1. Materiale per gli elementi in tensione

Dopo aver definito il modello elettrochimico da utilizzare e aver impostato i parametri necessari per il corretto funzionamento dello stesso si è proceduto alla definizione dei materiali costituenti la cella effettuando una prima distinzione tra elementi che risultano essere in tensione durante la simulazione ed elementi che invece hanno la funzione di isolante elettrico o di rivestimento protettivo.

Gli elementi in tensione del modello sono, innanzitutto, i due terminali ovvero gli elementi che fungono da collegamento con l'elettrodo negativo e con quello positivo. Vi è poi la parte attiva, ovvero quella zona della cella nel quale si manifestano i fenomeni di migrazione degli ioni, la quale è costituita da più strati di materiali diversi. È infatti presente un collettore di corrente negativo al quale si affianca l'elettrodo negativo. Dalla parte opposta della cella vi è un collettore di corrente positivo affiancato, a sua volta, da un elettrodo positivo. Infine, vi è un separatore avente la funzione di impedire il contatto diretto tra i due elettrodi.

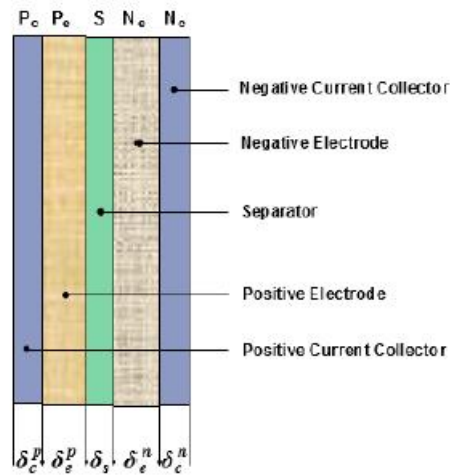
I due terminali sono costituiti da rame le cui proprietà termiche ed elettriche sono sintetizzate nella **Tabella 6**.

**Tabella 6** - Proprietà dei terminali

Proprietà	Cu (Rame)
Densità, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	8300
Calore specifico, $c_p$ [J/(kg*K)]	381
Conduttività termica, $K$ [W/(m*K)]	387.6
Diffusività UDS [kg/(m*K)]	battery_e_cond::msmdbatt
Conduttività elettrica, $\sigma$ [siemens/m] [19]	$1 \times 10^7$

La diffusività UDS (User Defined) è stata fornita direttamente dal software Ansys Fluent. Essendo infatti la zona dei terminali passiva, è stato necessario selezionare dapprima “user-defined” dalla lista “UDS Diffusivity”, dopodiché nella casella di dialogo di “User -Defined Functions” si è provveduto a scegliere “battery\_e\_cond::msmdbatt”.

Come detto in precedenza la parte attiva è costituita da materiali diversi ognuno dei quali ha un preciso ruolo all'interno della cella (**Figura 35**). Le proprietà di ogni materiale sono sintetizzate nella **Tabella 7**.



**Figura 35** - Composizione degli strati della parte attiva [19]

**Tabella 7** - Proprietà degli elementi costituenti la parte attiva

Proprietà	Foglio di Al	Catodo	Separatore	Anodo	Foglio di Cu
	Pc	Pe	S	Ne	Nc
Lunghezza $\delta$ , [ $\mu\text{m}$ ] [19]	20	150	12	145	10
Densità, $\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] [19]	2700	1500	1200	2500	8960
Calore specifico, $c_p$ [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ] [19]	900	700	700	700	385
Conduttività termica, $K$ [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ] [19]	238	5	1	5	398
Conduttività elettrica, $\sigma$ [siemens/m] [19]	$3.83 \times 10^7$	13.9	/	100	$6.33 \times 10^7$

Data la presenza di questi diversi materiali, ognuno aventi diverse proprietà, è stato necessario calcolare dei valori medi per la parte attiva.

Per il calcolo della densità  $\rho$  e del calore specifico  $c_p$  si è utilizzata la seguente equazione:

$$x_{eff} = \frac{0.5x_c^p \delta_c^p + x_e^p \delta_e^p + x_s \delta_s + x_e^n \delta_e^n + 0.5x_c^n \delta_c^n}{\delta_{tot}} \quad (27)$$

Dove:

- $x_{eff}$  è il valore effettivo della proprietà (come ad esempio la densità);
- I pedici  $c, e, s$  si riferiscono rispettivamente al collettore di corrente, all'elettrodo e al separatore;
- Gli apici  $p$  e  $n$  si riferiscono all'estremo positivo e negativo;
- $\delta_{tot}$  è la lunghezza totale ricavata come somma delle lunghezze dei diversi elementi.

Per il calcolo della conduttività elettrica  $\sigma$  invece è stata utilizzata l'equazione (28) e l'equazione (29), dove la prima equazione descrive la conduttività elettrica nell'elettrodo positivo, mentre la seconda fornisce la conduttività elettrica per l'elettrodo negativo.

$$\sigma_p = \frac{0.5\sigma_c^p \delta_c^p + \sigma_e^p \delta_e^p}{\delta_{tot}} \quad (28)$$

$$\sigma_n = \frac{0.5\sigma_c^n \delta_c^n + \sigma_e^n \delta_e^n}{\delta_{tot}} \quad (29)$$

I valori effettivi delle proprietà elettriche e termiche utilizzate per la parte attiva sono sintetizzati nella **Tabella 8**.



**Tabella 8** - Valori effettivi delle proprietà della parte attiva

Proprietà	Parte attiva
Lunghezza $\delta$ , [ $\mu\text{m}$ ] [19]	322
Densità, $\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] [19]	2092
Calore specifico, $c_p$ [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ] [19]	678 [31]
Conduttività termica, $K$ [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ] [19]	18.2
Conduttività elettrica, $\sigma_p$ [siemens/m] [19]	$1.19 \times 10^6$
Conduttività elettrica, $\sigma_n$ [siemens/m] [19]	$9.83 \times 10^5$

### 3.2.2. Materiale per gli elementi non in tensione

Gli elementi non in tensione della cella sono il case esterno, lo strato d'aria frapposto lateralmente tra la parte attiva e il case e i due separatori che hanno il compito di separare case e parte attiva superiormente e inferiormente.

Le proprietà dell'aria e dei separatori utilizzate durante le simulazioni sono riassunte rispettivamente nella **Tabella 9** e **Tabella 10**. Per i due separatori cartacei si è scelto di utilizzare due fogli di carta le cui proprietà sono state ipotizzate uguali a quelle dell'abete Douglas (varietà di abete diffusa sulla fascia costiera del Nord America) in quanto le proprietà questo materiale sono state approfonditamente studiate [32].

**Tabella 9** – Proprietà dell'aria

Proprietà	Aria
Densità, $\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1.225
Calore specifico, $c_p$ [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]	1006.43
Conduttività termica, $K$ [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]	0.0242
Viscosità [ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ]	$1.7894 \times 10^{-5}$

Diffusività UDS [kg/(m*K)]	/
Conduttività elettrica, $\sigma$ [siemens/m] [19]	$1 \times 10^6$

**Tabella 10** - Proprietà del separatore cartaceo

Proprietà	Legno (Abete Douglas)
Densità, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	700
Calore specifico, $c_p$ [J/(kg*K)]	2310
Conduttività termica, $K$ [W/(m*K)]	0.173
Diffusività UDS [kg/(m*K)]	/
Conduttività elettrica, $\sigma$ [siemens/m] [19]	$1 \times 10^6$

Per il case esterno si è optato per l'utilizzo di un foglio di alluminio dallo spessore di 1 mm. Le sue proprietà sono riassunte nella **Tabella 11**.

**Tabella 11** – Proprietà del case esterno

Proprietà	Al (Alluminio)
Densità, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2770
Calore specifico, $c_p$ [J/(kg*K)]	381
Conduttività termica, $K$ [W/(m*K)]	387.6
Conduttività elettrica, $\sigma$ [siemens/m] [19]	$1 \times 10^7$

### 3.3. Condizioni al contorno

Fase successiva dell'analisi CFD è l'impostazione di condizioni di contorno termiche per le pareti della cella e per le superfici dei terminali. Si è, quindi, proceduto a selezionare la superficie esterna del case indicata dalla named-selection "wall-case\_zone". All'interno della zone name "wall-case\_zone" si è selezionato il tab *Thermal* e si è impostato come condizione al contorno la convezione naturale (**Figura 36**). I parametri necessari per la convezione naturale sono il coefficiente di scambio termico convettivo,  $h$  ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ), e la temperatura dell'aria esterna,  $T$  (K).

Per quanto riguarda il primo parametro, essendo in presenza di aria questo può assumere valori compresi tra 5 e 25  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  [33]. Si è perciò provveduto ad una fase di prova "trial and error" (aumentando il valore di  $h$  con salti di 5  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ) confrontando le temperature del case esterno con quelle ottenute sperimentalmente in modo da ottenere il valore di  $h$  tale per cui si avesse la migliore corrispondenza dei risultati numerici con quelli sperimentali. Si è così ottenuto un valore per il coefficiente di scambio termico convettivo pari a 20  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ .

Il secondo parametro (la temperatura dell'aria esterna) è stata invece impostata inizialmente pari a valore di default di 300 K.

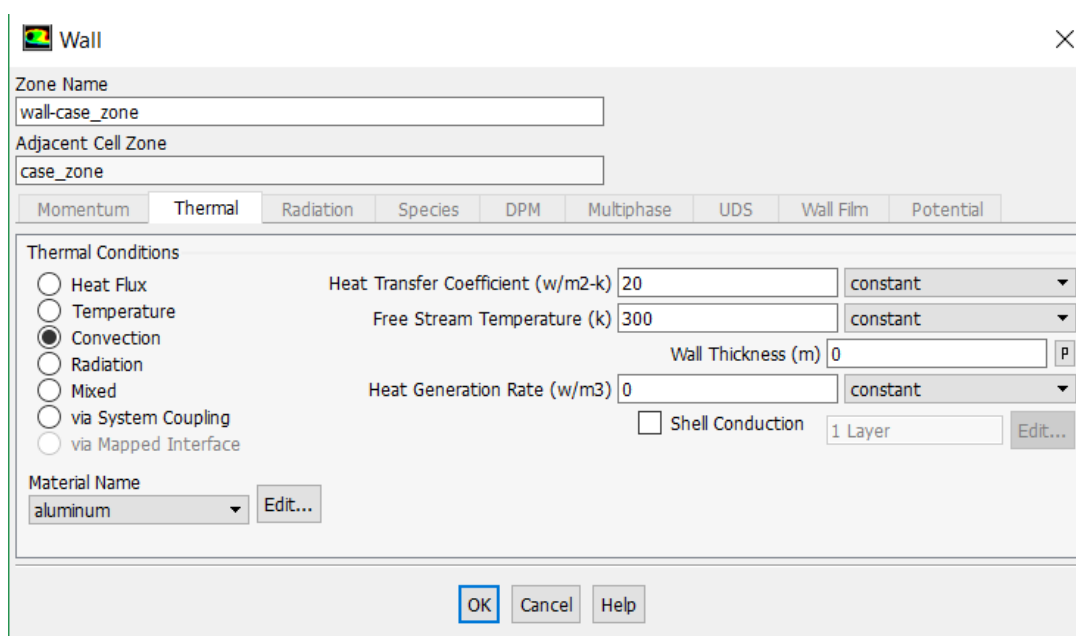


Figura 36 - Condizioni al contorno termiche di "wall-case\_zone"

Oltre alle pareti esterne del case anche le superfici dei terminali sono lambite dall'aria, si è quindi impostato la convezione naturale anche su queste superfici mantenendo gli stessi parametri utilizzati per "wall-case\_zone".

### ***3.4. Risultati simulazione e primo confronto con valori sperimentali***

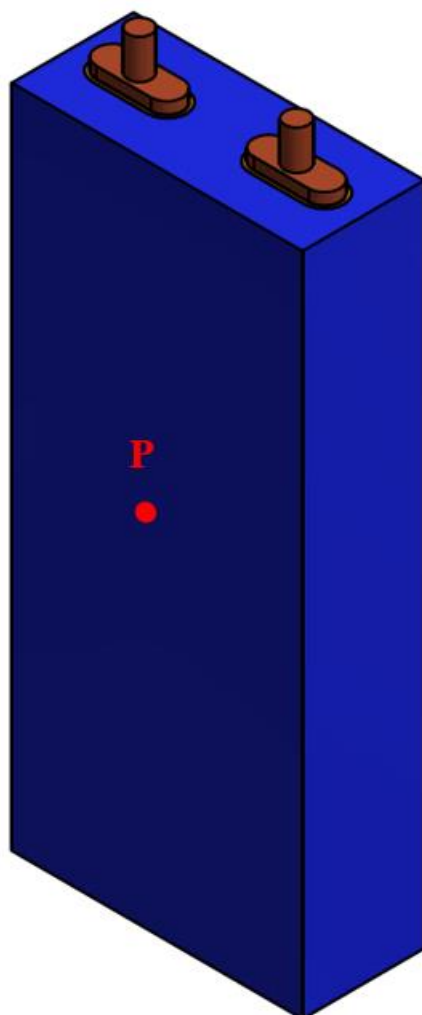
In questa sezione è descritta la fase conclusiva dell'analisi CFD attraverso la quale è stato possibile ottenere come risultato un profilo di temperatura al variare del tempo con diverse correnti di scarica. È stata poi effettuata una prima validazione del modello effettuando un confronto tra valori ottenuti sperimentalmente e valori numerici.

#### ***3.4.1. Risultati analisi CFD***

Una volta definite le condizioni al contorno si sono scelte delle condizioni di inizializzazione. In particolare, si è posta la pressione esterna pari a quella atmosferica (101325 Pa) e la temperatura dell'ambiente pari a 300 K (circa 27 °C).

Successivamente si è scelto di misurare la temperatura in un punto privilegiato in modo da poter effettuare successivamente un confronto con i risultati sperimentali. Si è così scelto un punto sulla superficie esterna del case della cella (punto P in **Figura 37** - Posizione termoresistenza **Figura 37**) in modo da simulare il rilevamento da parte di una termoresistenza come avvenuto sperimentalmente in laboratorio.

Per poter simulare una scarica completa, avendo impostato in precedenza nel tab *Model Option* una corrente di scarica pari a 1C (corrente tale per cui si ha che la cella risulta completamente scarica dopo un'ora) si è deciso di simulare la scarica con un *Time step* pari a 30 secondi e un numero totale di *Time steps* pari a 120 in modo da ottenere una prova di 3600 secondi ovvero un'ora.



**Figura 37** - Posizione termoresistenza

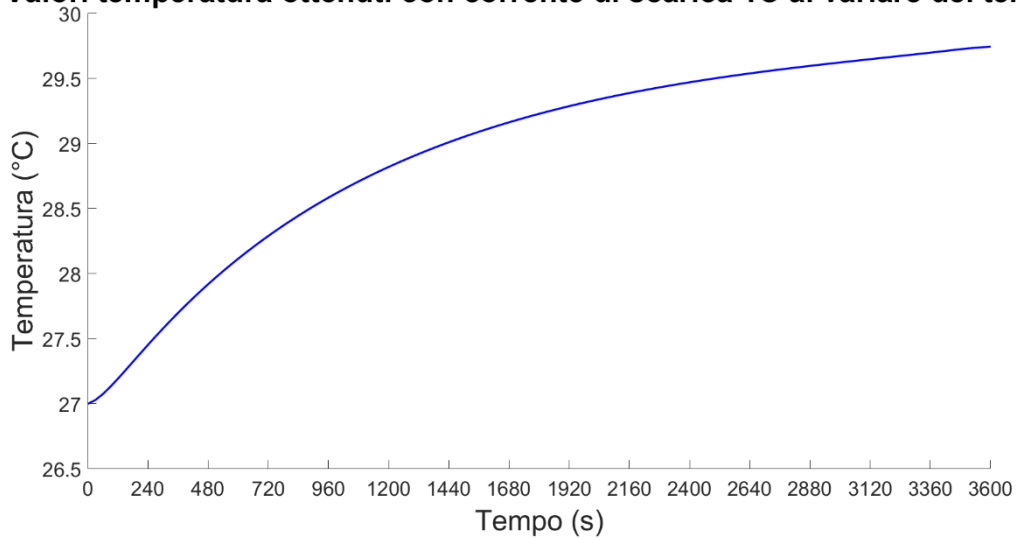
Per poter ricostruire la storia temporale della temperatura misurata nel punto si è deciso di memorizzare, per ogni *time step*, un file nel quale è presente un'indicazione della posizione spaziale del punto e la temperatura. Di seguito è possibile osservare una tabella (**Tabella 12**) che replica il file ottenuto al centoventesimo *time step*.

**Tabella 12** - Output analisi CFD per il punto P

Numero nodo	Coordinata x (m)	Coordinata y (m)	Coordinata z (m)	Temperatura (K)
1	0	$-4.2 \cdot 10^{-3}$	$1.55 \cdot 10^{-2}$	302.74

Unendo i file così ottenuti tramite l'utilizzo di Matlab si è così ottenuto il grafico di **Figura 38**.

**Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 1C al variare del tempo**



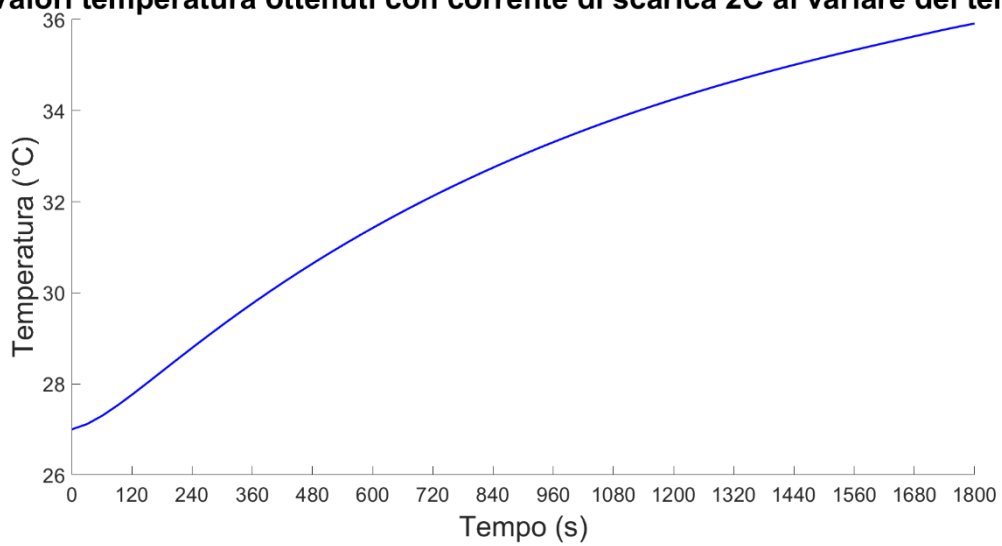
**Figura 38** - Profilo temperatura con corrente di scarica 1C

Si è poi ripetuta la simulazione cambiando la corrente di scarica e tempo di simulazione. I parametri impostati sono sintetizzati nella ottenendo la **Tabella 13**, rispettivamente, la **Figura 39**, **Figura 40** e **Figura 41**.

**Tabella 13** - Parametri simulazioni successive

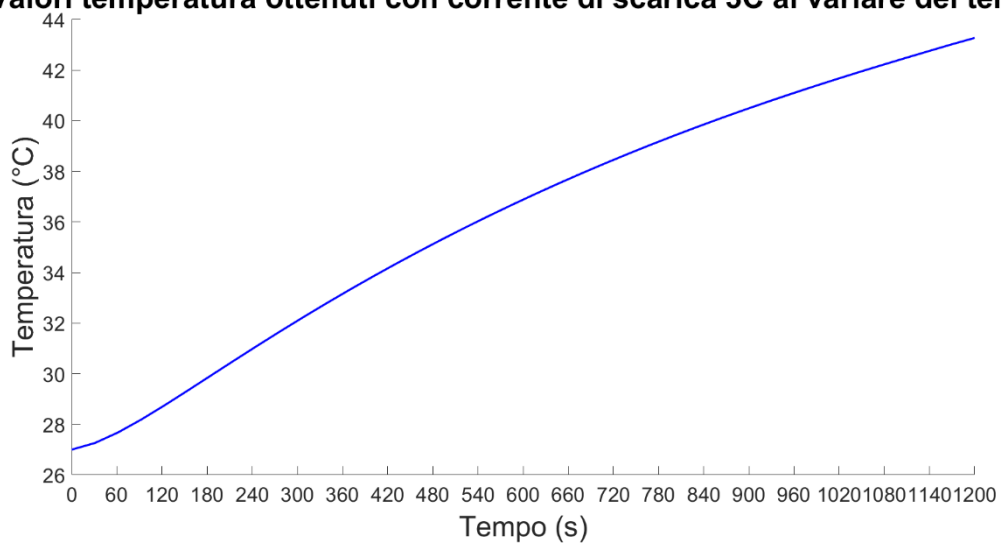
Corrente di scarica	Lunghezza time step (s)	Numero di time steps	Tempo totale simulato (s)
2C	30	60	1800
3C	30	40	1200
0.5C	30	240	7200

**Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 2C al variare del tempo**



**Figura 39** - Profilo temperatura con corrente di scarica 2C

**Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 3C al variare del tempo**



**Figura 40** - Profilo temperatura con corrente di scarica 3C

### Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 0.5C al variare del tempo

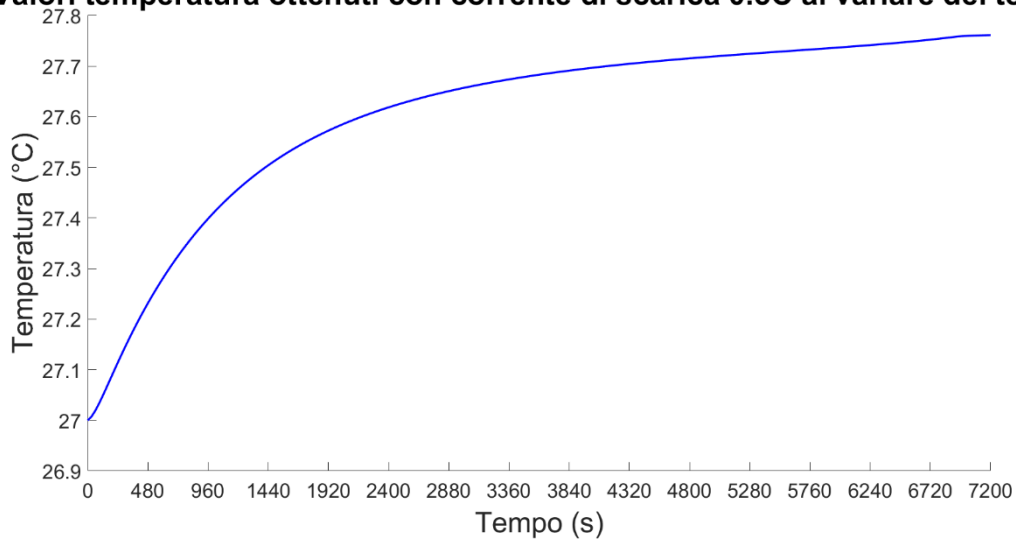


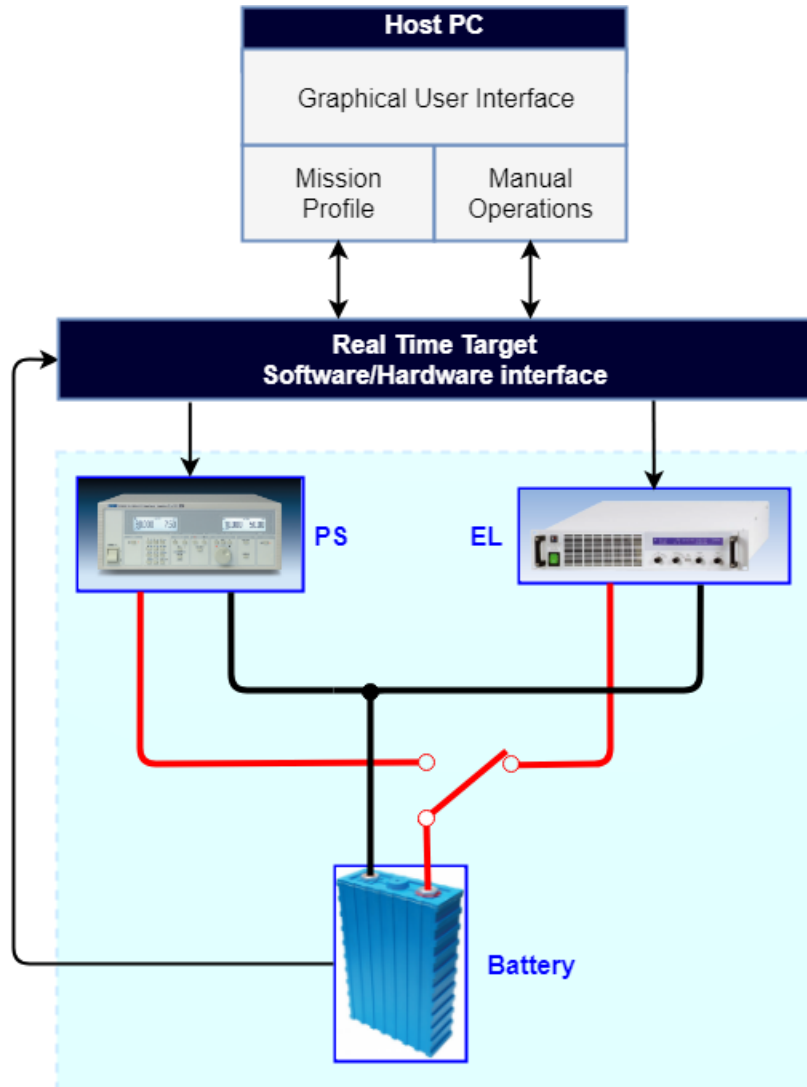
Figura 41 - Profilo temperatura con corrente di scarica 0.5C

### 3.4.2. Validazione preliminare dei risultati

Con l'obiettivo di effettuare una prima fase di validazione dei risultati si sono eseguiti dei test simulativi in laboratorio.

