



Ricerca di Sistema elettrico

# Studio sperimentale del comportamento termico di batterie agli ioni di Litio e modellizzazione del raffreddamento con sistemi innovativi

Roberto Bubbico, Barbara Mazzarotta, Carla Menale

## STUDIO SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO TERMICO DI BATTERIE AGLI IONI DI LITIO E MODELLIZZAZIONE DEL RAFFREDDAMENTO CON SISTEMI INNOVATIVI

Roberto Bubbico, Barbara Mazzarotta, Carla Menale (Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente)

Settembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

Progetto: Sistemi di accumulo di energia per il sistema elettrico

Obiettivo: Studio dei fenomeni di invecchiamento, sicurezza e second life - Analisi termica dei sistemi di accumulo

Responsabile del Progetto: Pier Paolo Prosini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Estensione e validazione del modello per l'analisi termica di batterie agli ioni litio"

Responsabile scientifico ENEA: Francesco D'Annibale

Responsabile scientifico "Sapienza": Roberto Bubbico

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 ESTENSIONE DEL MODELLO A BATTERIE DI GEOMETRIA CILINDRICA.....	5
2.1.1 <i>Comparazione dell'efficienza di rimozione del calore utilizzando l'aria come refrigerante, al variare della distanza tra le celle e a parità di potenza di pompaggio.</i> .....	9
2.1.2 <i>Comparazione dell'efficienza di rimozione del calore tra diversi fluidi refrigeranti, a parità di potenza di pompaggio.</i> .....	11
2.2 ESTENSIONE DEL MODELLO A BATTERIE DI GEOMETRIA PRISMATICA .....	16
2.3 STUDIO DEI SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO A TRANSIZIONE DI FASE .....	18
2.4 PROVE SPERIMENTALI FINALIZZATE ALL'OTTIMIZZAZIONE DEL MODELLO.....	24
3 CONCLUSIONI.....	27
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	28
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	29
6 APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO .....	30

## Sommario

L'attività in oggetto è finalizzata ad estendere le conoscenze e gli strumenti di calcolo, derivanti dal precedente accordo di collaborazione tra ENEA e "Sapienza", riguardanti la valutazione dell'efficienza dei sistemi di scambio termico nell'asportazione del calore dalle celle agli ioni di Litio. Il modello di calcolo, sviluppato nella precedente annualità per simulare il comportamento di celle a bustina ("pouch"), è stato esteso implementando modifiche che hanno permesso di simulare anche il comportamento termico di celle con geometria cilindrica o prismatica. Ciò ha consentito di predire l'andamento nel tempo delle temperature delle batterie per queste geometrie ed eseguire un primo confronto dell'efficacia dei diversi metodi di raffreddamento, al fine di ridurre la fase sperimentale solo a quelli con migliori prestazioni. E' stata, inoltre, studiata la potenzialità dei sistemi di raffreddamento a transizione di fase.

Sono stati eseguiti alcuni test con carica e scarica di batterie Li-Ione reali, per disporre di dati sperimentali del loro comportamento termico, più accurati possibile, al fine di ottimizzare il modello numerico.

I risultati ottenuti dalle simulazioni mostrano che il Galden HT135 (un fluorurato utilizzato per varie applicazioni hi-tech nel mercato dell'elettronica e dei dispositivi elettrici) ha un'ottima capacità di rimozione del calore anche in condizioni di funzionamento piuttosto gravose. A parità di potenza di pompaggio, questo fluido si è dimostrato, difatti, nettamente più efficace rispetto all'aria, ma anche rispetto agli oli dielettrici.

I materiali a cambiamento di fase, invece, non hanno dato le risposte sperate: pur supponendo di aumentare di circa 45 volte la conducibilità termica dei PCM (Phase Change Materials) selezionati, la riduzione massima di temperatura che si riesce ad ottenere è di pochi gradi.

## 1 Introduzione

Nel presente documento sono descritte le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Estensione e validazione del modello per l'analisi termica di batterie agli ioni di litio" tra ENEA e il dipartimento DICMA di "Sapienza" Università di Roma, nell'ambito del Progetto C.5 "Sistemi di accumulo di energia per il sistema elettrico".