La strumentazione utilizzata è schematizzata in **Figura 42** - Strumentazione per test sperimentali. Il sistema è composto da due unità di potenza: l'unità EL per applicare un certo carico alla cella durante la scarica e quella PS che ha la funzione di caricare la batteria dopo il test. Il primo strumento (unità EA-EL 9080-400 di Elektro-Automatik) ha il compito di imprimere alla cella un carico elettrico di tipo CC (corrente costante): si effettua cioè una scarica a corrente costante, mentre la tensione varia durante il test. Il secondo invece ha la funzione di power supply (QPX-600DP di Aim TTi) caricando la cella mantenendo la tensione costante (CV): si fa sì che la tensione ai terminali sia sempre uguale ad un valore determinato precedentemente. L'utilizzo di uno strumento piuttosto che l'altro avviene attraverso l'utilizzo di un modulo di input/output (NI PXIe 6363) comandato da un'interfaccia di controllo software/hardware sviluppata in NI LabVIEW. Il tutto è poi accessibile all'utente attraverso un'interfaccia grafica mediante l'utilizzo di un personal computer. Durante il test la temperatura della cella è stata misurata da una termoresistenza e acquisita da un modulo NI PXIe 8840 [34].





**Figura 42** - Strumentazione per test sperimentali [34]

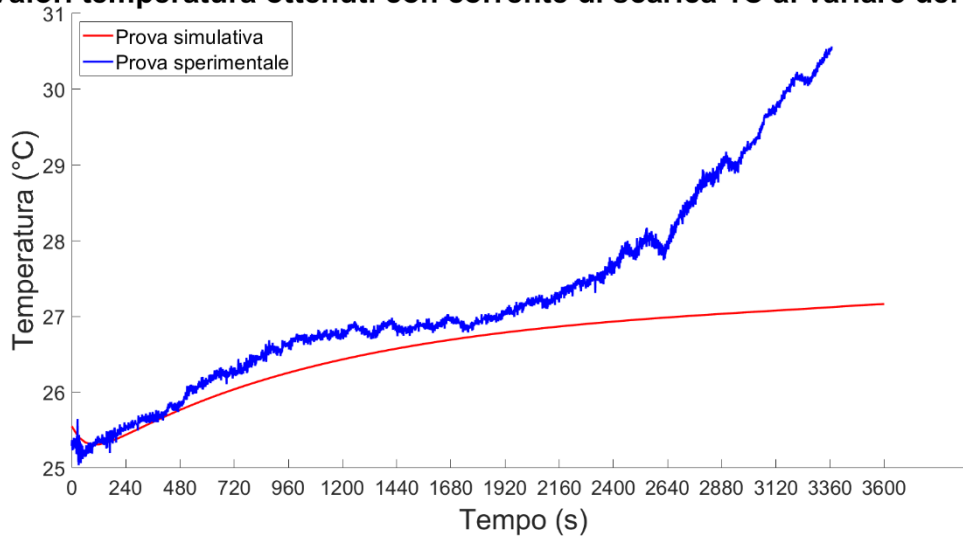
Un primo confronto tra la storia temporale della temperatura ottenuta attraverso le prove simulative e quelle sperimentali è visibile nella **Figura 43**, **Figura 44** e **Figura 45**. Poiché le condizioni di test della prova sperimentale erano non controllate (la temperatura dell'ambiente esterno non è costante durante tutta la prova) si è optato per l'utilizzo di un valore medio per la temperatura dell'aria da impostare sia nelle condizioni al contorno (convezione naturale) sia nelle condizioni di inizializzazione del problema.

Si sono così ottenuti i valori riassunti nella **Tabella 14**.

**Tabella 14** - Temperatura media aria esterna durante le prove

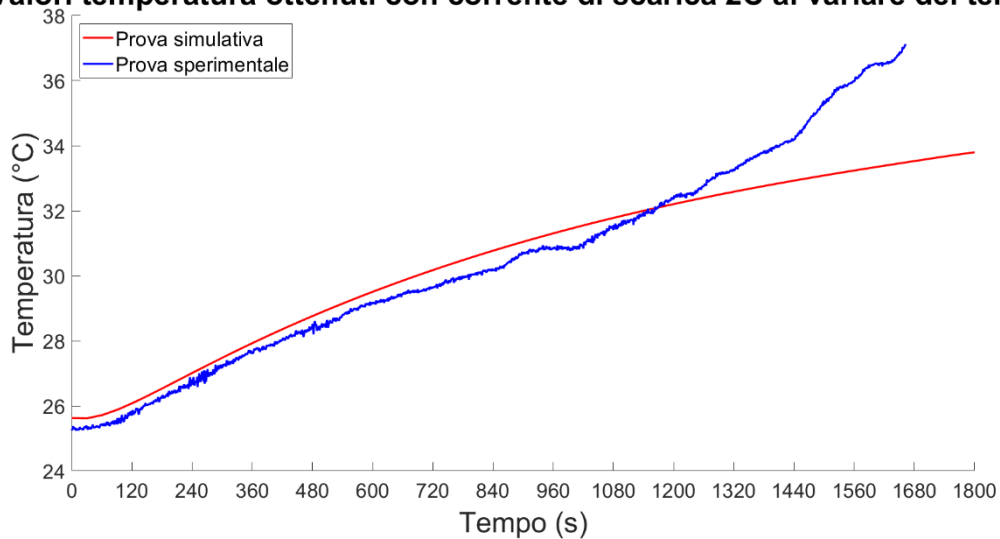
Corrente di scarica	Temperatura media aria nei test sperimentali (°C)	Temperatura utilizzata nella simulazione (K)
1C	24.4	297.4
2C	24.8	297.8
3C	23.6	296.6

**Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 1C al variare del tempo**



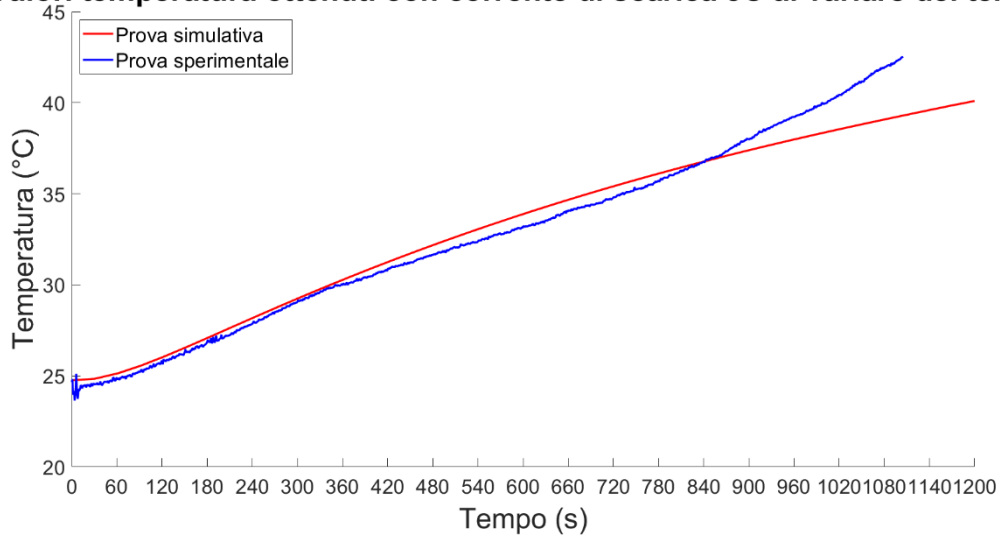
**Figura 43** - Confronto profilo temperatura con corrente di scarica 1C

**Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 2C al variare del tempo**



**Figura 44** - Confronto profilo temperatura con corrente di scarica 2C

### Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 3C al variare del tempo



**Figura 45** - Confronto profilo temperatura con corrente di scarica 3C

Confrontando le due curve si osserva che in tutte e tre le prove la curva rossa, ottenuta attraverso la simulazione con ANSYS Fluent, approssima la curva ottenuta con le prove sperimentali per i primi due terzi della prova. Nella fase finale di simulazione si assiste invece ad un comportamento fortemente differente. Si ha, infatti, che mentre la curva simulativa durante tutta la prova manifesta un andamento monotono crescente evidenziando, in particolare, un comportamento asintotico verso l'orizzontale. Il risultato sperimentale, invece, evidenzia un cambiamento di monotonia a circa due terzi della prova con un sostanziale aumento della temperatura.

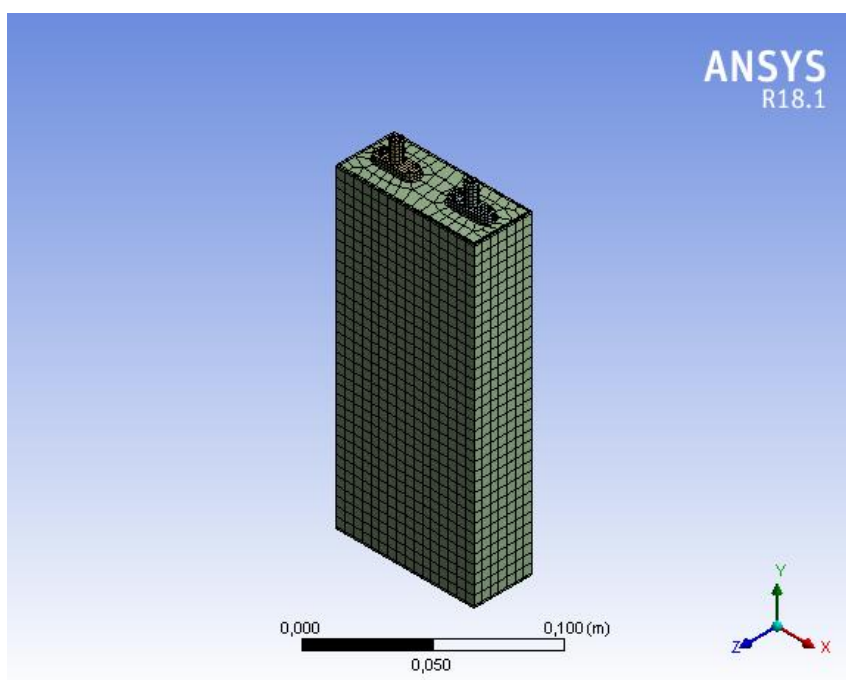
La differenza di comportamento è da ricercarsi nell'uso nel modello circuitale equivalente di una resistenza costante al variare dello stato di carica (SOC) come è possibile osservare nella **Tabella 4**.

## Capitolo 4 – Analisi numerica strutturale

In questo capitolo viene presentata l'analisi strutturale transitoria effettuata sul modello numerico utilizzando il software ANSYS Mechanical APDL con lo scopo di calcolare lo sforzo e le deformazioni dovute ai carichi termici agenti sulla batteria durante la scarica. Durante l'indagine strutturale si è dapprima provveduto a definire i carichi termici e i vincoli da imporre al modello. Dopodiché è stata svolta una ricerca sulle proprietà meccaniche degli elementi costituenti la cella. In ultimo si sono calcolati i valori di deformazione lungo le tre direzioni principali, lo strain e lo stress equivalente che agisce sulla cella.

### 4.1. Setup analisi strutturale

Il primo passo compiuto per l'analisi numerica è stato quello di creare una nuova mesh per il modello geometrico del capitolo 2.1. Poiché infatti, l'analisi meccanica è effettuata utilizzando un'analisi di tipo FEM si è reso necessario diminuire il numero totale di elementi della mesh in quanto una mesh troppo fitta avrebbe richiesto un eccessivo sforzo computazionale in termini di risorse e di tempo. Si è quindi optato per un Sizing medio come mostrato in **Figura 46** - Mesh per analisi strutturale, mantenendo però invariato il tipo di elemento utilizzato definito sempre attraverso il metodo *Multizone*.



**Figura 46** - Mesh per analisi strutturale

Si è così ricavato un modello geometrico composto da 7 corpi distinti (due terminali, una parte attiva, due separatori cartacei, un gap d'aria e un case) per un totale di 65019 nodi e 11091 elementi.

Dopo aver definito la nuova mesh si è effettuata una simulazione CFD come nel **Capitolo 3 – Analisi CFD** impostando un *time step* di 30 secondi, un numero di *steps* pari a 40 e una corrente di scarica pari a 3C in modo da simulare il caso termicamente più gravoso. Durante la simulazione si è salvato per ogni *time step* un file che memorizzasse per ogni nodo la posizione spaziale e la temperatura. Di seguito è possibile osservare una tabella (**Tabella 15**) che replica il file ottenuto al quarantesimo *time step*.

**Tabella 15** - Output analisi CFD con corrente di scarica 3C

ID nodo	Coordinata x (m)	Coordinata y (m)	Coordinata z (m)	Temperatura (°C)
1	-0.064	-0.092	-0.015	44.870
2	-0.059	0.092	-0.015	49.460
...	...	...	...	...

Dopo la simulazione CFD si è impostata un'analisi strutturale transitoria utilizzando il software ANSYS Mechanical APDL. Il primo passo è stato la definizione delle *Analysis Settings* dove si è deciso il numero di *time steps* da utilizzare per la simulazione. Nel nostro caso, per limitare lo sforzo computazionale, si è optato per 8 *time steps* da 150 secondi l'uno e aventi un tempo minimo per effettuare il calcolo successivo pari a 30 secondi (**Tabella 16**).

**Tabella 16** - Analysis Settings

Step	Tempo finale dello step (s)	Tempo minimo dello step (s)
1	150	30
2	300	30
3	450	30
4	600	30
5	750	30
6	900	30
7	1050	30
8	1200	30

Successivamente per simulare la cella appoggiata su di un piano si è imposto il vincolo *fixed support* per la superficie alla base della cella. Infine, si è definito il carico gravitazionale lungo l'asse -y pari a  $-9.8066 \text{ m/s}^2$ .

Per i carichi termici si sono utilizzati 8 file .txt, avente struttura come **Tabella 15**, aventi il compito di indicare quale temperatura è stata raggiunta da tutti i nodi alla fine di ogni *time step* dell'analisi.

## 4.2. Proprietà meccaniche materiali

Prima di poter procedere con l'analisi strutturale è stato necessario investigare sulle proprietà meccaniche di ogni materiale utilizzato per la cella. In particolare, si è deciso di indagare sul coefficiente di espansione termica misurato in  $[1/^\circ\text{C}]$ , sul modulo elastico E (Modulo di Young [Pa]) e sul coefficiente di Poisson  $\nu$ . Per i materiali isotropi, noti E e  $\nu$ , si sono poi definiti il modulo di compressibilità K e di taglio G attraverso un calcolo effettuato automaticamente da ANSYS.

Le proprietà dei due terminali in rame sono visibili in **Tabella 17**. Queste sono state ricavate attingendo direttamente al database interno ad ANSYS.

**Tabella 17** - Proprietà meccaniche dei terminali

Proprietà	Cu (Rame)
Coefficiente di espansione termica isotropo $[1/^\circ\text{C}]$	$1.8 \times 10^{-5}$
Modulo di Young, E [Pa]	$1.1 \times 10^{11}$
Coefficiente di Poisson, $\nu$	0.34
Modulo di compressibilità, K [Pa]	$1.1458 \times 10^{11}$
Modulo di taglio, G [Pa]	$4.1045 \times 10^{10}$

Come già detto nel capitolo **3.2.1** la parte attiva è composta da più strati di materiale diverso. Le proprietà meccaniche di questi strati sono riassunte nella **Tabella 18**.

**Tabella 18** - Proprietà meccaniche dei componenti della parte attiva

Proprietà	Foglio di Al	Catodo	Separatore	Anodo	Foglio di Cu
	Pc	Pe	S	Ne	Nc
Coefficiente di espansione termica isotropo [1/°C] [31]	$23.6 \times 10^{-6}$	$8.62 \times 10^{-6}$	$13.32 \times 10^{-5}$	$4.06 \times 10^{-6}$	$17 \times 10^{-6}$
Modulo di Young, E [Pa] [31]	$70 \times 10^9$	$10 \times 10^9$	$0.5 \times 10^9$	$12 \times 10^9$	$117 \times 10^9$
Coefficiente di Poisson, $\nu$ [31]	0.34	0.3	0.35	0.3	0.35

Le proprietà medie sono state ricavate utilizzando l'equazione (27) e sono visibili in **Tabella 19**.

**Tabella 19** - Proprietà meccaniche effettive della parte attiva

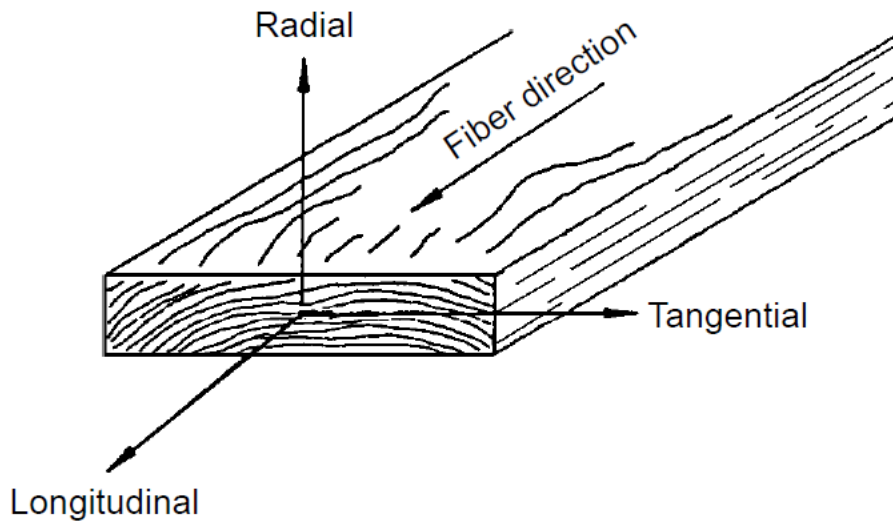
Proprietà	Parte attiva
Coefficiente di espansione termica isotropo [1/°C]	$6.89 \times 10^{-6}$
Modulo di Young, E [Pa]	$14.07 \times 10^9$
Coefficiente di Poisson, $\nu$	0.304
Modulo di compressibilità, K [Pa]	$1.196 \times 10^{10}$
Modulo di taglio, G [Pa]	$5.395 \times 10^9$

Per lo strato d'aria si sono invece utilizzati solo il coefficiente di espansione termica e il modulo di compressibilità essendo questo materiale un gas e quindi non resistente a forze di trazione (**Tabella 20**).

**Tabella 20** - Proprietà meccaniche dell'aria

Proprietà	Aria
Coefficiente di espansione termica isotropo [1/°C]	0.00369
Modulo di compressibilità, K [Pa]	$1.43 \times 10^5$

I due separatori cartacei sono due fogli di carta le cui proprietà meccaniche sono state ipotizzate uguali a quelle dell'abete Douglas. Come si può osservare dalla **Tabella 21** il legno è un materiale ortotropo. Presenta infatti tre diversi valori di Modulo di Young e tre moduli di taglio, uno per ogni direzione come mostrato in **Figura 47**. È stato perciò necessario utilizzare per i separatori proprietà dipendenti dagli assi nella simulazione strutturale.



**Figura 47** - Direzioni principali di inerzia per legno [32]

**Tabella 21** - Proprietà meccaniche del separatore cartaceo

Proprietà	Legno (Abete Douglas)		
	$E_x$	$E_y$	$E_z$
Modulo di Young, E [Pa] [32]	$1.08 \times 10^{10}$	$5.4 \times 10^7$	$7.34 \times 10^8$
Coefficiente di Poisson, $\nu$ [32]	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_z$
	0.39	0.292	0.449



Modulo di compressibilità, K [Pa]	2.61x 10 <sup>10</sup>		
Modulo di taglio, G [Pa]	G x	G y	G z
	7.56x 10 <sup>7</sup>	6.912x 10 <sup>8</sup>	7.344x 10 <sup>8</sup>

Come fatto per i due terminali anche per il case esterno le proprietà (**Tabella 22**) sono state ricavate consultando il database interno ad ANSYS.

**Tabella 22** - Proprietà meccaniche del case esterno

Proprietà	Al (Alluminio)
Coefficiente di espansione termica isotropo [1/°C]	2.3x 10 <sup>-5</sup>
Modulo di Young, E [Pa]	7.1x 10 <sup>10</sup>
Coefficiente di Poisson, ν	0.33
Modulo di compressibilità, K [Pa]	6.9608x 10 <sup>10</sup>
Modulo di taglio, G [Pa]	2.6692x 10 <sup>10</sup>

### 4.3. Risultati analisi strutturale

La soluzione è stata raggiunta dopo circa 2 ore ed è stata richiesta una memoria RAM pari a 833 MB.

I risultati dell'analisi strutturale sono visibili in **Tabella 23** dove si può osservare come la deformazione maggiore avviene in quasi tutte le direzioni per lo strato d'aria che in quanto gas tende a dilatarsi, mentre la tensione maggiore agisce sul case esterno essendo questo costituito da un foglio di alluminio molto sottile. L'elemento che invece si deforma meno è la parte attiva le cui proprietà non sono reali, ma ottenute facendo una media di quelle degli strati che lo costituiscono. I valori per ogni calcolo sono raccolti in forma tabellare in **Capitolo 7 – Conclusioni**

In questo capitolo sono riassunti i risultati ottenuti in questo lavoro. È stato sviluppato un modello numerico attraverso il software ANSYS Fluent. Il modello permette di ottenere

un'accurata rappresentazione della geometria di una cella al litio di tipo  $\text{LiFePO}_4$ . Il comportamento fluido-elettro-termico è stato studiato utilizzando il modulo Dual-Potential MSMD (Multi-Scale Multi-Dimensional) nel quale, previa la definizione di un modello elettrochimico, è possibile ottenere l'evoluzione temporale della temperatura della cella e delle proprietà elettriche come la tensione o la densità di corrente.

Un modello strutturale è stato inoltre preso in considerazione utilizzando il software ANSYS Mechanical APDL. Dall'analisi risulta che l'elemento più sollecitato risulta essere il case in alluminio avendo una tensione equivalente agente pari a  $9.865 \cdot 10^7$  Pa. Confrontando tale valore con la tensione a snervamento e a rottura di laminati in alluminio di pari spessore utilizzati principalmente nell'industria chimica, alimentare e per conduttori elettrici si osserva come lo stress equivalente agente sulla cella risulta essere minore del valore minimo di tensione a snervamento pari a  $1.2 \cdot 10^8$  Pa.

Un modello CFD è stato utilizzato anche per un modulo costituito da due celle al litio affiancate nel quale invece che una convezione naturale si è utilizzata una forzata. Si è osservato come l'utilizzo di un raffreddamento in parallelo ovvero col getto d'aria proveniente dall'alto della cella garantisca una maggiore uniformità della temperatura lungo tutto il modulo a differenza di quanto accade con un raffreddamento in serie. La ricerca della velocità del getto da utilizzare ha, invece, evidenziato come per velocità superiori ai 10 m/s non si abbiano sostanziali benefici. Risulta, quindi, che l'utilizzo di un gap d'aria così contenuto (2 mm) sia il limite più grande per il raffreddamento delle celle.

In ultimo l'analisi di sensitività ha evidenziato quanto la modifica della forma geometrica e dei materiali della cella influenzino la risposta termica della batteria. L'utilizzo di separatori cartacei ha comportato in ogni prova un miglioramento della conduzione diminuendo di conseguenza la temperatura interna alla cella. L'utilizzo di parametri polinomiali dipendenti dallo stato di carica è stato inoltre preso in considerazione. Benché i risultati evidenzino come siano ancora presenti delle differenze tra i valori numerici e sperimentali, si può osservare come rispetto all'utilizzo di parametri indipendenti dal SoC si abbia una miglior approssimazione dei risultati sperimentali.

Per il modello meccanico per migliorare i risultati è possibile effettuare un'ulteriore investigazione sulla parte attiva essendo questa costituita da più strati di materiali diversi aventi proprietà meccaniche profondamente differenti.

Per il modello CFD un'ulteriore investigazione sulla geometria e sui materiali della cella può essere effettuata per migliorare i risultati. Un andamento più realistico della temperatura e della tensione nella fase finale della scarica può essere invece ottenuto ricercando nuovi parametri polinomiali per la resistenza come mostrato nella parte finale del capitolo 6. Una migliore approssimazione dei risultati può essere ottenuta continuando l'investigazione sui parametri polinomiali utilizzabili per descrivere le resistenze  $R_s$ ,  $R_1$  e  $R_2$  e sulle capacità  $C_1$  e  $C_2$ . Anche la tensione del circuito aperto può essere oggetto di ricerca avendo questa notevole influenza sull'andamento della tensione al variare del tempo.



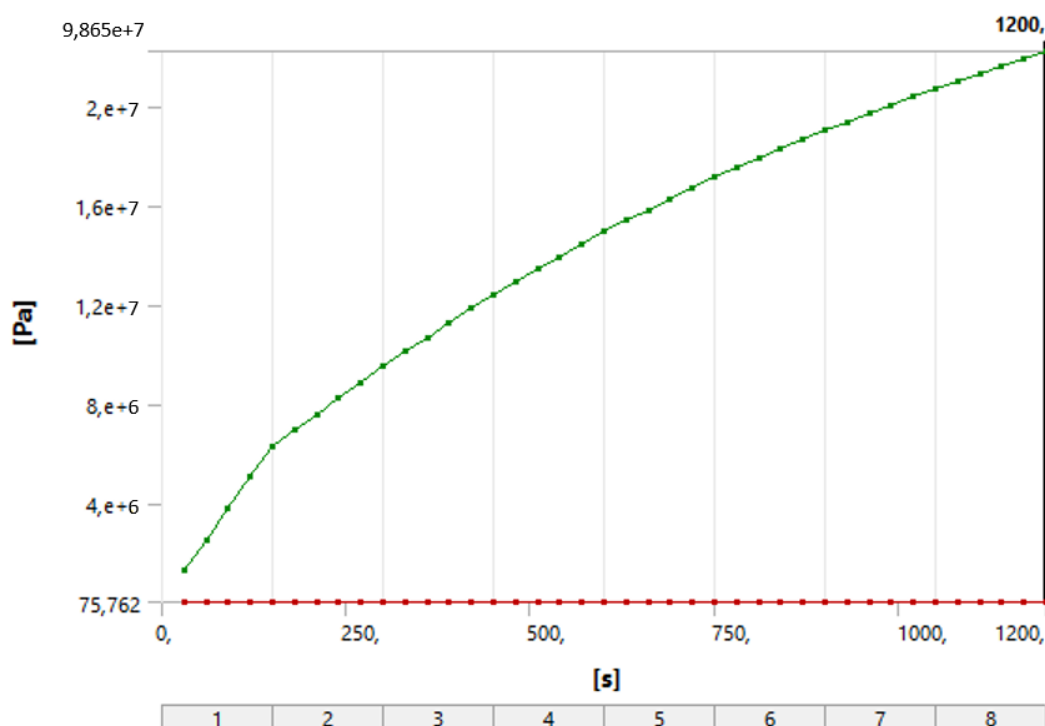


Appendice.

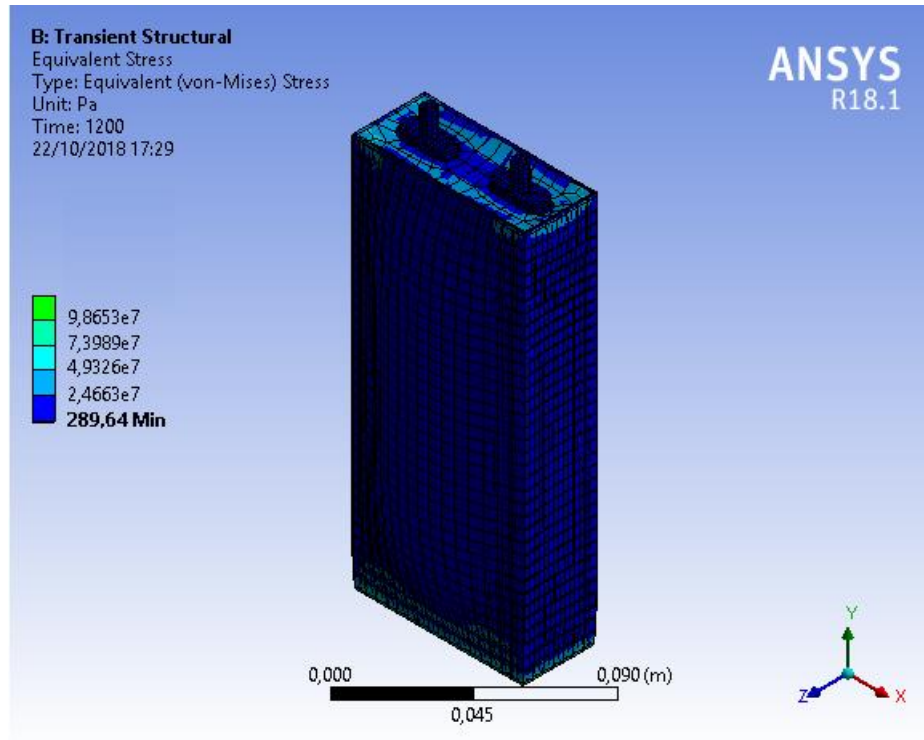
**Tabella 23** - Risultati analisi strutturale

	Stress equivalente (Pa)	Strain equivalente (m/m)	Deformazione lungo x (m)	Deformazione lungo y (m)	Deformazione lungo z (m)
Valore minimo	289.644	$2.9411 \cdot 10^{-9}$	$-5.411 \cdot 10^{-5}$	$-2.206 \cdot 10^{-5}$	$-1.83 \cdot 10^{-4}$
Valore massimo	$9.865 \cdot 10^7$	0.15422	$6.2013 \cdot 10^{-5}$	$1.0915 \cdot 10^{-4}$	$1.857865 \cdot 10^{-6}$
Valore minimo si verifica su	Parte attiva		Aria		
Valore massimo si verifica su	Case esterno	Aria		Separatore superiore	Aria

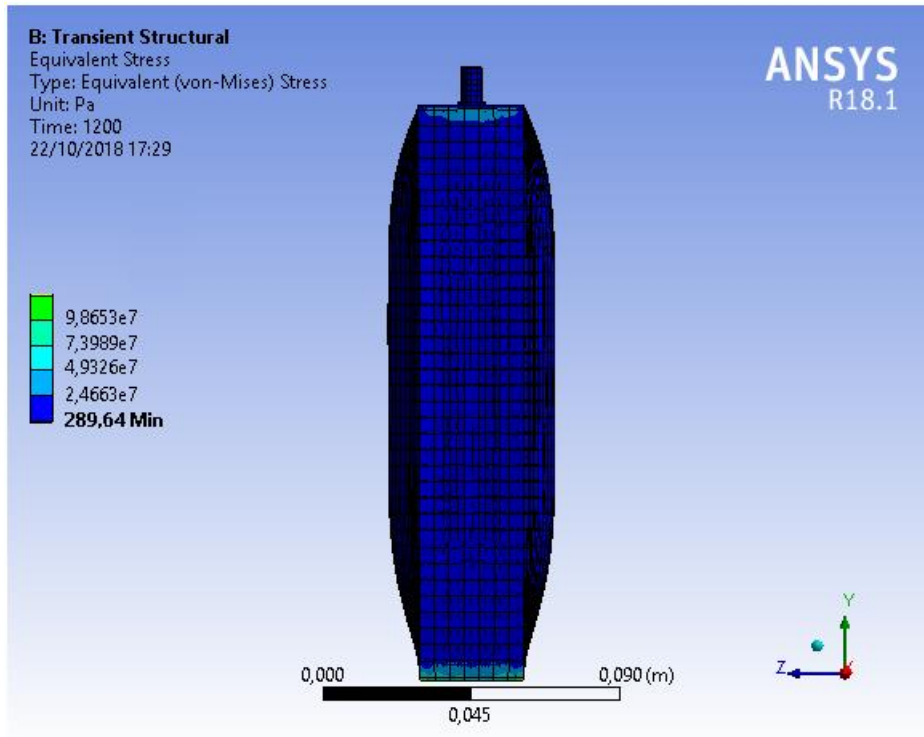
Nella **Figura 48** è raffigurato l'andamento temporale dei valori massimi della tensione equivalente, mentre in **Figura 49** e **Figura 50** in è visibile la tensione equivalente della cella a fine prova (al tempo 1200 secondi).



**Figura 48** - Andamento temporale del valore massimo dello stress equivalente

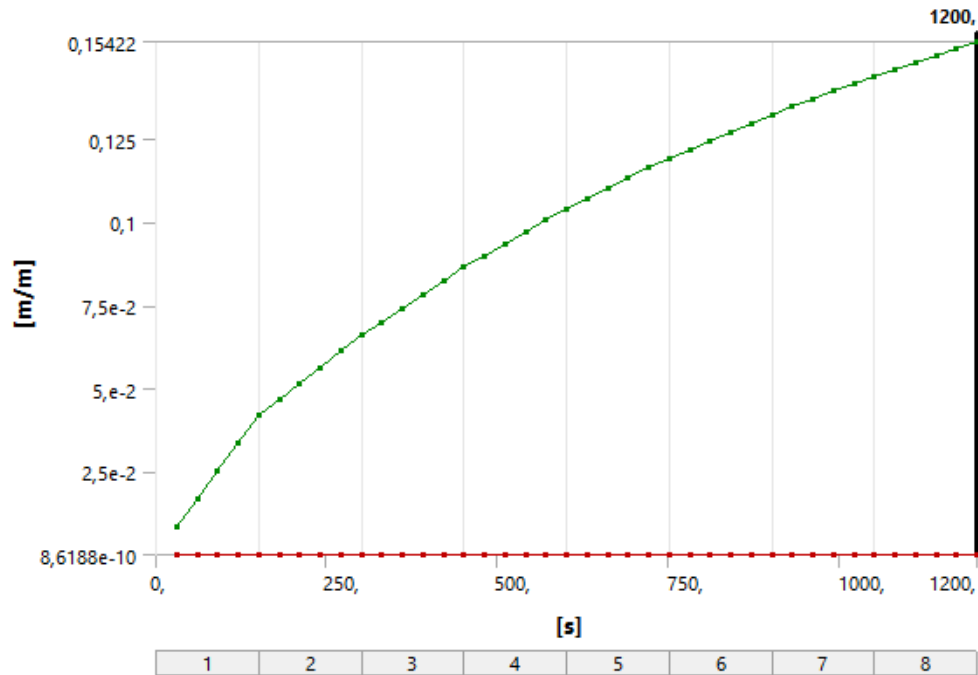


**Figura 49** - Vista assometrica della tensione equivalente della cella

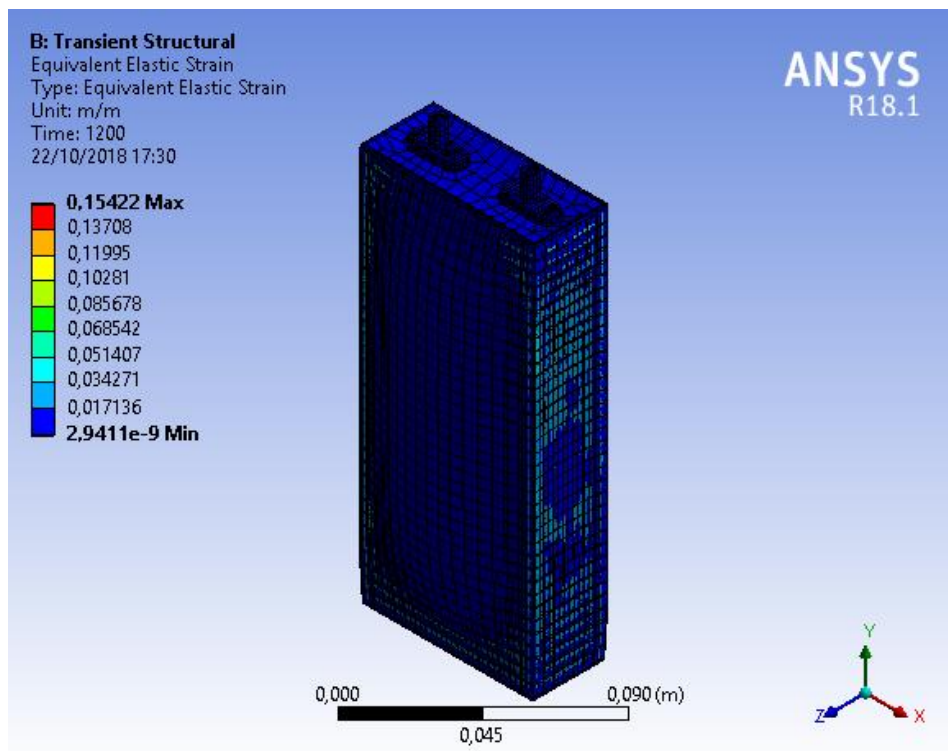


**Figura 50** - Vista nel piano ZY della tensione equivalente della cella

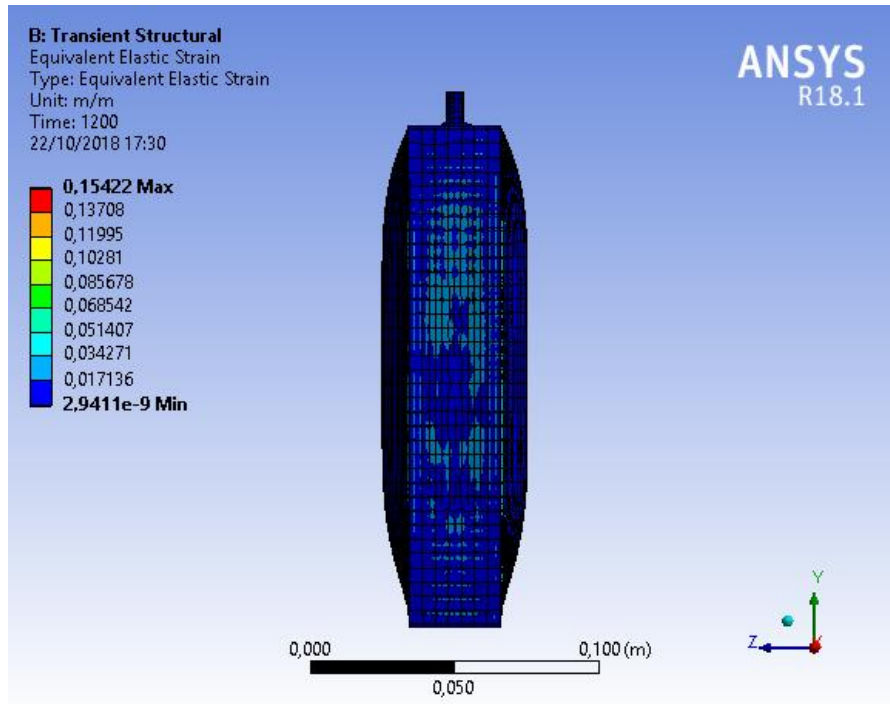
Come già fatto per la tensione, nelle figure di seguito è possibile osservare l'andamento temporale del valore massimo della deformazione equivalente e la cella deformata al tempo 1200 secondi.



**Figura 51** - Andamento temporale del valore massimo dello strain equivalente

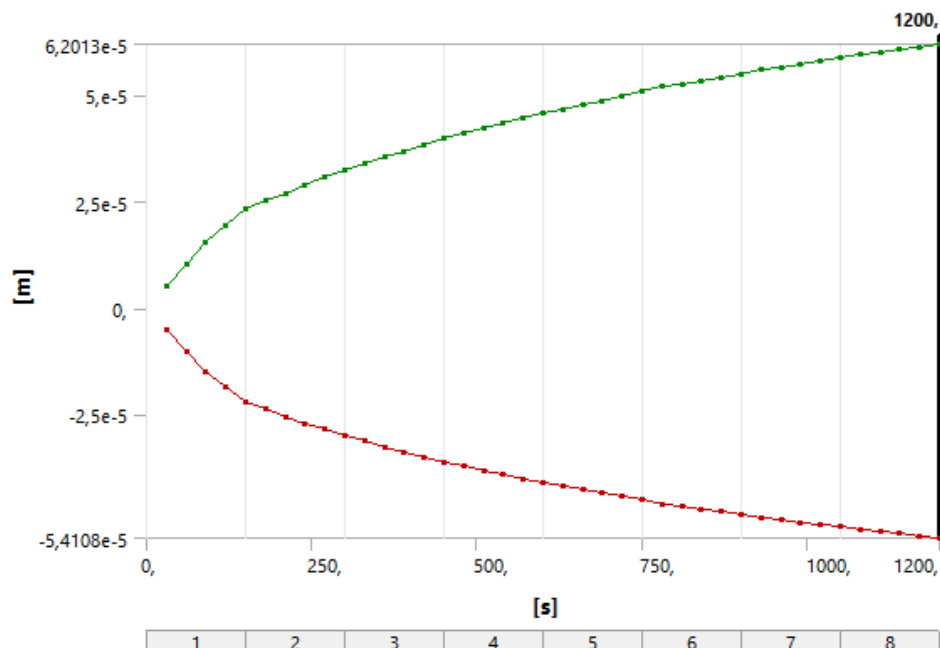


**Figura 52** - Vista assometrica della deformazione equivalente della cella



**Figura 53** - Vista nel piano ZY della deformazione equivalente della cella

Per le deformazioni lungo gli assi principali oltre all'andamento del valore massimo positivo è presente anche quello negativo come è visibile in **Figura 54**, **Figura 56** e **Figura 58**.