Il crescente aumento di impianti di generazione elettrica da Fonti Rinnovabili Non Programmabili (FRNP) ha determinato in questi anni un impatto sempre più tangibile sui processi del Dispacciamento dell'energia elettrica. Al fine di favorire il massimo sfruttamento della generazione da fonti rinnovabili, nei sistemi di storage vengono utilizzate batterie agli ioni di litio, caratterizzate da elevate densità di energia e rapidi tempi di risposta. Una delle problematiche principali legata all'utilizzo di questa innovativa tecnologia, è la generazione di calore durante il funzionamento che, se non adeguatamente rimosso, può portare a problematiche di sicurezza (fenomeno del thermal runaway), soprattutto in impianti di grande potenza. Al fine di rimuovere il calore in eccesso è necessario utilizzare sistemi di raffreddamento altamente performanti, anche per ridurre il consumo dell'energia di pompaggio dei fluidi refrigeranti. Sono stati, quindi, studiati sistemi di smaltimento del calore, in moduli batteria costituiti da celle di geometria cilindrica o prismatica, con lo scopo di individuare i fluidi più efficaci nelle condizioni di funzionamento più gravose. Sono stati messi a confronto diversi liquidi dielettrici nelle medesime condizioni operative e sono state, inoltre, studiate le performance di due differenti materiali a cambiamento di fase, che sfruttano il passaggio di stato per rimuovere il calore in eccesso.

Parallelamente sono stati eseguiti dei test sperimentali monitorando con termocoppie K e con una termocamera ad infrarossi, la temperatura all'interno di un modulo batteria costituito da quattro celle pouch della EiG al fine di ottenere dati per poter ottimizzare il modello.

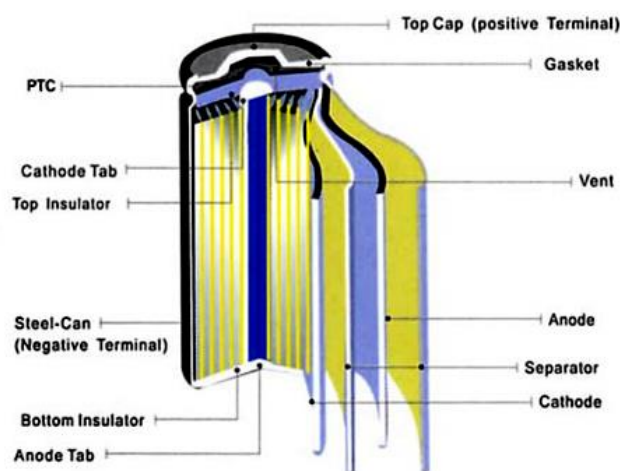
## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Estensione del modello a batterie di geometria cilindrica

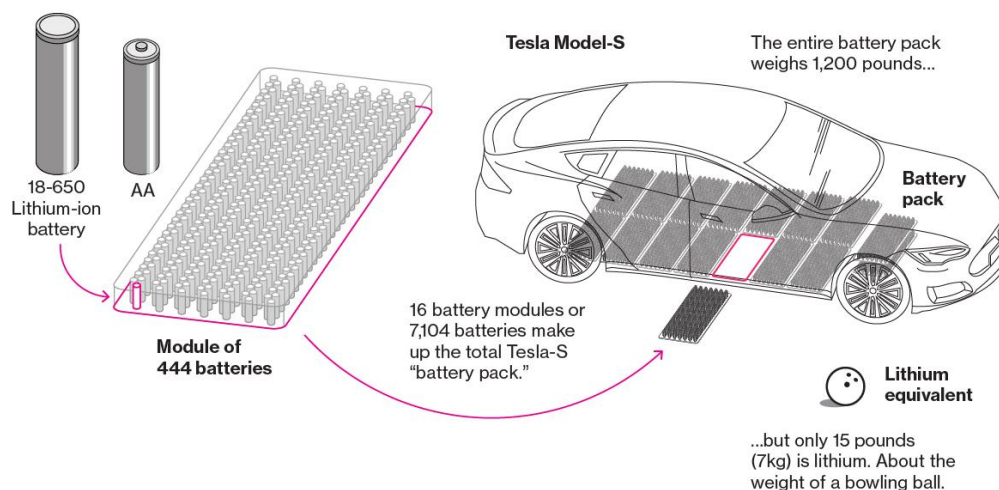
Il modello di calcolo, sviluppato nella precedente annualità per simulare il comportamento di celle a bustina, è stato esteso implementando modifiche che hanno permesso di simulare anche il comportamento termico di celle con geometria cilindrica.

Attualmente celle di geometria cilindrica (la struttura tipica è mostrata in Figura 1) sono utilizzate all'interno di pacchi batteria per veicoli elettrici, i quali sono generalmente disposti sul fondo del veicolo, come mostrato in Figura 2.

Come riferimento per la modellizzazione è stata presa una cella cilindrica 18650 della Sony con chimica catodica NMC. Le specifiche tecniche sono riportate in Tabella 1 e le dimensioni in Figura 3.