**Figura 54** - Andamento temporale del valore massimo positivo e negativo della deformazione lungo X



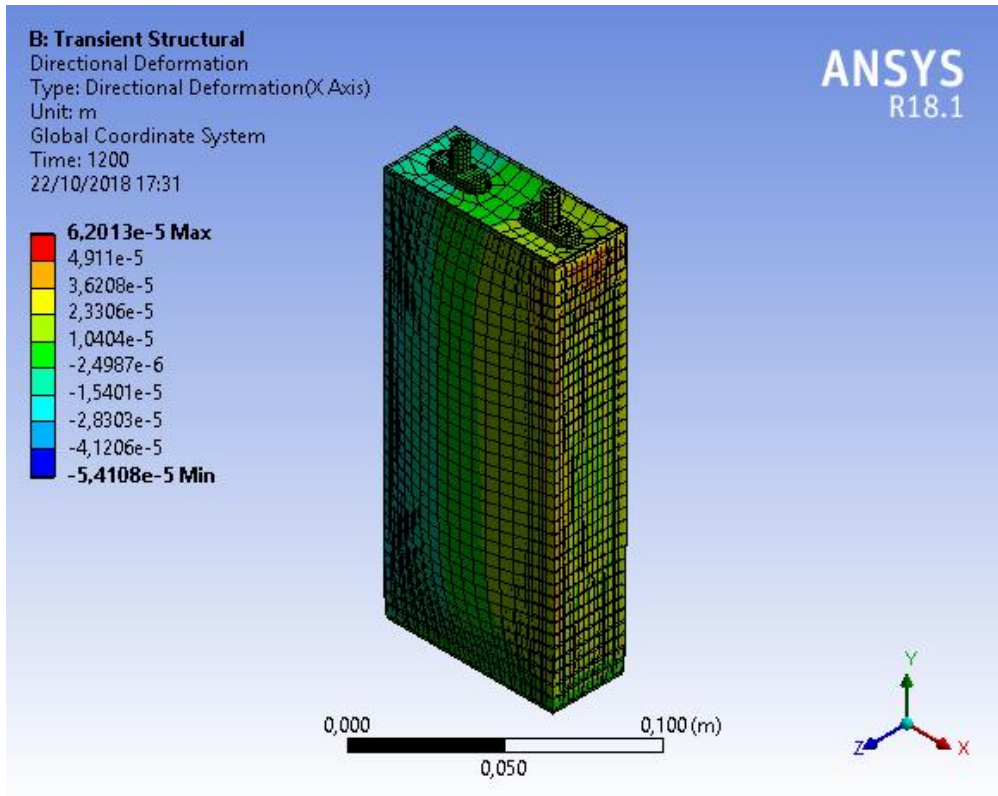


Figura 55 - Vista assonometrica della deformazione lungo X della cella

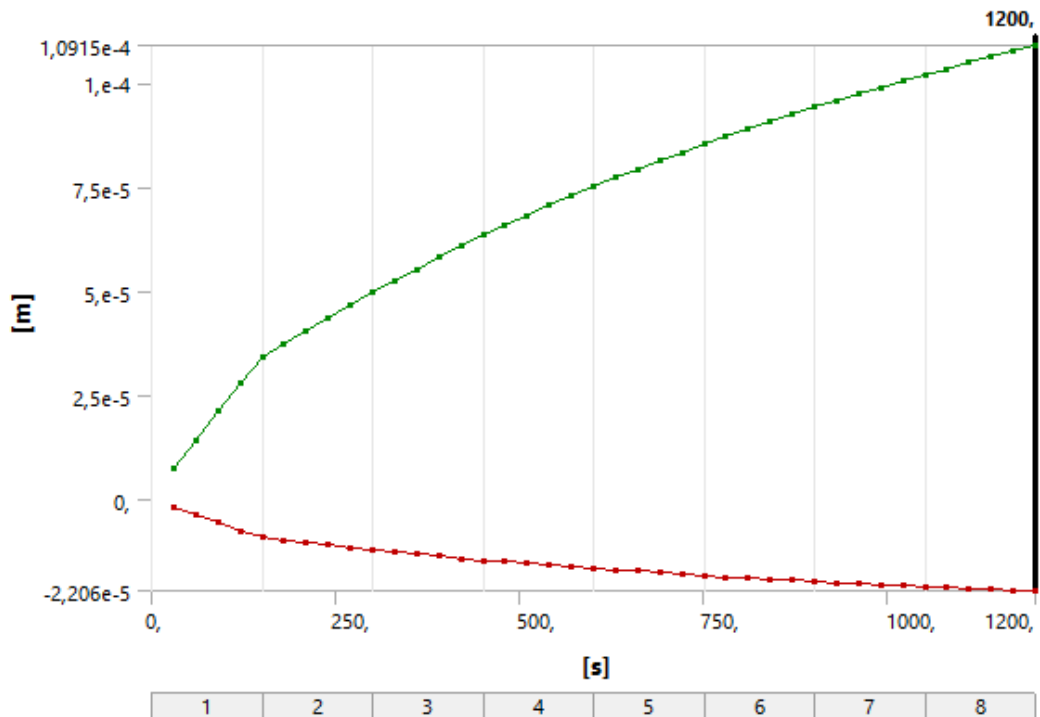
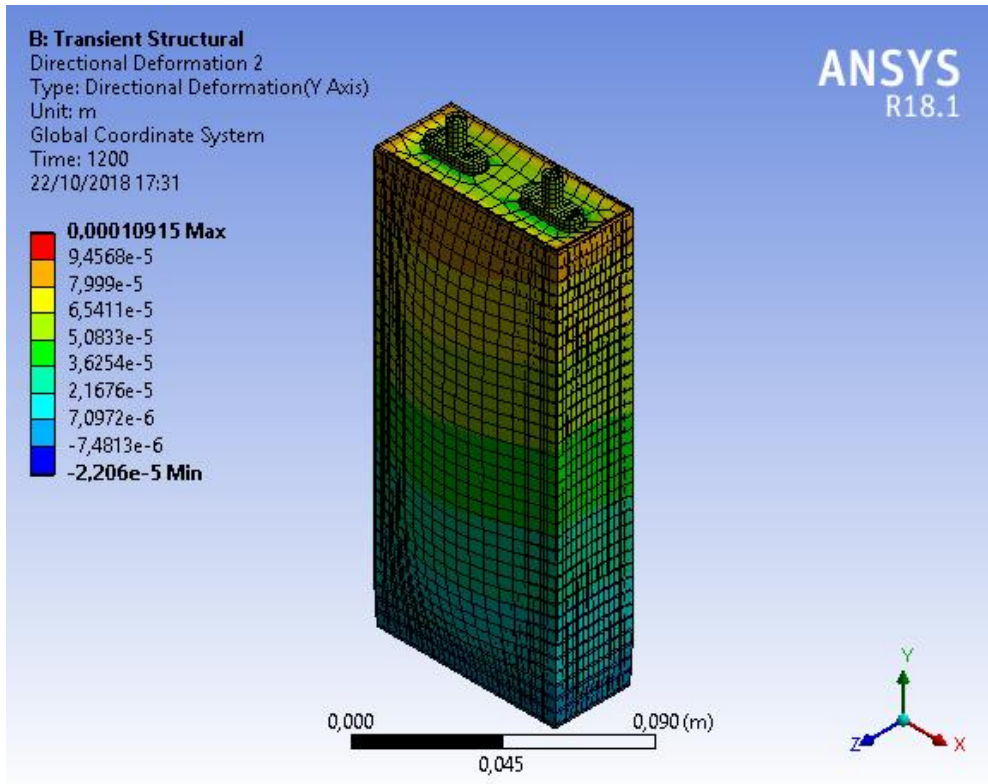
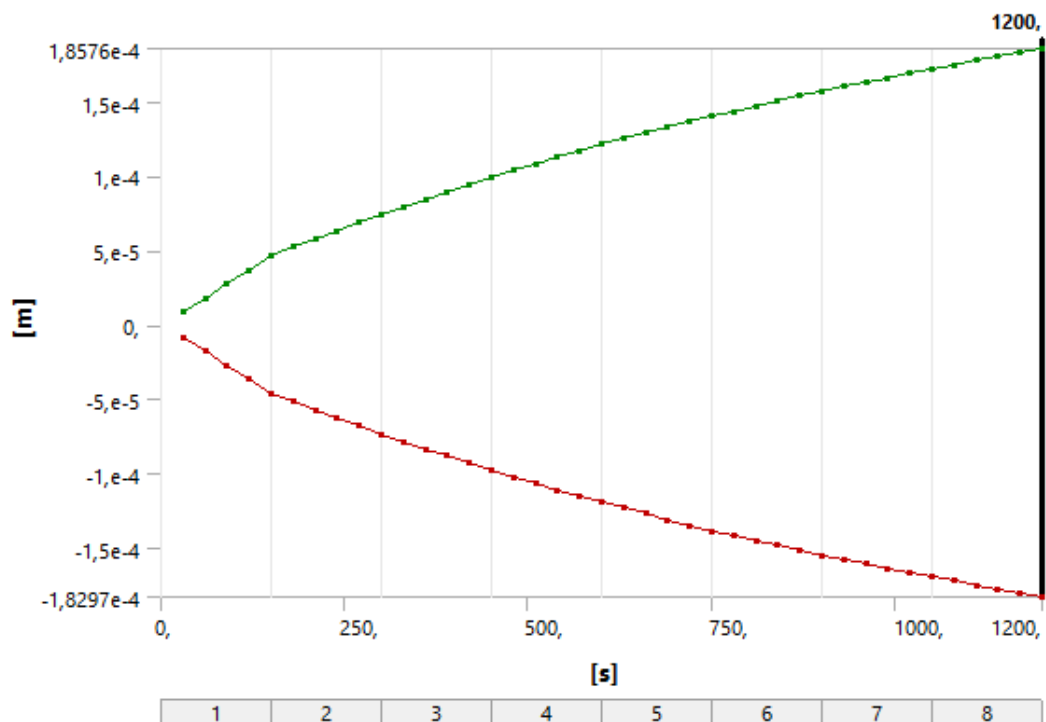


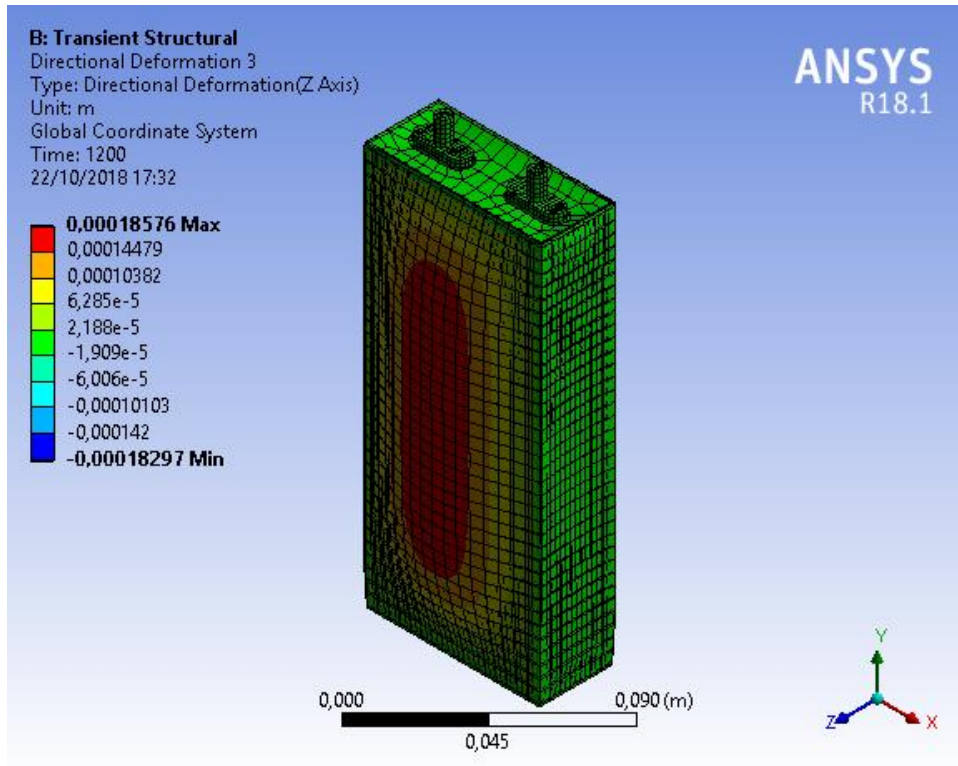
Figura 56 - Andamento temporale del valore massimo e minimo della deformazione lungo Y



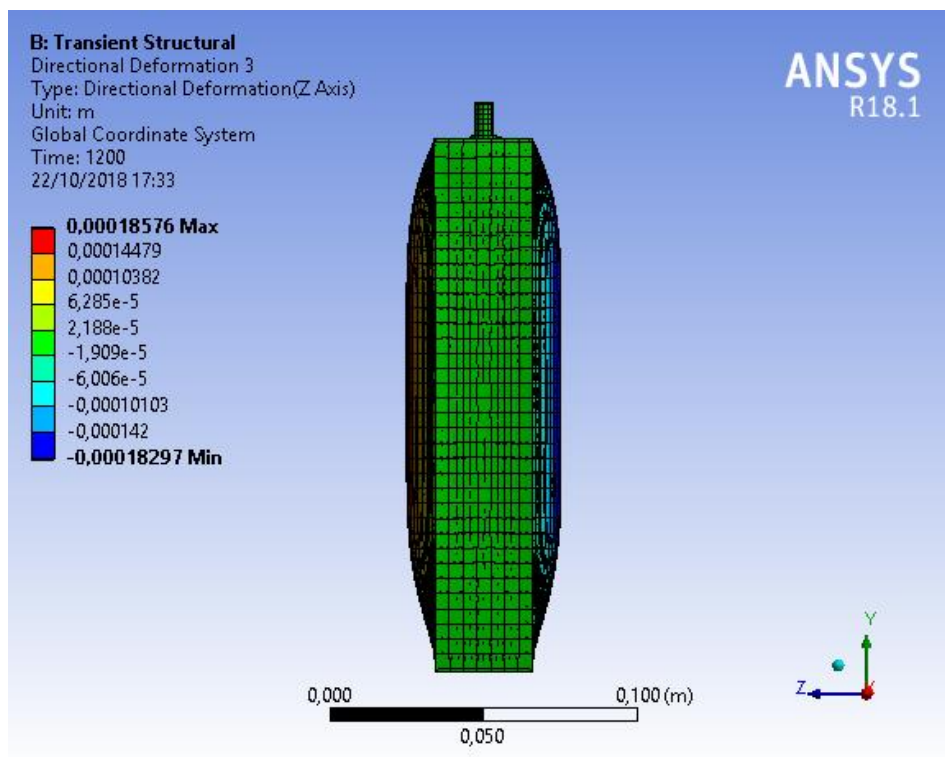
**Figura 57** - Vista assonometrica della deformazione lungo Y della cella



**Figura 58** - Andamento temporale del valore massimo e minimo della deformazione lungo Z



**Figura 59** - Vista assonometrica della deformazione lungo Z della cella

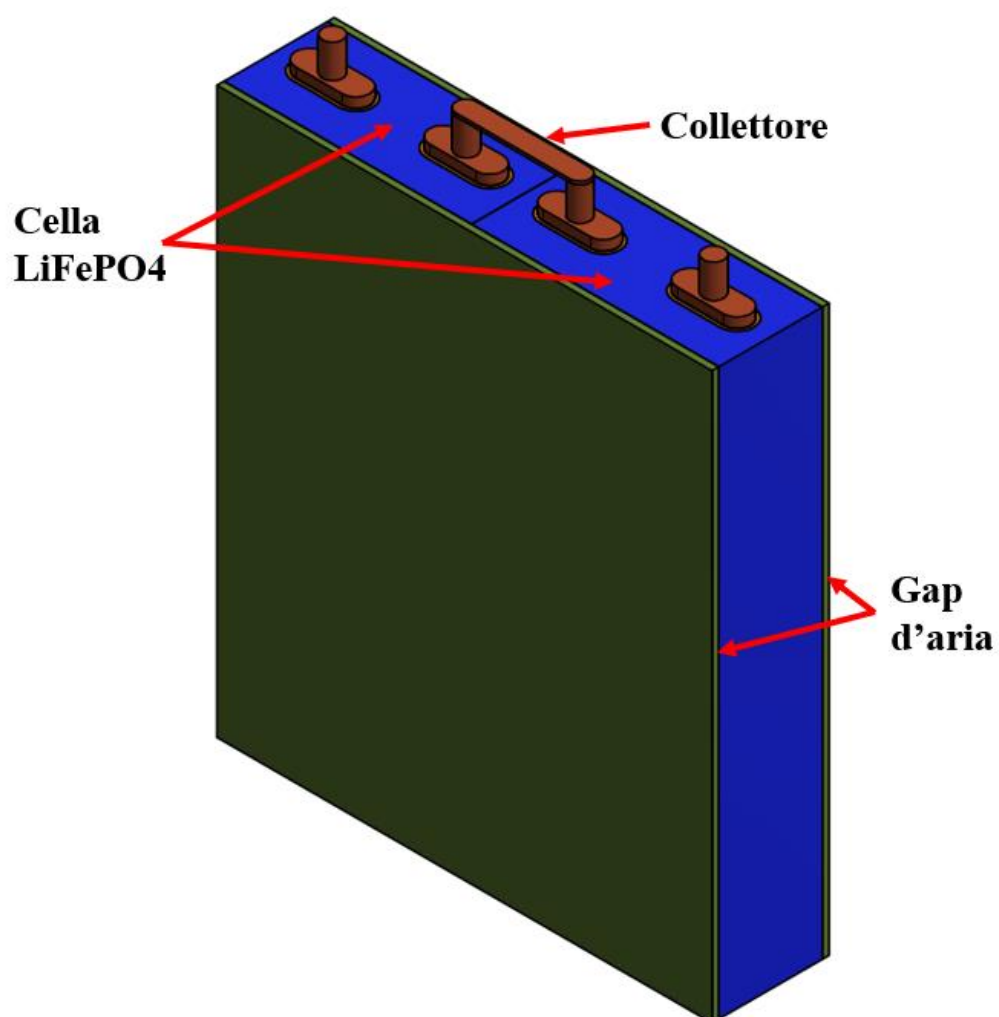


**Figura 60** - Vista nel piano ZY della deformazione lungo Z della cella



## Capitolo 5 – Analisi CFD modulo

In questo capitolo è presentato lo studio su una sezione di modulo composta da due celle in serie collegate tra loro da un collettore in rame (**Figura 61**) nel quale sono state aggiunti due gap d'aria che lambiscono la superficie esterna delle celle aventi uno spessore di 2 mm (**Figura 62**). Si è studiato l'effetto di un raffreddamento ad aria di tipo attivo (convezione forzata) sulla geometria paragonando la temperatura ottenuta utilizzando un raffreddamento in parallelo ed uno in serie. Infine, si è effettuato un confronto tra le temperature ottenute modificando la velocità dell'aria utilizzando un raffreddamento in serie.



**Figura 61** - Modulo composto da due celle in serie

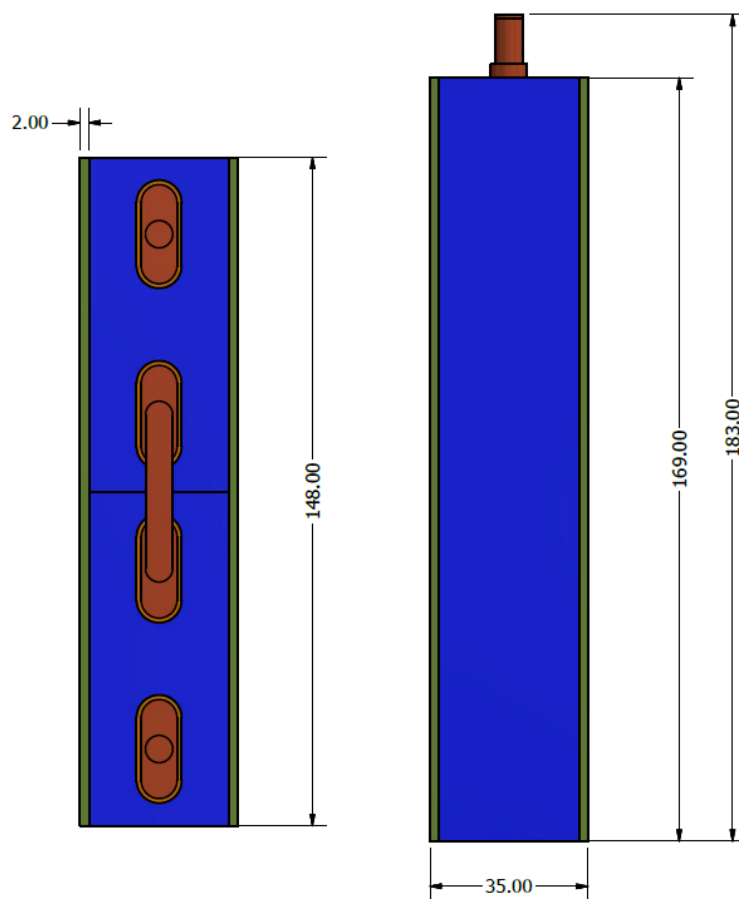


Figura 62 - Dimensioni principali del modulo

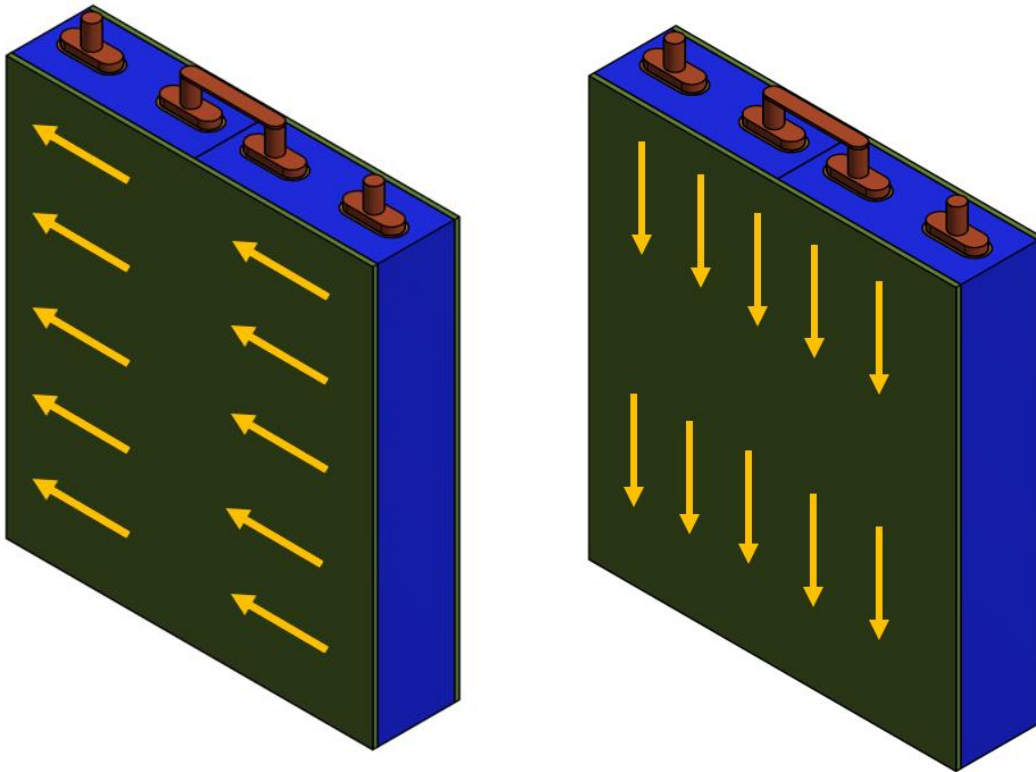
### 5.1. Confronto raffreddamento in serie e in parallelo

In questa sezione sono messi a confronto le temperature misurate in punti specifici utilizzando un raffreddamento in serie e in parallelo utilizzando una portata d'aria pari a  $338 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Per raffreddamento in serie intendiamo un raffreddamento come in **Figura 63a** dove l'aria della ventilazione entra da un lato del modulo ed esce dal lato opposto. Si ha così che tutti i moduli sono attraversati dalla stessa quantità d'aria. Questo tipo di raffreddamento fa sì che durante il suo flusso l'aria si riscalda diminuendo così la capacità di raffreddamento più si è lontani dall'ingresso.

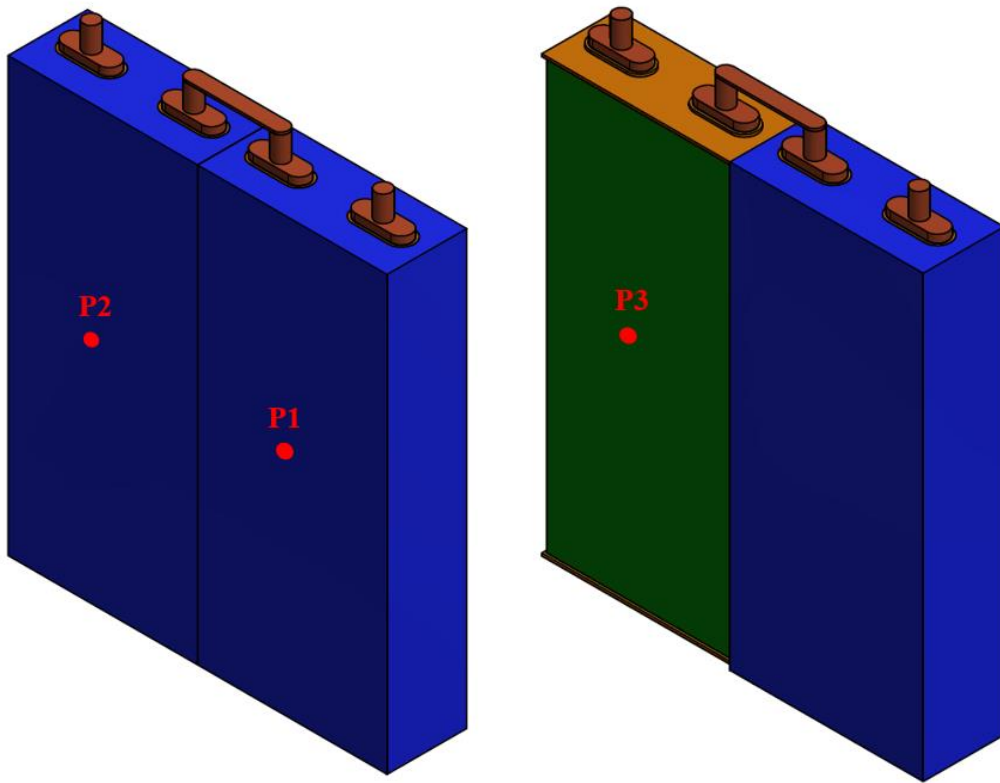
Per raffreddamento in parallelo intendiamo, invece, un raffreddamento nel quale l'aria raffredda il modulo dall'alto verso il basso come in **Figura 63 b**; questo raffreddamento non presenta lo stesso problema del raffreddamento in serie in quanto la portata d'aria lambisce egualmente ogni modulo. Si ha così che grazie a questo raffreddamento sia

possibile ottenere una distribuzione della temperatura più uniforme all'interno del modulo batteria.



**Figura 63** – a. Raffreddamento in serie del modulo; b. Raffreddamento in parallelo del modulo

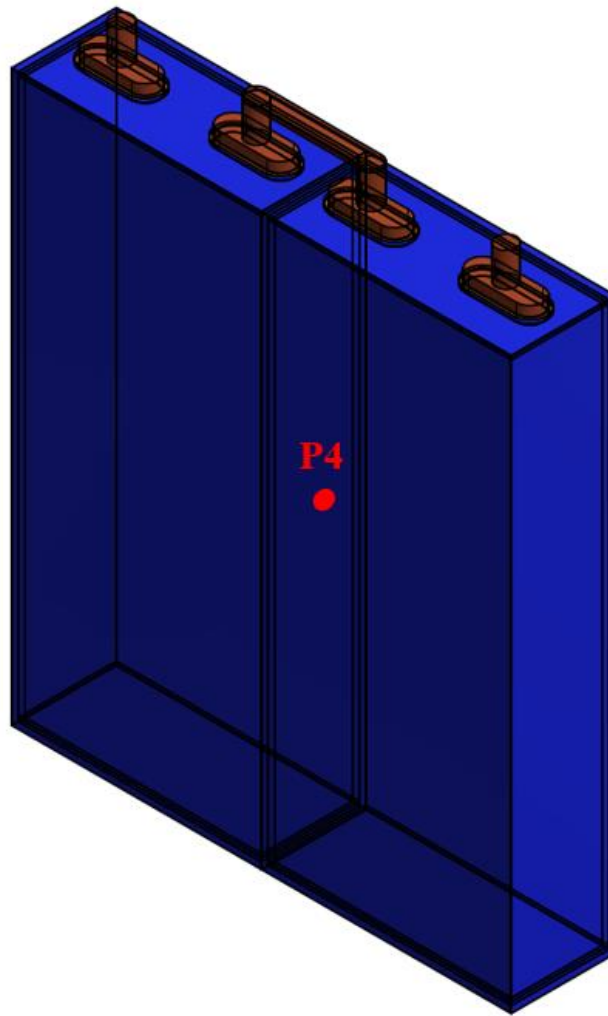
Prima di effettuare i test simulativi sul modulo è stato necessario scegliere dei punti necessari per confrontare i due tipi di raffreddamento. Si sono scelti, innanzitutto, due punti sulla superficie esterna del case delle due celle (punti P1 e P2 di **Figura 64a**). Dopodiché si è scelto un punto sulla superficie della parte attiva della seconda cella (**Figura 64b**) in modo da verificare che l'utilizzo di un raffreddamento in parallelo sia più efficace nel raffreddare celle diverse dalla prima.



**Figura 64 – a. Punti P1 e P2; b. Punto P3**

Infine, si è scelto di analizzare il punto P4, punto appartenente alla superficie esterna di entrambe le celle (**Figura 65**). Questo punto risulta particolarmente importante in quanto non è influenzato direttamente dal tipo di raffreddamento non venendo mai a contatto con l'aria, bensì la sua temperatura dipenderà da quella assunta dalle due celle.





**Figura 65 - Punto P4**

Il primo confronto è stato effettuato sulla temperatura dei punti P1 e P2 al variare del tempo. Come detto in precedenza si è utilizzata una portata di aria di ventilazione pari a  $338 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . Per trovare la velocità dell'aria per i due tipi di raffreddamento si è utilizzato l'equazione (30):

$$v = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (30)$$

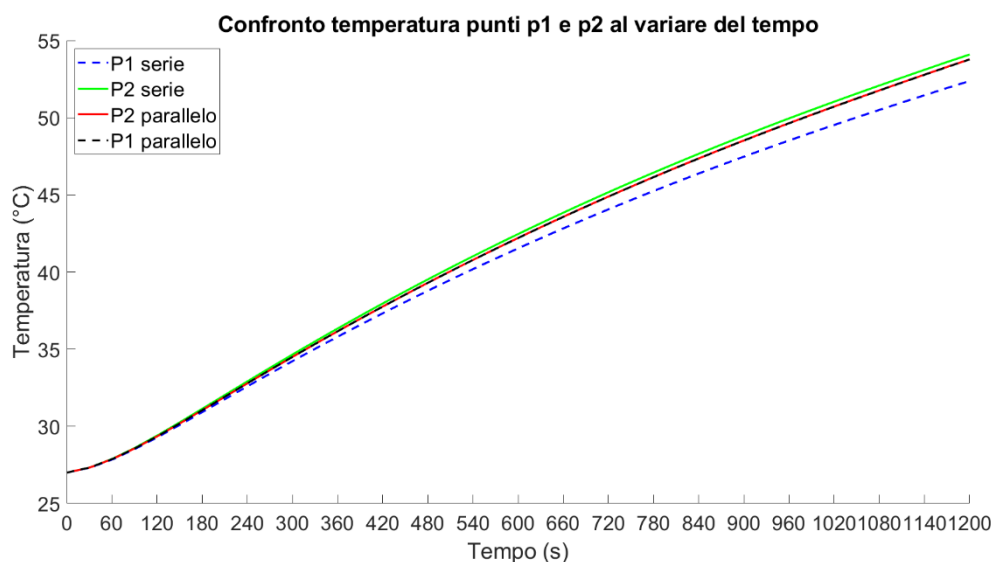
Dove:

- $\dot{Q}$  è la portata pari a  $338 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- $A$  è l'area della sezione d'entrata per il flusso d'aria raffrescante pari a  $338 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  per il raffreddamento in serie e  $296 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  per quello in parallelo.

Si è così trovato che la velocità dell'aria è pari a 1 m/s per il raffreddamento in serie, mentre per quello in parallelo questa raggiunge il valore di 1.142 m/s.

Osservando la **Figura 66** si nota come utilizzando un raffreddamento in parallelo la temperatura nei punti P1 e P2 sia praticamente identica. Al contrario l'uso di un raffreddamento in serie fa sì che la temperatura del punto P1 (curva tratteggiata in blu) sia notevolmente inferiore a quella del punto P2 (curva in verde). Ciò è dovuto al fatto che, come detto in precedenza, in un raffreddamento in serie il flusso d'aria che lambisce la batteria si riscalda man mano che ci si allontana dall'entrata. Il che implica una non uniformità della temperatura lungo tutto il modulo (temperatura delle celle via via maggiore avvicinandosi alla sezione d'uscita del flusso d'aria). Si può, inoltre, notare come la temperatura dei due punti nel caso del raffreddamento in parallelo sia maggiore di quella del punto P1 serie. Tale risultato è dovuto al fatto che in un raffreddamento in parallelo la portata d'aria viene divisa equamente tra tutte le celle mantenendo uniformità lungo tutto il modulo.

Entrambe le soluzioni sono comunque sufficienti a mantenere una variazione di temperatura compresa tra 5 °C lungo tutto il modulo come suggerito da Pesaran [5].



**Figura 66** - Confronto temperatura punti P1 e P2

Successivamente si è confrontata la temperatura nel punto P3 ottenuta con i due tipi di raffreddamento. Osservando la **Figura 67** e più nel dettaglio la **Figura 68** si osserva che utilizzando un'uguale portata dell'aria la temperatura ottenuta con il raffreddamento parallelo è inferiore. Questo risultato è però influenzato dalla geometria e dalla complessità del modulo. Nel caso in esame bisogna considerare con attenzione la lunghezza stessa del modulo. Si ha infatti che come detto in precedenza, in un raffreddamento in serie maggiore sarà la lunghezza del modulo, minore sarà la capacità di raffreddare dell'aria allontanandosi dalla sezione d'ingresso; al contrario il raffreddamento in parallelo è esente da questa

problematica: maggiore sarà il modulo, minore sarà la velocità dell'aria e quindi si avrà una temperatura maggiore nella prima cella del modulo rispetto al raffreddamento in serie, ma la distribuzione di temperatura sarà più uniforme lungo tutto il modulo.

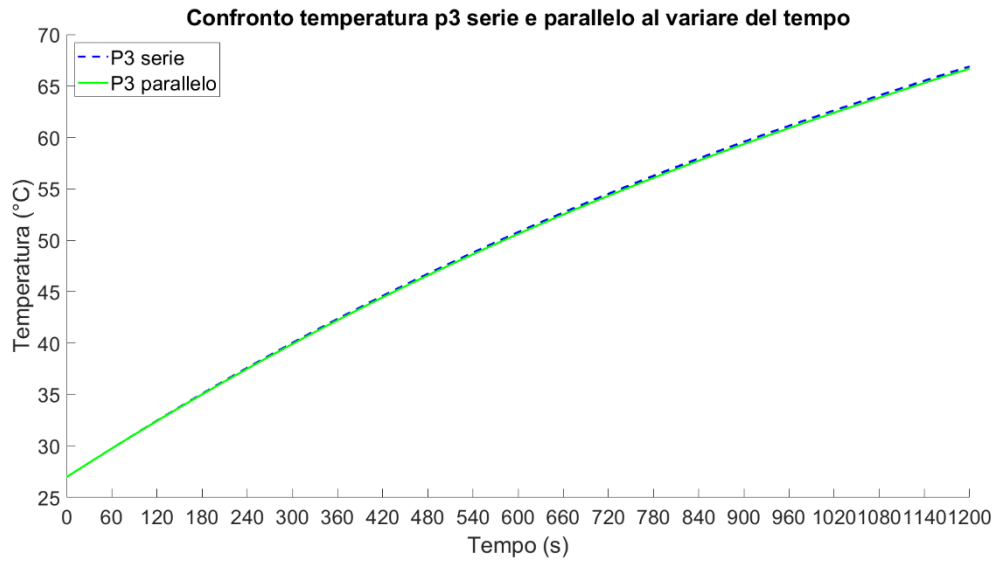


Figura 67 - Confronto temperatura punto P3

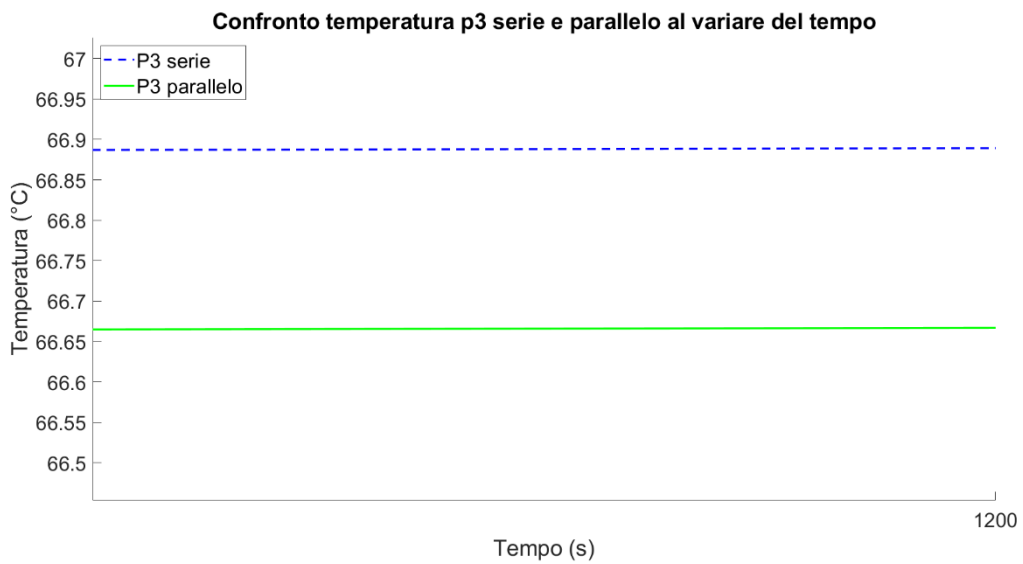
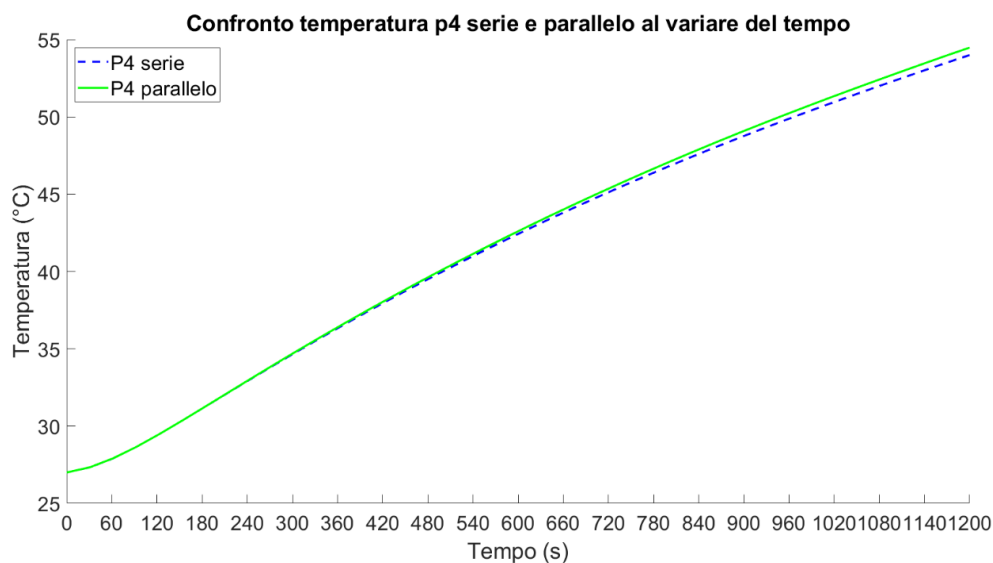


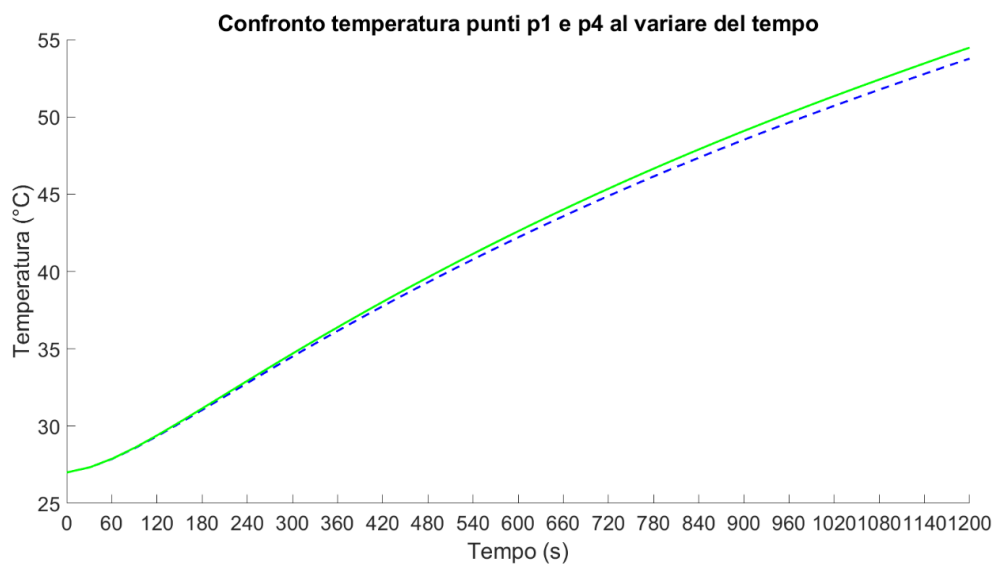
Figura 68 - Dettaglio temperatura punto P3

Un ulteriore confronto tra raffreddamento in serie e in parallelo è stato effettuato per il punto P4. Osservando la **Figura 69** si evince che almeno per l'interfaccia tra le prime due celle il raffreddamento in serie è più efficace in quanto la prima cella è sensibilmente più fredda della stessa raffreddata con un flusso d'aria parallelo.



**Figura 69** - Confronto temperatura punto P4

Il punto P4 è un punto di particolare interesse essendo questo non raffreddato in maniera diretta dal flusso d'aria. In **Figura 70** è possibile osservare come il punto P4 abbia una temperatura maggiore del punto P1, punto che invece è raffrescato direttamente dal flusso d'aria.

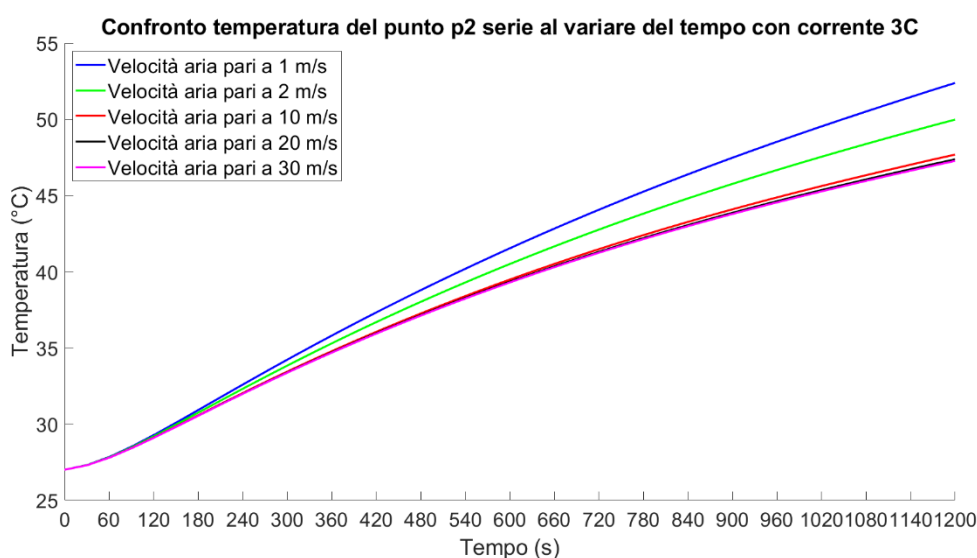


**Figura 70** - Confronto temperatura punti P1 e P4

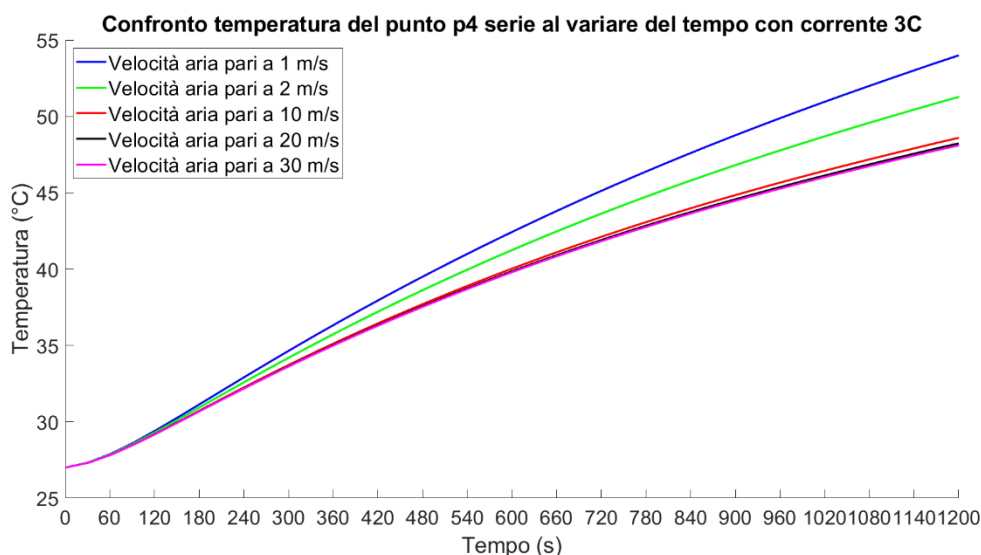
## 5.2. Determinazione condizioni di raffreddamento ottimali

In questa sezione si è scelto di misurare la temperatura di due punti campione (punti P2 e P4) variando la velocità del flusso d'aria e di conseguenza la portata.

I risultati ottenuti con un raffreddamento in serie sono visibili in **Figura 71** e **Figura 72**. Confrontando i profili di temperatura si nota come aumentando la velocità dell'aria, da 1 m/s a 2 m/s e poi fino a 10 m/s, si abbia un evidente vantaggio nel diminuire la temperatura superficiale delle celle (utilizzando 10 m/s si ha una diminuzione di circa 10 °C a fine simulazione rispetto all'uso di 1 m/s). Il vantaggio diventa, invece, minimo per velocità maggiori di 10 m/s dove la diminuzione di temperatura è trascurabile.

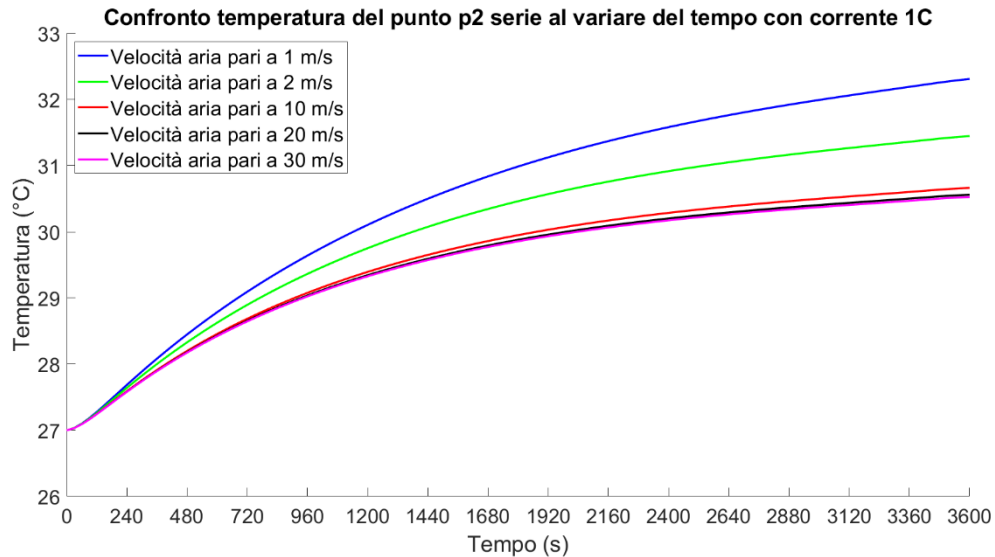


**Figura 71** - Temperatura ottenuta variando la velocità del flusso nel punto P2



**Figura 72** - Temperatura ottenuta variando la velocità del flusso nel punto P4

I risultati precedenti sono stati ottenuti utilizzando una corrente di scarica pari a 3C. L'utilizzo di una corrente così elevata in modo continuativo non è però di uso comune nelle applicazioni sperimentali. Si è soliti infatti utilizzare correnti di intensità minore e utilizzare una corrente pari a 3C solo in modo impulsivo quando si necessita di maggiore potenza. Per questo motivo si è effettuata la stessa analisi focalizzandosi sul punto P2 utilizzando questa volta una corrente di scarica pari a 1C (**Figura 73**). Questa corrente è infatti utilizzabile continuamente senza problematiche termiche.



**Figura 73** - Temperatura ottenuta variando la velocità del flusso nel punto P2

Osservando il grafico si nota un comportamento simile a quello ottenuto con una corrente di scarica pari a 3C. Si nota infatti come superati i 10 m/s si ottengano differenze di temperatura minime. A differenza della **Figura 71** però si nota come le curve abbiano un notevole appiattimento nella parte finale della simulazione (creando quasi un asintoto orizzontale) evidenziando l'efficacia del raffreddamento con convezione forzata.