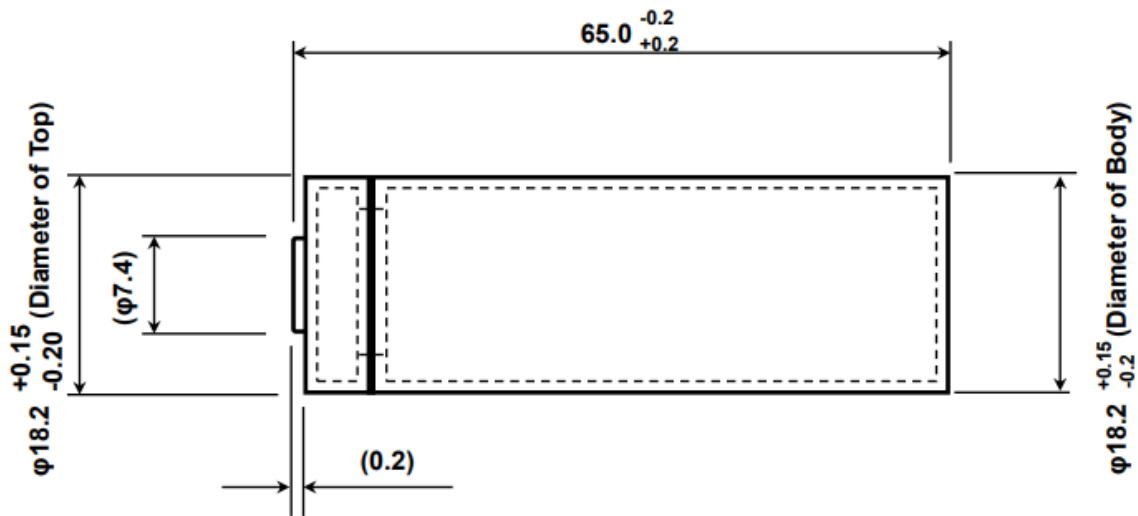
**Figura 1** Struttura di una batteria cilindrica agli ioni di Litio



**Figura 2** Disposizione del pacco batteria all'interno di un veicolo della Tesla

**Tabella 1 Specifiche di una batteria agli ioni di Litio 18650 della Sony**

Capacità Nominale	2500 mAh
Vtaggio Nominale	3.6 V
Vtaggio minimo	2.5 V
Vtaggio massimo	4.20 +/- 0.05 V
Carica Standard	1.25 A
Corrente di scarica continua massima	20 A
Impedenza interna	13 mΩ
Lunghezza della cella	65.20 mm
Diametro della cella	18.35 mm
Peso	44.30 g



**Figura 3 Dimensioni di una batteria agli ioni di Litio della Sony**

Il bilancio di energia per una batteria raffreddata con fluidi dielettrici [1] è mostrato nell’equazione di seguito riportata:

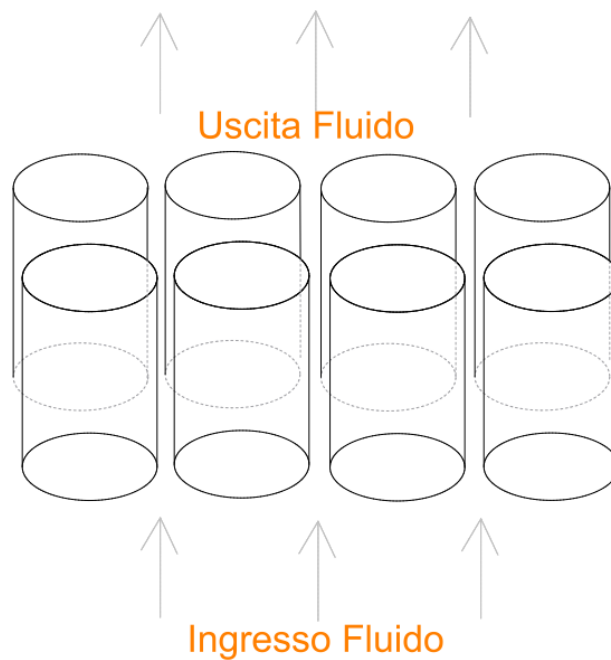
$$MC_p \frac{dT}{dt} + hS(T - T_a) + \varepsilon S\sigma(T^4 - T_a^4) - \dot{Q} = 0 \tag{1}$$

Si suppone che l’aria passi dal basso verso l’alto, dopo essere stata incanalata in una sezione sottostante le celle (Figura 4 e Figura 5). L’aria fredda attraversa le celle in altezza e fuoriesce da un canale disposto nella parte alta.