Per ottenere temperature inferiori è necessario agire sull'area della superficie d'entrata e di conseguenza sullo spessore dei due strati d'aria (in queste simulazioni era di appena 2 mm) in modo da aumentare la portata d'aria fluente.

## Capitolo 6 – Analisi di sensitività

In questo capitolo è stata effettuata un'analisi di sensitività sul modello in modo da studiare come alcuni output di un modello numerico possano essere influenzati dalla scelta di input diversi [35]. Nel nostro caso gli input presi in considerazione sono stati la geometria della cella e dei suoi componenti e i parametri del modello circuitale equivalente. Le prove sono state condotte sempre utilizzando il software ANSYS Fluent selezionando un punto appartenente alla superficie esterna del case e uno della superficie della zona attiva misurandone la temperatura al variare del tempo.

### 6.1. Modifica geometria cella

Questa parte del capitolo ha lo scopo di evidenziare l'importanza e l'influenza della geometria della cella e in particolare di alcuni elementi che la costituiscono come lo strato d'aria e la parte attiva sui risultati finali ottenuti attraverso la simulazione e in particolare su quale geometria fornisca come risultato una temperatura della parte attiva inferiore. Bisogna infatti ricordare, come detto nel capitolo 1.3, che ad alte temperature la parte attiva di una batteria va incontro a fenomeni esotermici distruttivi che, nei casi peggiori, possono causare l'esplosione della stessa venendo così a crearsi un problema di sicurezza.

Finora lo studio simulativo si è concentrato su una geometria, che per semplicità chiameremo "G0", composta dal materiale attivo, dallo strato d'aria e da un involucro esterno in alluminio (Figura 74).



Figura 74 - Geometria "G0"

Come precedentemente detto nel capitolo 2.1, si è optato nell'utilizzo di colori diversi per distinguere gli elementi che costituiscono la cella:

- Blu = case esterno in alluminio;
- Giallo = strato d'aria;

- Verde = componente attiva della batteria;
- Arancione = separatore cartaceo.

Al fine di effettuare un'analisi di sensitività sulla batteria, si è deciso di procedere dapprima alla modifica della geometria in modo da analizzare come tale variazione avesse effetto sui risultati finali, ovvero sulla temperatura della cella. Si è, quindi, proceduto alla definizione di due diverse configurazioni, alternative alla geometria "G0".

La prima geometria proposta, identificata dalla sigla "G1" (**Figura 75**), prevede una configurazione simile alla geometria "G0" con la differenza che al posto dello strato d'aria viene utilizzato un separatore di carta; rimane invariata di conseguenza la forma a parallelepipedo degli elementi come si può vedere confrontando **Figura 74** e **Figura 75**. Il separatore cartaceo, proprio come l'aria, deve impedire il contatto diretto tra case esterno e parte attiva, inoltre deve aver funzione di isolante elettrico impedendo il passaggio di corrente dalla parte attiva al case, ma al tempo stesso non deve ostacolare la dissipazione del calore.



**Figura 75** - Geometria "G1"

La seconda geometria proposta (Geometria "G2") vede la coesistenza al suo interno di aria e del separatore cartaceo, ma questa volta si ha una modifica della geometria della parte attiva con un arrotondamento agli estremi in modo da avvicinarsi maggiormente alla geometria reale dei jelly roll (**Figura 76**).



**Figura 76** - Geometria "G2"



Una volta definite le tre geometrie si è proceduto a simulare il comportamento di queste utilizzando come input per la simulazione quattro diverse correnti di scarica come è possibile osservar nella **Tabella 24**.

**Tabella 24** - Input simulazioni per variazione della geometria

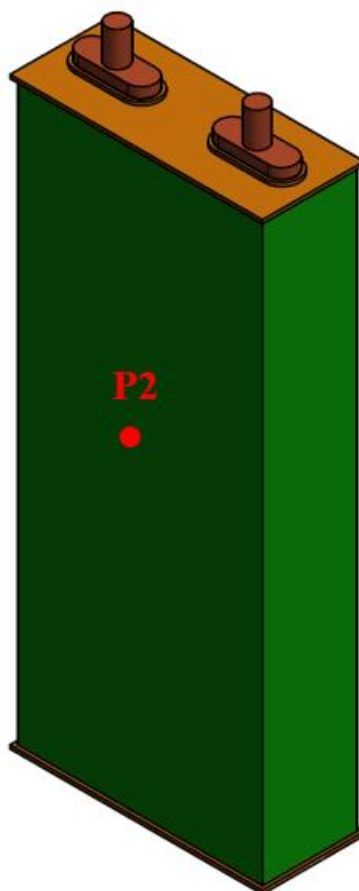
Corrente di scarica	Condizione al contorno: temperatura convezione naturale (K)	Tempo di simulazione (s)
0.5C	300	7200
1C	300	3600
2C	300	1800
3C	300	1200

Per ogni prova si è provveduto a misurare la temperatura in due punti specifici. Il primo punto di misurazione (punto P1) è sulla superficie esterna del case al centro della faccia più estesa (**Figura 77**).



**Figura 77** - Punto di misurazione esterno

Il secondo punto di misurazione (P2) è sulla superficie della parte attiva e quindi interno alla cella stessa (**Figura 78**).



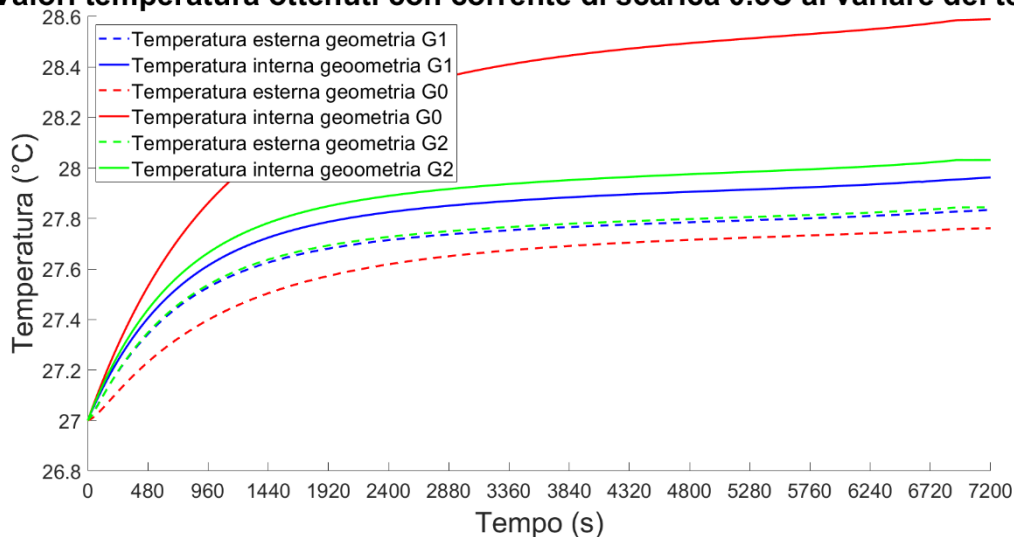
**Figura 78** - Punto di misurazione interno

I risultati ottenuti sono sintetizzati in **Figura 79** - Confronto temperature con corrente di scarica 0.5C, **Figura 80**, **Figura 81** e **Figura 82**. Si può osservare come in tutte e quattro le figure i risultati migliori si ottengano utilizzando la geometria "G1". Confrontando infatti i valori di temperatura ottenuti attraverso le prove con geometria "G0" e "G1" si può notare come la temperatura esterna della geometria "G1" (curva tratteggiata in blu) sia maggiore di quella ottenuta con la geometria "G0" (curva tratteggiata in rosso), mentre quella interna sia molto inferiore (curve continue in blu e in rosso). Come detto in precedenza, è soprattutto la temperatura della parte interna che va presa in considerazione per garantire un corretto funzionamento della batteria e non un rischio per la sicurezza.

Si evince quindi che grazie all'utilizzo di un separatore cartaceo al posto dello strato d'aria, la batteria riesca a dissipare maggiore calore, in tal modo è possibile ottenere una differenza di temperatura tra interno (parte attiva) ed esterno (case in alluminio) inferiore rispetto alla geometria "G0".

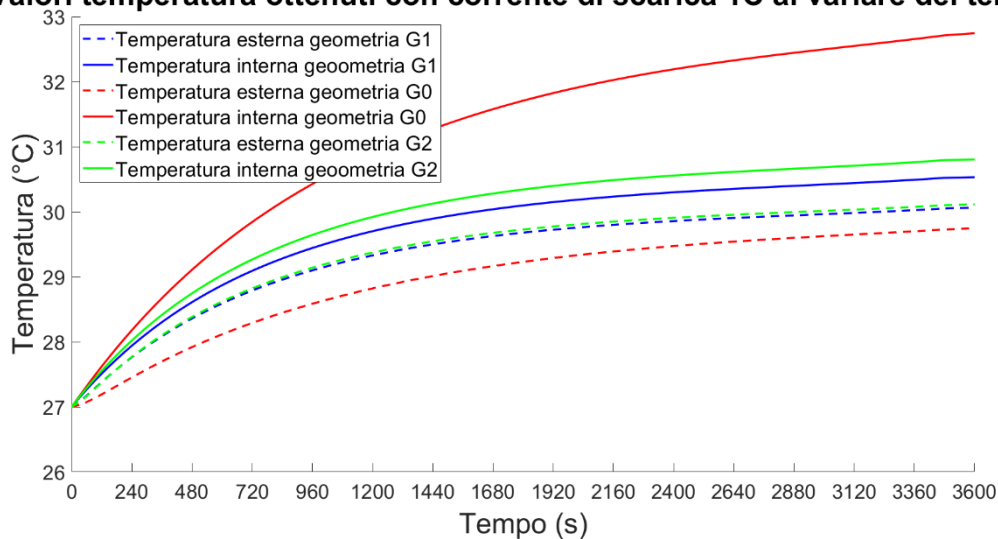
La geometria “G2”, nonostante abbia uno scarto di temperatura tra interno ed esterno più contenuto rispetto alla “G0”, mostra risultati peggiori (per quanto riguarda la temperatura interna) rispetto alla geometria “G1”. Il motivo è da ricercarsi nella contemporanea presenza dello strato cartaceo e dell’aria. Infatti, negli spigoli dove vi è la presenza di aria (gli strati sono case-aria-separatore-parte attiva), la capacità dissipativa del calore è minore rispetto a quella che si ha nelle zone in cui vi sono gli strati case-separatore-parte attiva e ciò determina l’impossibilità del materiale di raffreddarsi come nella geometria “G1”.

**Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 0.5C al variare del tempo**



**Figura 79** - Confronto temperature con corrente di scarica 0.5C al variare della geometria

**Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 1C al variare del tempo**



**Figura 80** - Confronto temperature con corrente di scarica 1C al variare della geometria

### Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 2C al variare del tempo

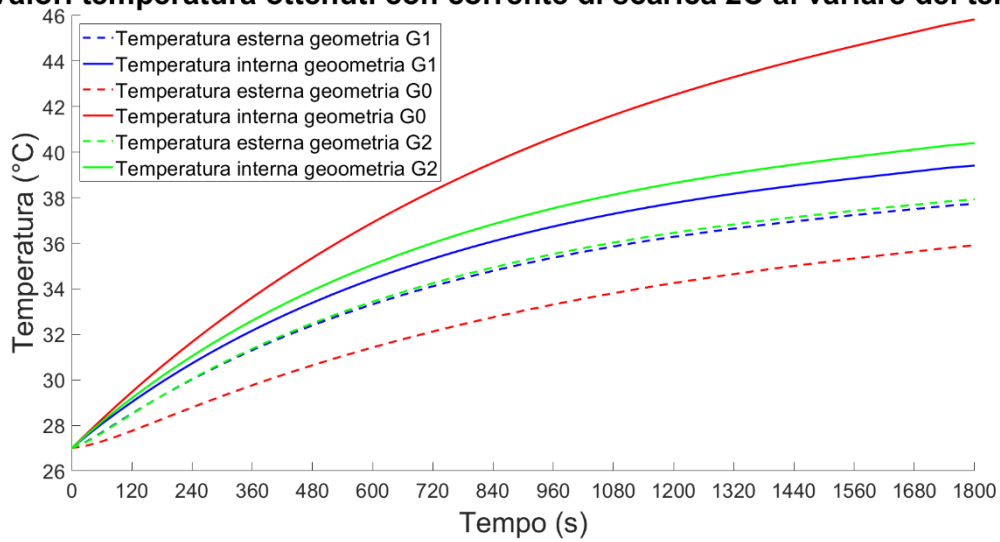


Figura 81 - Confronto temperature con corrente di scarica 2C al variare della geometria

### Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 3C al variare del tempo

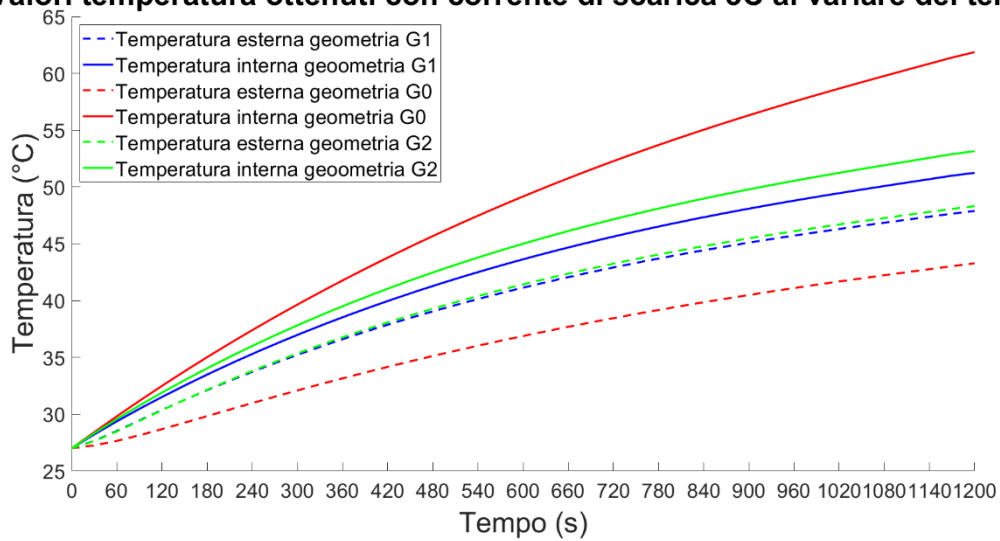


Figura 82 - Confronto temperature con corrente di scarica 3C al variare della geometria

Per avvalorare quanto detto in precedenza si è svolta un'ulteriore analisi sulla temperatura agli spigoli della cella utilizzando la geometria "G1" e "G2".

## 6.2 *Variazione temperatura ambiente*

Come è visibile nella **Tabella 24** - Input simulazioni per variazione della geometria **Tabella 24** tutte le prove finora condotte sull'analisi di sensitività sono state effettuate utilizzando una temperatura dell'aria esterna pari a 300 K. Lo scopo di questa sezione è di analizzare come una diversa temperatura utilizzata nella convezione naturale influenzi l'andamento temporale della temperatura della cella.

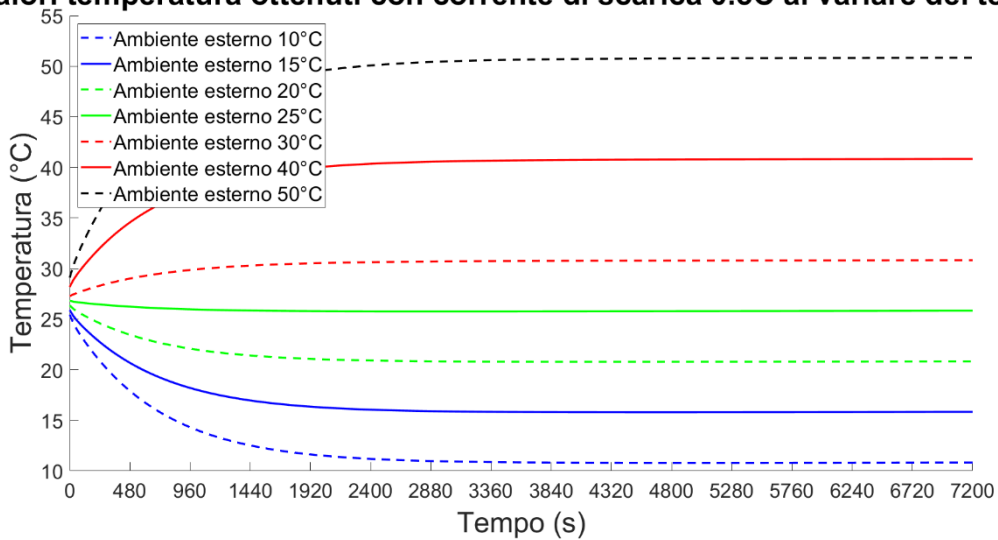
Poiché si vuole solo analizzare l'influenza della temperatura dell'aria si è deciso di utilizzare nelle prove una sola geometria in modo da avere una sola variabile da investigare alla volta. Si è quindi scelto di utilizzare la sola geometria "G1" e di effettuare due prove con corrente di scarica 0.5C e 3C.

Le prove sono state condotte utilizzando sette diverse temperature dell'aria da utilizzare nelle condizioni al contorno e si è scelto di utilizzare una temperatura di partenza per la cella (temperatura che ha la cella all'inizio della prova) pari a 300 K. Gli inputi utilizzati sono sintetizzati nella **Tabella 25**:

**Tabella 25** - Input simulazioni per variazione della temperatura ambiente

Temperatura iniziale della cella (K)	300
Corrente di scarica	0.5C
	3C
Temperatura aria dell'ambiente esterno (°C)	10
	15
	20
	25
	30
	40
	50

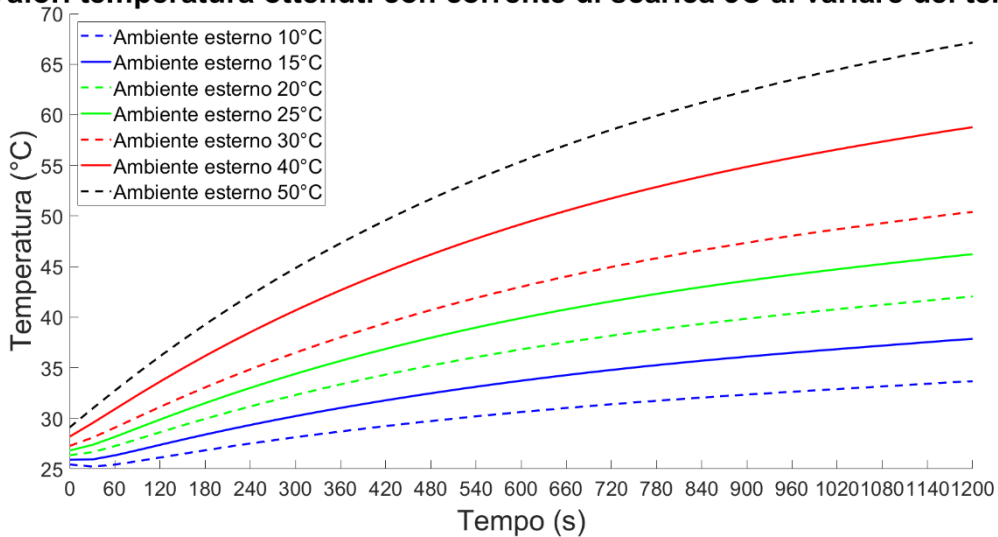
### Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 0.5C al variare del tempo



**Figura 83** - Confronto temperature con corrente di scarica 0.5C al variare della temperatura ambiente

Osservando la **Figura 83** si nota come utilizzando una corrente di scarica pari a 0.5C il calore generato dalle reazioni elettrochimiche ha influenza di gran lunga inferiore rispetto a quello generato dall'aria. Si ha che per temperature inferiori a 300 K (27 °C) il calore sottratto dall'aria è superiore a quello generato elettro-chimicamente, mentre per temperature superiori l'aria è il principale responsabile del riscaldamento della cella. Si giunge così velocemente ad una condizione di equilibrio con la temperatura che ha un andamento pressoché orizzontale.

### Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 3C al variare del tempo



**Figura 84** - Confronto temperature con corrente di scarica 3C al variare della temperatura ambiente

Utilizzando invece una corrente di scarica maggiore pari a 3C (**Figura 84**) si assiste alla situazione opposta rispetto al caso precedente. Il calore elettrochimico è maggiore di quello sottratto dall'aria per temperature inferiori a 27 °C. Utilizzando temperature comprese tra 10 °C e 20°C è possibile osservare un andamento non monotono della temperatura. Nei primi 30 secondi si nota infatti che il raffreddamento indotto dall'aria supera il calore elettrochimico causando una diminuzione della temperatura. Superata questa fase il calore generato dalle reazioni supera quello sottratto dalla convezione naturale causando un aumento della temperatura per tutto il resto della prova.

### 6.3 Modifica parametri ECM

In questa sezione dell'analisi di sensitività si è voluto invece indagare sull'influenza data dai parametri polinomiali utilizzati nel modello circuitale equivalente. Si è quindi deciso di utilizzare la geometria "G0" e di modificare solo i parametri introducendo la dipendenza della resistenza dallo stato di scarica. Nel capitolo 3.1 si sono, infatti, utilizzati dei parametri indipendenti dallo stato di scarica (SOC) per definire il modello circuitale equivalente.

La seguente analisi è stata condotta introducendo la dipendenza dal SOC solo per la resistenza  $R_s$ , mantenendo invece indipendenti i valori delle resistenze  $R_1$  e  $R_2$  e delle capacità  $C_1$  e  $C_2$ . Si è inoltre scelto di utilizzare tre correnti specifiche pari a 25 A, 50 A e 75 A come avvenuto per le prove sperimentali.

In primo luogo, è stato necessario modificare i valori di  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$  e  $C_2$  rispetto a quelli utilizzati precedentemente (**Tabella 4**) in modo da ottenere un comportamento che più si avvicinasse a quello reale della cella. I nuovi valori utilizzati sono raccolti nella **Tabella 26**. Tali parametri sono immutati in tutte le prove effettuate a differenza di quanto accaduto per i valori di  $R_s$ .

**Tabella 26** - Nuovi valori per le resistenze e le capacità

$R_1$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
	0.000013	0	0	0	0	0
$C_1$	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
	1061500	0	0	0	0	0
$R_2$	$d_0$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
	0.000015	0	0	0	0	0
$C_2$	$e_0$	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$
	4766700	0	0	0	0	0

I valori della resistenza  $R_s$  sono stati ricavati approssimando con una funzione di secondo grado la tensione ricavata sperimentalmente per le tre correnti di scarica. Dato l'utilizzo di una funzione di secondo grado solo i primi tre termini dell'equazione (26) risultano non nulli. I valori  $R_s$  così ottenuti sono sintetizzati nelle seguenti tabelle:

**Tabella 27** - Valori  $R_s$  per corrente di scarica pari a 25 A

$R_s$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
	0.0083	-0.0129	0.0088	0	0	0

**Tabella 28** - Valori  $R_s$  per corrente di scarica pari a 50 A

$R_s$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
	0.0056	-0.0060	0.0041	0	0	0

**Tabella 29** - Valori  $R_s$  per corrente di scarica pari a 75 A

$R_s$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
	0.0045	-0.0027	0.0036	0	0	0

Anche le capacità della cella da utilizzare all'interno del modello MSMD sono state modificate essendo queste dipendenti dal valore della corrente di scarica. Si sono così ottenuti i valori in **Tabella 30**.

**Tabella 30** - Valore capacità cella al variare della corrente di scarica

Corrente di scarica (A)	25	50	75
Valore capacità cella (Ah)	23.3885	23.1009	23.0218

Proprio come le resistenze e le capacità anche i valori della tensione del circuito aperto sono stati modificati per ottenere un buon fitting della tensione ottenuta tramite i test sperimentali. Si è così ottenuti i valori in **Tabella 31**.