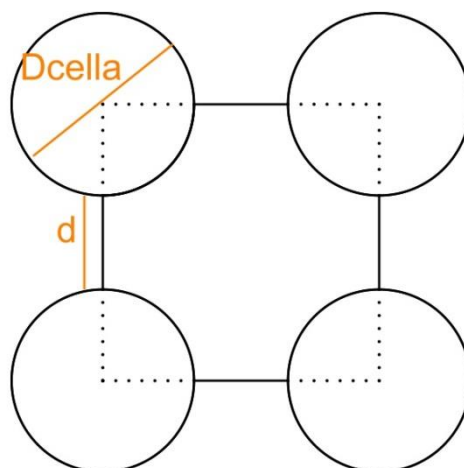
Si può, quindi, assumere un diametro equivalente della sezione di passaggio del fluido (vedi Figura 4) sia pari a:

$$D_{eq} = \frac{4 * ((d + D)^2 - \pi D^2 / 4)}{\pi D + 4d} \tag{2}$$

dove D è il diametro della batteria cilindrica e d è la distanza tra le celle. Il diametro equivalente è calcolato considerando l’area di passaggio dell’aria che fluisce dal basso verso l’alto.



**Figura 4 Direzione del fluido di raffreddamento**



**Figura 5 Sezione di passaggio del fluido**

Nell'articolo di Brand et al. [2] sono riportate le resistenze ohmiche interne di celle 18650 per diverse chimiche catodiche (vedi Tabella 2). Le resistenze  $R_{i\Omega}$  sono misurate con la tecnica EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy), testando 15 celle per ciascuna tipologia di chimica.

Il produttore della cella della Sony fornisce un valore di resistenza pari a 13 mOhm, come riportato in Tabella 1, che risulta, quindi, in pieno accordo con i valori riportati in letteratura per la chimica catodica NMC.

**Tabella 2 Caratteristiche elettriche delle celle studiate**

	Type	CN	UN	$R_{i,\Omega}$
1	LFP/C	1.1 Ah	3.2 V	17 mΩ
2	LFP/C	1.05 Ah	3.2 V	11 mΩ
3	NMC/C	1.5 Ah	3.65 V	12 mΩ
4	NCA/C	1.5 Ah	3.6 V	24 mΩ

Il calore specifico per celle 18650 con chimica catodica  $\text{Li}(\text{Ni}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33})\text{O}_2$  risulta essere pari a circa  $0.95 \text{ J/g K}$  a  $60^\circ\text{C}$  e  $\text{SOC}\%= 100$  [3].

Si considera che le celle siano distanziate l’una dall’altra  $1 \text{ mm}$  (ossia  $d = 1\text{mm}$ ) nel pacco batterie. In Figura 6 è riportato l’andamento della temperatura raggiunta dalle celle per scariche d’intensità variabile, che vanno da  $2.5$  a  $20 \text{ A}$  con aria in convezione naturale. Da Figura 6 si evince che fino ad una corrente di scarica di  $10 \text{ A}$  (ossia una scarica  $4\text{C}$ ) la temperatura si mantiene al di sotto dei  $50^\circ\text{C}$  per l’intera durata della fase, per scariche più intense la convezione naturale non è sufficiente a lavorare nel “safety range”. Con la corrente di scarica continua massima definita dal produttore (Tabella 1) si raggiungono al termine della fase gli  $80^\circ\text{C}$ .

Si è proceduto a studiare la variazione di temperatura nel pacco batteria aumentando la velocità dell’aria durante le condizioni di lavoro più onerose.

In Figura 7 si riporta l’andamento delle temperature delle celle sottoposte a scariche continue con una corrente di  $20 \text{ A}$ , e raffreddate con aria a velocità variabile in un range che va da  $1$  a  $150 \text{ m/s}$ . Per mantenere la temperatura della cella al di sotto del limite di sicurezza di  $50^\circ\text{C}$  sarebbe necessario utilizzare aria ad una velocità di  $150 \text{ m/s}$ , partendo da una temperatura ambiente di  $20^\circ\text{C}$ . Raffreddare un pacco batteria con un flusso tanto elevato è impensabile: è, quindi, esclusa la possibilità di utilizzare l’aria nelle suddette condizioni di lavoro come fluido refrigerante.