**Tabella 31** - Nuovi valori della tensione a circuito aperto

$V_{ocv}$	$f_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
	2.9707	2.3120	-8.1330	15.0949	-13.6721	4.7729

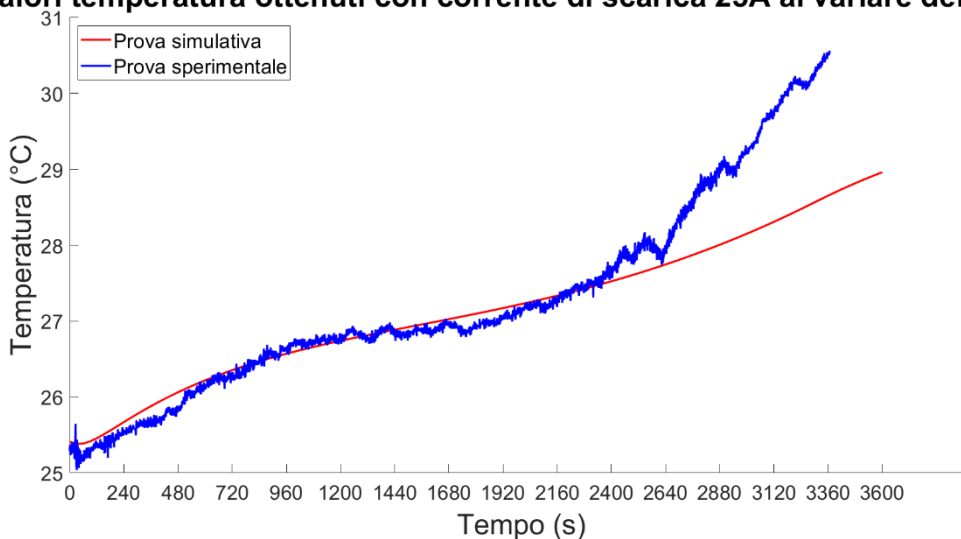
### 6.3.1 Validazione modello numerico

Dopo la definizione dei nuovi parametri polinomiali da inserire all'interno del modello circuitale equivalente si è effettuata la validazione conclusiva del modello numerico confrontando la temperatura misurata dalla termoresistenza e la tensione.

Le condizioni al contorno (temperatura dell'aria nei test sperimentali) utilizzate nelle simulazioni sono le stesse della **Tabella 14** con la differenza che invece che utilizzare la corrente espressa come C-rate si è scelto di utilizzare tre valori di corrente in ampere (25 A, 50 A e 75 A).

In **Figura 85**, **Figura 86**, **Figura 87**, **Figura 88**, **Figura 89** e **Figura 90** è possibile osservare i confronti effettuati tra la temperatura e la tensione ricavate sperimentalmente (curva in blu) e quelle ricavate tramite il modello numerico (curva in rosso).

**Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 25A al variare del tempo**



**Figura 85** - Confronto profilo temperatura con corrente di scarica 25 A

### Valori tensione ottenuti con corrente di scarica 25A al variare del tempo

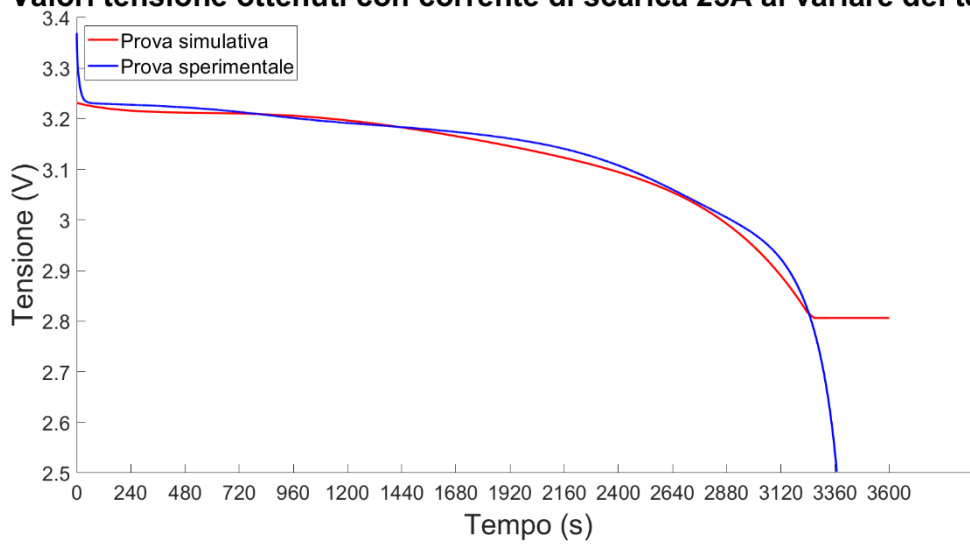


Figura 86 - Confronto tensione con corrente di scarica 25 A

### Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 50A al variare del tempo

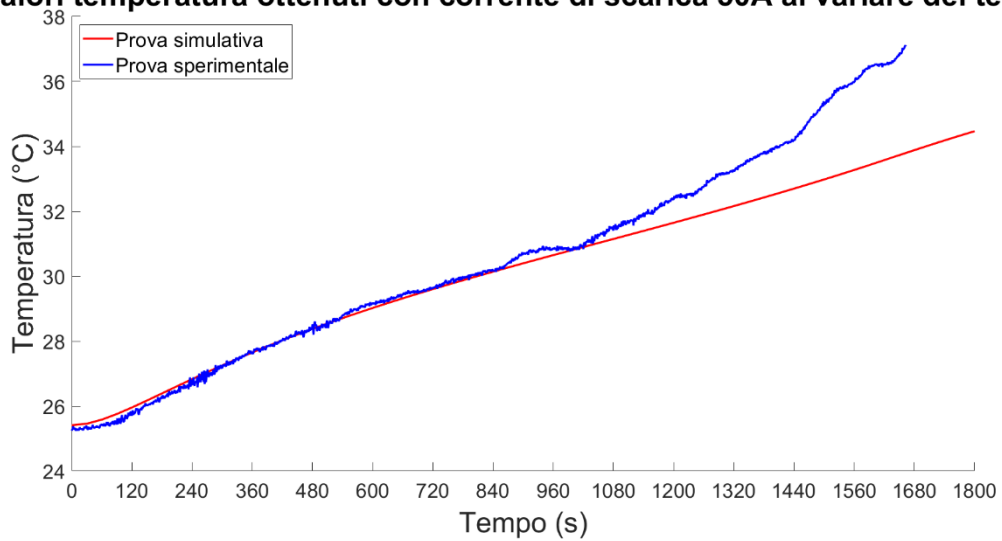


Figura 87 - Confronto profilo temperatura con corrente di scarica 50 A

### Valori tensione ottenuti con corrente di scarica 50A al variare del tempo

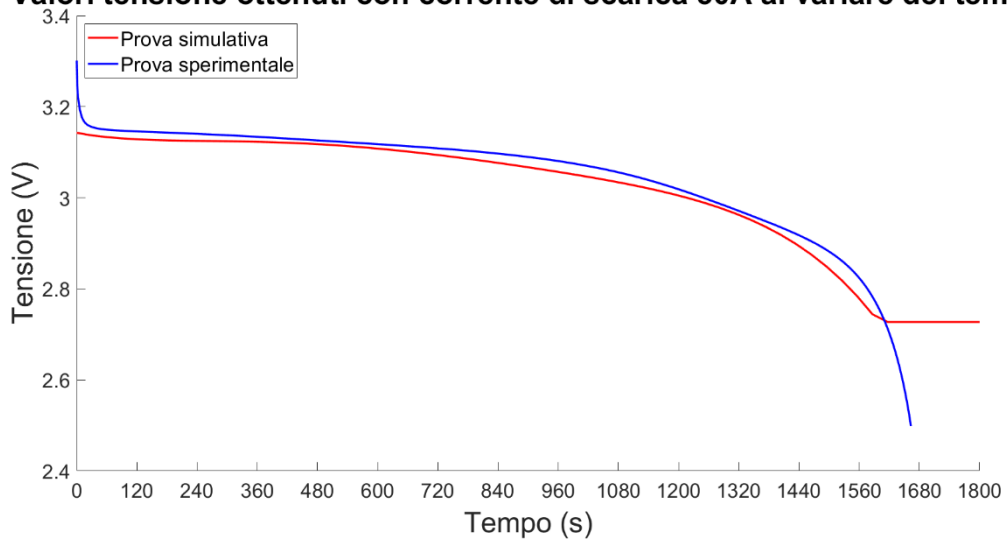


Figura 88 - Confronto tensione con corrente di scarica 50 A

### Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 75A al variare del tempo

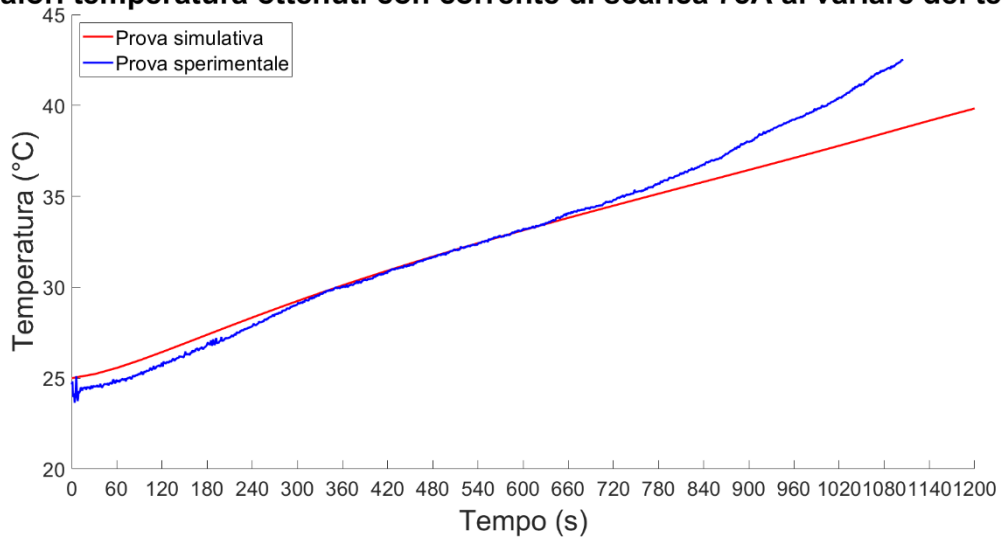


Figura 89 - Confronto profilo temperatura con corrente di scarica 75 A

### Valori tensione ottenuti con corrente di scarica 75A al variare del tempo

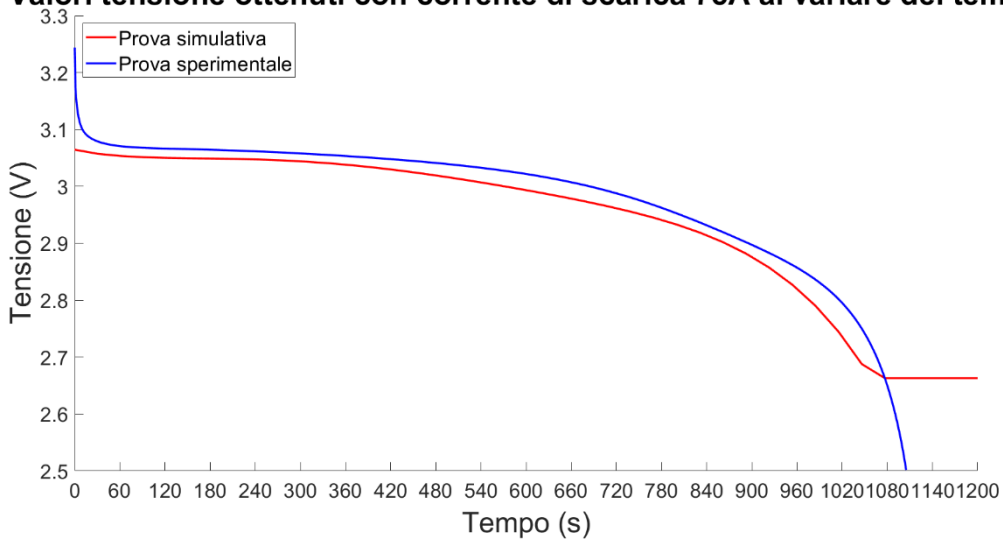


Figura 90 - Confronto tensione con corrente di scarica 75 A

Confrontando le due curve si osserva che rispetto alla **Figura 43**, **Figura 44** e **Figura 45** utilizzando i nuovi parametri si ottengono curve che approssimano in maniera più soddisfacente quelle sperimentali. In particolare, si nota che nella fase finale di simulazione si assiste ad un incremento della pendenza della curva a differenza di quanto accadeva utilizzando parametri non dipendenti dallo stato di scarica.

Un confronto tra il profilo di temperatura utilizzando parametri non dipendenti dal SOC e quella, invece, ottenuta con una resistenza dipendente dal SOC è visibile in **Figura 91** dove è evidente il differente comportamento termico dovuto all'incremento della resistenza man mano che la cella si scarica. Grazie infatti ai nuovi valori di  $R_s$  si osserva come la temperatura della curva rossa sia maggiore grazie all'incremento della resistenza della cella.

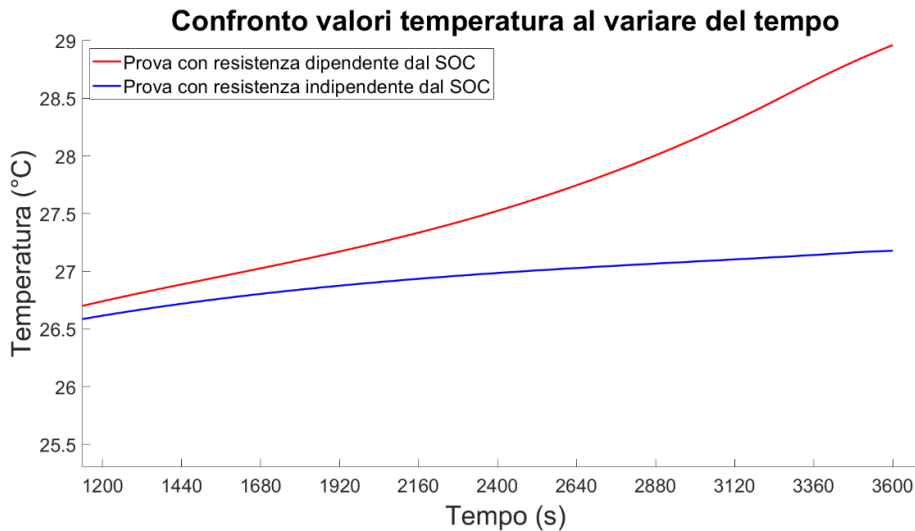


Figura 91 - Confronto temperatura con  $R_s$  dipendente e indipendente dal SOC

L'utilizzo dei nuovi parametri polinomiali ha permesso di ottenere una miglior approssimazione delle curve sperimentali. Osservando le figure è, però, possibile notare come nel tratto finale le temperature ottenute tramite le simulazioni non riescano a replicare quelle sperimentali. Allo stesso modo è possibile osservare un diverso comportamento della tensione nel tratto finale: invece di ottenere una tensione che decresce rapidamente si ha un tratto orizzontale.

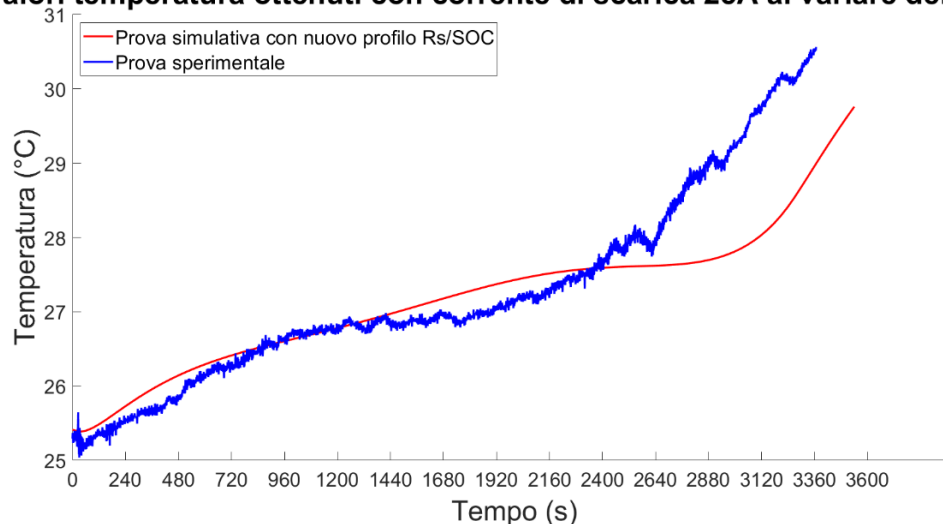
È stata così effettuata un'ulteriore indagine sul modello con lo scopo di verificare quali fosse l'influenza di un nuovo profilo resistenza/SOC sul comportamento termico ed elettrico della cella. In particolare, il nuovo profilo resistenza/SOC ha l'obiettivo di porre in risalto esclusivamente l'aumento della resistenza nel tratto finale della scarica ovvero quando la cella ha una limitata capacità residua. I parametri polinomiali ottenuti utilizzando una funzione di approssimazione di quinto grado sono raccolti nella **Tabella 32**.

**Tabella 32** - Parametri polinomiali di  $R_s$  con aumento della resistenza nel tratto finale della scarica

$R_s$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
	0.0167	-0.1477	0.6303	-1.2062	1.0482	-0.3365

Gli andamenti della temperatura e della tensione sono visibili nelle figure presentate di seguito. È possibile osservare come l'utilizzo del nuovo profilo  $R_s$ /SOC abbia comportato un notevole aumento della temperatura nel tratto finale della scarica eguagliando in alcuni casi i valori ottenuti sperimentalmente (figura con corrente di scarica 75 A). Anche nella tensione è possibile osservare una miglior approssimazione nel tratto finale della scarica con la tensione che riesce a simulare il tratto discendente delle prove sperimentali. Di contro rispetto alle **Figura 86**, **Figura 88** e **Figura 90** si nota un evidente peggioramento dell'approssimazione dei valori nel resto della prova.

**Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 25A al variare del tempo**



**Figura 92** - Confronto temperatura con corrente di scarica 25 A con nuovi parametri  $R_s$ /SOC

### Valori tensione ottenuti con corrente di scarica 25A al variare del tempo

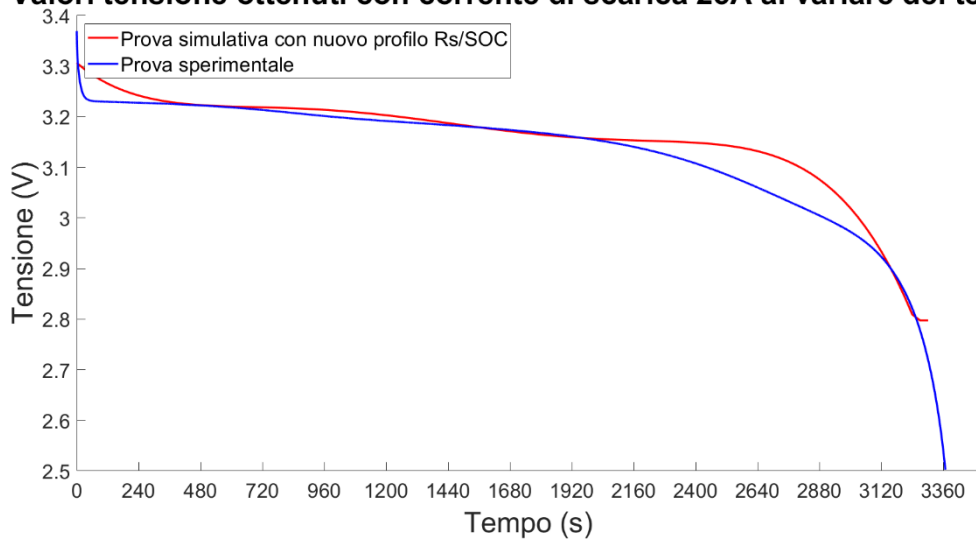


Figura 93 - Confronto tensione con corrente di scarica 25 A con nuovi parametri Rs/SOC

### Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 50A al variare del tempo

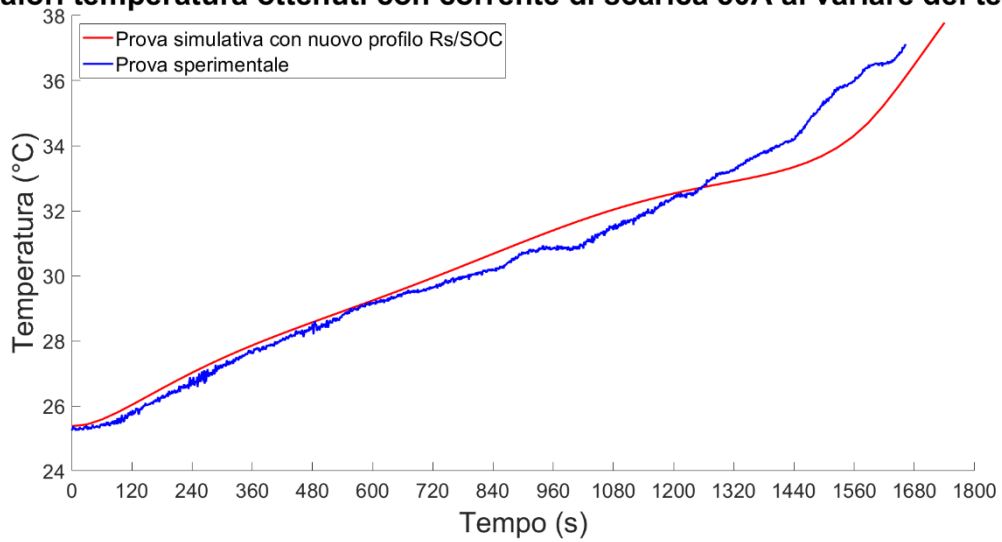


Figura 94 - Confronto temperatura con corrente di scarica 50 A con nuovi parametri Rs/SOC

### Valori tensione ottenuti con corrente di scarica 50A al variare del tempo

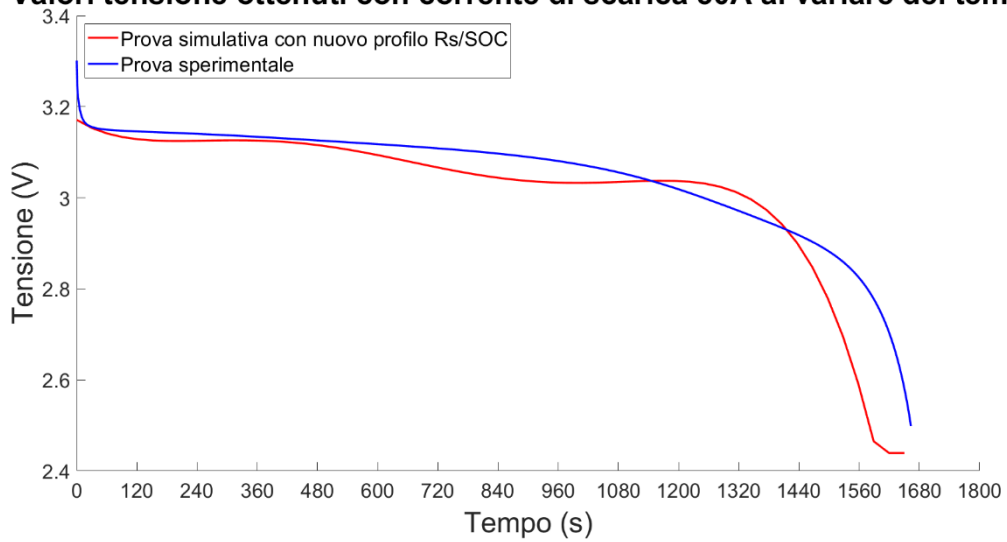


Figura 95 - Confronto tensione con corrente di scarica 50 A con nuovi parametri Rs/SOC

### Valori temperatura ottenuti con corrente di scarica 75A al variare del tempo

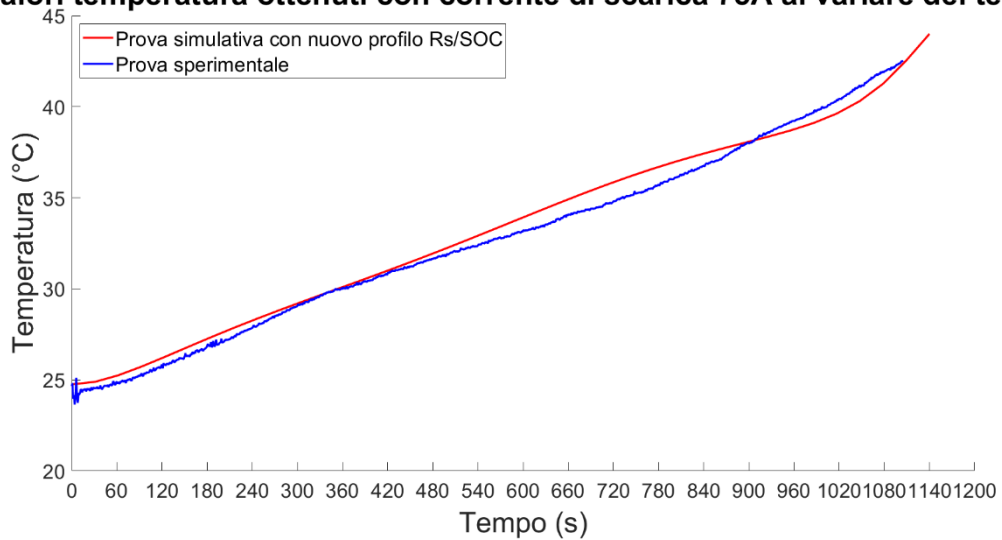


Figura 96 - Confronto temperatura con corrente di scarica 75 A con nuovi parametri Rs/SOC

### Valori tensione ottenuti con corrente di scarica 75A al variare del tempo

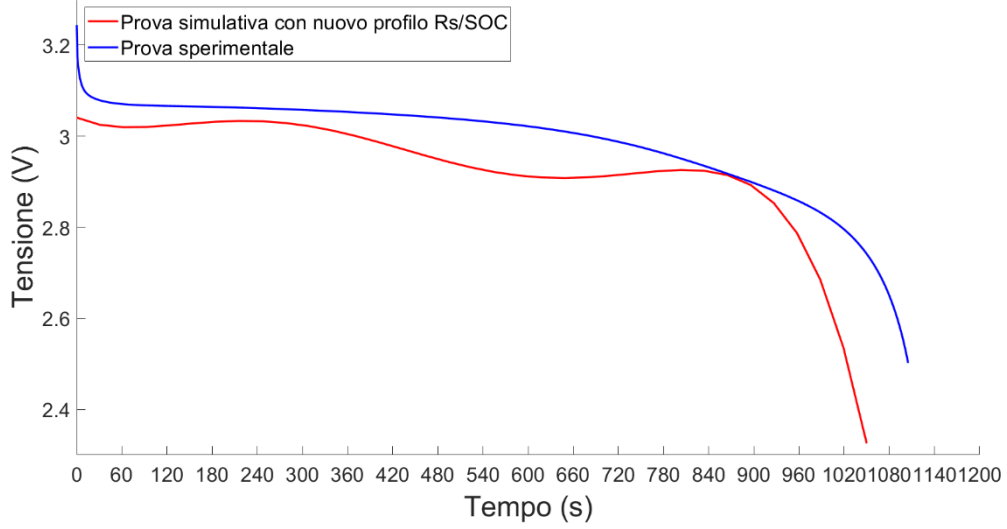


Figura 97 - Confronto tensione con corrente di scarica 25 A con nuovi parametri Rs/SOC



## Capitolo 7 – Conclusioni

In questo capitolo sono riassunti i risultati ottenuti in questo lavoro. È stato sviluppato un modello numerico attraverso il software ANSYS Fluent. Il modello permette di ottenere un'accurata rappresentazione della geometria di una cella al litio di tipo  $\text{LiFePO}_4$ . Il comportamento fluido-elettro-termico è stato studiato utilizzando il modulo Dual-Potential MSMD (Multi-Scale Multi-Dimensional) nel quale, previa la definizione di un modello elettrochimico, è possibile ottenere l'evoluzione temporale della temperatura della cella e delle proprietà elettriche come la tensione o la densità di corrente.

Un modello strutturale è stato inoltre preso in considerazione utilizzando il software ANSYS Mechanical APDL. Dall'analisi risulta che l'elemento più sollecitato risulta essere il case in alluminio avendo una tensione equivalente agente pari a  $9.865 \cdot 10^7$  Pa. Confrontando tale valore con la tensione a snervamento e a rottura di laminati in alluminio di pari spessore utilizzati principalmente nell'industria chimica, alimentare e per conduttori elettrici si osserva come lo stress equivalente agente sulla cella risulta essere minore del valore minimo di tensione a snervamento pari a  $1.2 \cdot 10^8$  Pa [36].

Un modello CFD è stato utilizzato anche per un modulo costituito da due celle al litio affiancate nel quale invece che una convezione naturale si è utilizzata una forzata. Si è osservato come l'utilizzo di un raffreddamento in parallelo ovvero col getto d'aria proveniente dall'alto della cella garantisca una maggiore uniformità della temperatura lungo tutto il modulo a differenza di quanto accade con un raffreddamento in serie. La ricerca della velocità del getto da utilizzare ha, invece, evidenziato come per velocità superiori ai 10 m/s non si abbiano sostanziali benefici. Risulta, quindi, che l'utilizzo di un gap d'aria così contenuto (2 mm) sia il limite più grande per il raffreddamento delle celle.

In ultimo l'analisi di sensitività ha evidenziato quanto la modifica della forma geometrica e dei materiali della cella influenzino la risposta termica della batteria. L'utilizzo di separatori cartacei ha comportato in ogni prova un miglioramento della conduzione diminuendo di conseguenza la temperatura interna alla cella. L'utilizzo di parametri polinomiali dipendenti dallo stato di carica è stato inoltre preso in considerazione. Benché i risultati evidenzino come siano ancora presenti delle differenze tra i valori numerici e sperimentali, si può osservare come rispetto all'utilizzo di parametri indipendenti dal SoC si abbia una miglior approssimazione dei risultati sperimentali.

Per il modello meccanico per migliorare i risultati è possibile effettuare un'ulteriore investigazione sulla parte attiva essendo questa costituita da più strati di materiali diversi aventi proprietà meccaniche profondamente differenti.

Per il modello CFD un'ulteriore investigazione sulla geometria e sui materiali della cella può essere effettuata per migliorare i risultati. Un andamento più realistico della temperatura e della tensione nella fase finale della scarica può essere invece ottenuto ricercando nuovi parametri polinomiali per la resistenza come mostrato nella parte finale del capitolo 6. Una

migliore approssimazione dei risultati può essere ottenuta continuando l'investigazione sui parametri polinomiali utilizzabili per descrivere le resistenze  $R_s$ ,  $R_1$  e  $R_2$  e sulle capacità  $C_1$  e  $C_2$ . Anche la tensione del circuito aperto può essere oggetto di ricerca avendo questa notevole influenza sull'andamento della tensione al variare del tempo.





## Appendice

### Valore minimo e massimo della tensione equivalente

Tempo (s)	Valore minimo (Pa)	Valore massimo (Pa)
30	82,087	1,2594e+007
60	164,77	2,5178e+007
90	247,67	3,7767e+007
120	330,75	5,0358e+007
150	414,02	6,2953e+007
180	377,72	6,9372e+007
210	354,98	7,579e+007
240	348,41	8,2211e+007
270	358,9	8,8632e+007
300	348,07	9,5054e+007
330	322,36	1,0084e+008
360	288,92	1,0662e+008
390	262,86	1,1241e+008
420	204,25	1,182e+008
450	111,98	1,2398e+008
480	157,76	1,2904e+008
510	229,85	1,341e+008
540	310,57	1,3916e+008
570	357,14	1,4422e+008
600	393,58	1,4928e+008
630	364,72	1,5368e+008
660	315,55	1,5807e+008
690	241,3	1,6246e+008
720	159,75	1,6686e+008
750	90,424	1,7126e+008
780	75,762	1,7506e+008
810	76,183	1,7887e+008
840	91,761	1,8268e+008
870	116,49	1,8649e+008
900	140,75	1,903e+008
930	89,355	1,9362e+008
960	79,463	1,9696e+008
990	127,55	2,0028e+008
1020	194,55	2,0361e+008
1050	249,73	2,0694e+008
1080	150,93	2,0994e+008
1110	166,44	2,1295e+008
1140	277,45	2,1596e+008
1170	281,17	2,1896e+008
1200	289,64	2,2197e+008

## Valore minimo e massimo della deformazione equivalente

Tempo (s)	Valore minimo (m/m)	Valore massimo (m/m)
30	8,6188e-010	8,4907e-003
60	1,729e-009	1,697e-002
90	2,5978e-009	2,5421e-002
120	3,4679e-009	3,3819e-002
150	4,3394e-009	4,2211e-002
180	4,0574e-009	4,6924e-002
210	3,8835e-009	5,1654e-002
240	3,8356e-009	5,6385e-002
270	3,9228e-009	6,1119e-002
300	4,1396e-009	6,5865e-002
330	3,624e-009	6,9958e-002
360	3,2721e-009	7,4068e-002
390	3,1303e-009	7,8163e-002
420	3,215e-009	8,2257e-002
450	3,5093e-009	8,6346e-002
480	3,206e-009	8,9876e-002
510	3,3578e-009	9,3419e-002
540	3,9776e-009	9,6953e-002
570	4,103e-009	0,10049
600	4,3269e-009	0,10402
630	4,0439e-009	0,10707
660	3,8059e-009	0,11013
690	3,6246e-009	0,11318
720	3,5133e-009	0,11622
750	3,4831e-009	0,11926
780	3,4095e-009	0,12182
810	3,3436e-009	0,12453
840	3,2892e-009	0,12715
870	3,2485e-009	0,12977
900	3,2252e-009	0,13239
930	3,3657e-009	0,13462
960	3,3082e-009	0,13699
990	3,282e-009	0,13928
1020	3,428e-009	0,14157
1050	3,73e-009	0,14386
1080	3,378e-009	0,14587
1110	3,1017e-009	0,14802
1140	2,9167e-009	0,15008
1170	2,8489e-009	0,15215
1200	2,9411e-009	0,15422

## Valore minimo e massimo della deformazione lungo X

Tempo (s)	Valore minimo (m)	Valore massimo (m)
30	-5,0125e-006	5,1331e-006
60	-1,0173e-005	1,0393e-005
90	-1,492e-005	1,5309e-005
120	-1,8751e-005	1,9447e-005
150	-2,2214e-005	2,3275e-005
180	-2,3886e-005	2,5177e-005
210	-2,5503e-005	2,7034e-005
240	-2,707e-005	2,8852e-005
270	-2,8595e-005	3,0634e-005
300	-3,0081e-005	3,2385e-005
330	-3,1345e-005	3,3882e-005
360	-3,2595e-005	3,537e-005
390	-3,3819e-005	3,6834e-005
420	-3,5024e-005	3,8282e-005
450	-3,6211e-005	3,9713e-005
480	-3,7219e-005	4,0938e-005
510	-3,8175e-005	4,2116e-005
540	-3,917e-005	4,3329e-005
570	-4,0149e-005	4,4528e-005
600	-4,1119e-005	4,572e-005
630	-4,1984e-005	4,6773e-005
660	-4,2775e-005	4,7762e-005
690	-4,3595e-005	4,8777e-005
720	-4,4406e-005	4,9783e-005
750	-4,5211e-005	5,0784e-005
780	-4,6243e-005	5,1941e-005
810	-4,6559e-005	5,2478e-005
840	-4,728e-005	5,3365e-005
870	-4,7955e-005	5,4213e-005
900	-4,8631e-005	5,5062e-005
930	-4,95e-005	5,6046e-005
960	-4,9775e-005	5,6515e-005
990	-5,0387e-005	5,7277e-005
1020	-5,0963e-005	5,8006e-005
1050	-5,1539e-005	5,8737e-005
1080	-5,2301e-005	5,9607e-005
1110	-5,2548e-005	6,0031e-005
1140	-5,3089e-005	6,071e-005
1170	-5,3598e-005	6,1361e-005
1200	-5,4108e-005	6,2013e-005

## Valore minimo e massimo della deformazione lungo Y

Tempo (s)	Valore minimo (m)	Valore massimo (m)
30	-1,9853e-006	7,1892e-006
60	-3,8646e-006	1,4277e-005
90	-5,7393e-006	2,1327e-005
120	-7,6873e-006	2,7895e-005
150	-9,2258e-006	3,4047e-005
180	-9,888e-006	3,7241e-005
210	-1,051e-005	4,0412e-005
240	-1,1116e-005	4,3569e-005
270	-1,1707e-005	4,6711e-005
300	-1,2293e-005	4,984e-005
330	-1,2671e-005	5,255e-005
360	-1,3312e-005	5,535e-005
390	-1,3787e-005	5,8086e-005
420	-1,4273e-005	6,0821e-005
450	-1,4751e-005	6,3549e-005
480	-1,5051e-005	6,5881e-005
510	-1,5455e-005	6,8236e-005
540	-1,5859e-005	7,0597e-005
570	-1,626e-005	7,2953e-005
600	-1,6657e-005	7,5306e-005
630	-1,7017e-005	7,7352e-005
660	-1,7355e-005	7,9379e-005
690	-1,7691e-005	8,141e-005
720	-1,8025e-005	8,3438e-005
750	-1,8357e-005	8,5463e-005
780	-1,8665e-005	8,7352e-005
810	-1,8924e-005	8,8957e-005
840	-1,9222e-005	9,0717e-005
870	-1,95e-005	9,2463e-005
900	-1,9778e-005	9,4235e-005
930	-2,0209e-005	9,5846e-005
960	-2,0259e-005	9,7388e-005
990	-2,0514e-005	9,896e-005
1020	-2,0752e-005	1,0053e-004
1050	-2,099e-005	1,021e-004
1080	-2,1368e-005	1,0351e-004
1110	-2,1412e-005	1,0492e-004
1140	-2,1638e-005	1,0633e-004
1170	-2,1849e-005	1,0774e-004
1200	-2,206e-005	1,0915e-004



## Valore minimo e massimo della deformazione lungo Y

Tempo (s)	Valore minimo (m)	Valore massimo (m)
30	-8,9161e-006	9,0218e-006
60	-1,7891e-005	1,8102e-005
90	-2,6978e-005	2,7294e-005
120	-3,6528e-005	3,6946e-005
150	-4,6365e-005	4,6892e-005
180	-5,1737e-005	5,2369e-005
210	-5,7151e-005	5,788e-005
240	-6,2614e-005	6,3427e-005
270	-6,8108e-005	6,9004e-005
300	-7,3631e-005	7,461e-005
330	-7,8468e-005	7,9515e-005
360	-8,3348e-005	8,4464e-005
390	-8,8234e-005	8,9422e-005
420	-9,3141e-005	9,4407e-005
450	-9,8066e-005	9,9411e-005
480	-1,0234e-004	1,0375e-004
510	-1,0666e-004	1,0814e-004
540	-1,1096e-004	1,1252e-004
570	-1,1529e-004	1,1691e-004
600	-1,1962e-004	1,2132e-004
630	-1,2337e-004	1,2512e-004
660	-1,2716e-004	1,2897e-004
690	-1,3093e-004	1,3281e-004
720	-1,3472e-004	1,3666e-004
750	-1,3852e-004	1,4052e-004
780	-1,4163e-004	1,4368e-004
810	-1,4513e-004	1,4725e-004
840	-1,4841e-004	1,5059e-004
870	-1,5173e-004	1,5396e-004
900	-1,5505e-004	1,5734e-004
930	-1,5779e-004	1,6013e-004
960	-1,6089e-004	1,6328e-004
990	-1,6379e-004	1,6624e-004
1020	-1,6671e-004	1,6921e-004
1050	-1,6964e-004	1,722e-004
1080	-1,7215e-004	1,7475e-004
1110	-1,7498e-004	1,7762e-004
1140	-1,7762e-004	1,8032e-004
1170	-1,803e-004	1,8304e-004
1200	-1,8297e-004	1,8576e-004



## Bibliografia

- [1] G. Xia, L. Cao e G. Bi, «A review on battery thermal management in electric vehicle application,» *Journal of Power Sources*, pp. 90-105, 2017.
- [2] Q. Wang, B. Jiang, B. Li e Y. Yan, «A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64, pp. 106-128, 2016.
- [3] H. Liu, Z. Wei, Z. He e J. Zhao, «Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal,» *Energy Conversion and Management* 150, pp. 304-330, 2017.
- [4] A. Pesaran, M. Keyser, G. Kim, S. Santhanagopalan e K. Smith, «Tools for Designing Thermal Management of Batteries in Electric Drive Vehicles,» in *Large Lithium Ion Battery Technology & Application Symposia Advanced Automotive Battery Conference*, Pasadena, CA, 2013.
- [5] A. Pesaran, «Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions,» in *Advanced Automotive Battery Conference*, Las Vegas, Nevada, 2001.
- [6] ENEA. [Online]. Available: <http://www.uttei.enea.it/veicoli-a-basso-impatto-ambientale/file-veicoli-basso-impatto-ambientale/le-batterie-al-litio>.
- [7] T. Bandhauer, S. Garimella e T. Fuller, «A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries,» *Journal of The Electrochemical Society*, 158, pp. 1-25, 2011.
- [8] G. Zhang, L. G. S. Cao, C. Wang, C. Shaffer e C. Rahn, «In Situ Measurement of Radial Temperature Distributions in,» *Journal of The Electrochemical Society*, 161, pp. 1499-1507, 2014.
- [9] H. Yang, S. Amiruddin, J. Bang, Y. Sun e J. Prakash, «A Review of Li-Ion Cell Chemistries and their Potential use in Hybrid Electric Vehicles,» *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 12, n. 1, pp. 12-38, 2006.
- [10] T. Yuksel e J. Michalek, «Evaluation of the Effects of Thermal Management on Battery Life in Plug-in Hybrid Electric Vehicles,» 2012.
- [11] C. Huang, J. Sakamoto, J. Wolfenstine e S. Surampudi, «The Limits of Low-Temperature Performance of Li-Ion Cells,» *Journal of The Electrochemical Society*, 147, pp. 2893-2896, 2000.
- [12] H. Lin, D. Chua, M. Salomon, H. Shiao, M. Hendrickson, E. Plichta e S. Slane, «Low-Temperature Behavior of Li-Ion Cells,» *Electrochemical and Solid-State Letters*, 4, pp. 71-73, 2001.
- [13] S. Zhang, K. Xu e T. Jow, «The low temperature performance of Li-ion batteries,» *Journal of Power Sources* 115, pp. 137-140, 2003.

- [14] Y. Ji, Y. Zhang e C. Wang, «Li-Ion Cell Operation at Low Temperatures,» *Journal of The Electrochemical Society*, 160, pp. 636-649, 2013.
- [15] M. Doyle, «Comparison of modeling predictions with experimental data from plastic lithium ion cells,» *Journal of The Electrochemical Society*, pp. 1890-1903, 1996.
- [16] J. Jaguemont, L. Boulon e Y. Dubé, «A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures,» *Applied Energy* 164, pp. 99-114, 2016.
- [17] M. Xu, Z. Zhang, X. Wang, L. Jia e L. Yang, «A pseudo three-dimensional electrochemicaletthermal model of a prismatic LiFePO<sub>4</sub> battery during discharge process,» *Energy xxx*, pp. 1-15, 2014.
- [18] N. Damay, C. Forgez, M. Bichat e G. Friedrich, «Thermal modeling of large prismatic LiFePO<sub>4</sub>/graphite battery. Coupled thermal and heat generation models for characterization and simulation,» *Journal of Power Sources* 283, pp. 37-45, 2015.
- [19] ANSYS, «ANSYS Fluent Advanced Add-On Modules,» 2015.
- [20] D. Barnardi, E. Pawlikowski e J. Newman, «A General Energy Balance for Battery Systems,» *Journal of The Electrochemical Society*, 1985.
- [21] A. Pesaran, S. Burch e M. Keyser, «An Approach for Designing Thermal Management Systems for Electric and Hybrid Vehicle Battery Packs,» in *Fourth Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition*, London, 1999.
- [22] T. Wang, K. Tseng e J. Zhao, «Development of efficient air-cooling strategies for lithium-ion battery module based on empirical heat source model,» *Applied Thermal Engineering* 90, pp. 521-529, 2015.
- [23] Z. Rao e S. Wang, «A review of power battery thermal energy management,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, pp. 4554-4571, 2011.
- [24] G. Kim e A. Pesaran, «Battery Thermal Management System Design Modeling,» in *22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Conference and Exhibition*, Yokohama,, 2006.
- [25] Y. Chen e W. Evans, «Heat Transfer Phenomena in Lithium/Polymer-Electrolyte Batteries for Electric Vehicle Application,» *J. Electrochem. Soc.*, vol. 140, pp. 1833-1838, 1993.
- [26] Y. Huo, Z. Rao, X. Liu e J. Zhao, «Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate,» *Energy Conversion and Management* 89, pp. 387-395, 2015.
- [27] Z. Rao, S. Wang, M. Wu, Z. Lin e F. Li, «Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe,» *Energy Conversion and Management* 65, pp. 92-97, 2013.

- [28] Z. Rao, S. Wang e G. Zhang, «Simulation and experiment of thermal energy management with phase change material for ageing LiFePO<sub>4</sub> power battery,» *Energy Conversion and Management*, pp. 3408-3414, 2011.
- [29] S. Khateeb, M. Farid, J. Selman e S. Al-Hallaj, «Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change,» *Journal of Power Sources* 128, pp. 292-307, 2004.
- [30] M. Chen e G. A. Rincon-Mora, «Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance,» *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 21, 2006.
- [31] D. Shin, X. Xiao, W. Wu, X. Huang e H. Kia, «Stress Analysis of the Separator in a Lithium-Ion Battery,» *SAE International*, 2011.
- [32] D. W. Green, J. E. Winandy e D. E. Kretschmann, «Mechanical Properties of Wood,» in *Wood handbook-Wood as an engineering material*, Madison, 1999, p. 463.
- [33] SolidWorks,  
«[http://help.solidworks.com/2011/Italian/solidworks/cworks/legacyhelp/simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection\\_Topics/Convection\\_Heat\\_Coefficient.htm](http://help.solidworks.com/2011/Italian/solidworks/cworks/legacyhelp/simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm),» [Online].
- [34] E. Vergori, F. Mocera e A. Somà, «Battery Modelling and Simulation Using a Programmable Testing Equipment,» *Computers — Open Access Journal*, 2018.
- [35] A. Saltelli e I. Sobol, «Sensitivity Analysis for Importance Assessment,» vol. 22, n. 3, p. Risk Analysis, 2002.
- [36] A. Metalli, «[www.airoidimetalli.it/it/prodotti](http://www.airoidimetalli.it/it/prodotti),» [Online].