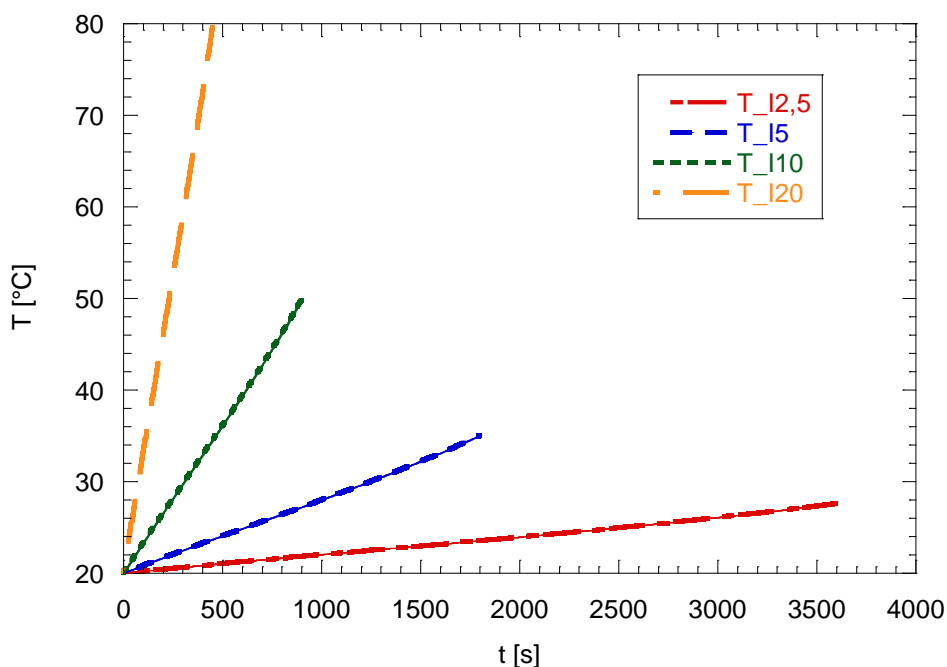
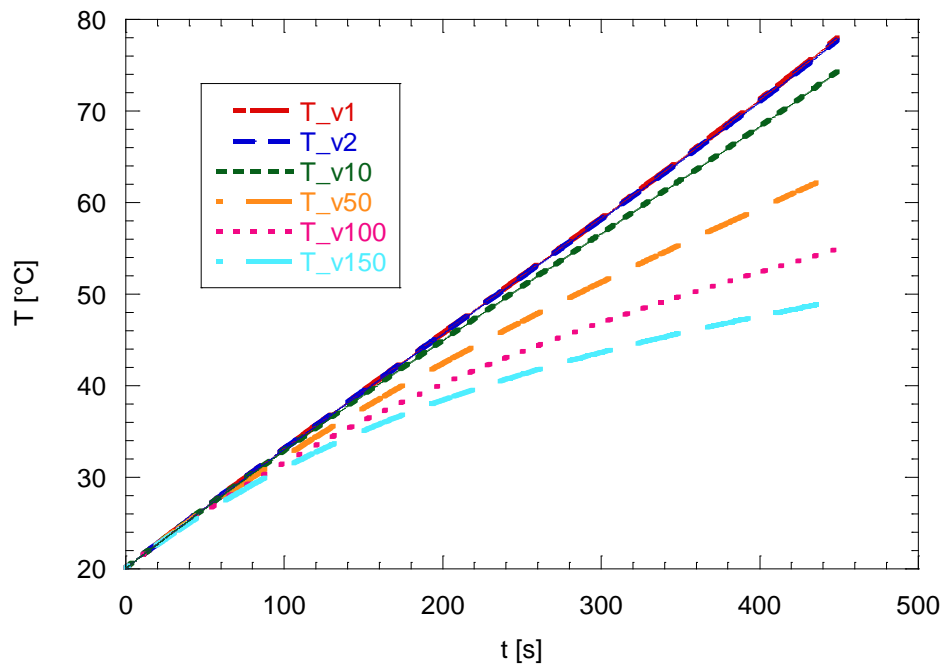


Figura 6 Confronto tra l’andamento della temperatura di batterie cilindriche sottoposte a scariche d’intensità variabile in regime di convezione naturale,  $T_a=20^\circ\text{C}$





**Figura 7 Confronto tra l'andamento della temperatura di batterie cilindriche sottoposte ad una corrente di scarica continua pari a 20 A e raffreddate con aria,  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $d=1\text{mm}$**

Si può, inoltre, dedurre che per batterie di questo tipo una distanza di 1 mm non è sufficiente a garantire un adeguato smaltimento di calore per le scariche/cariche d'intensità maggiore.

### 2.1.1 Comparazione dell'efficienza di rimozione del calore utilizzando l'aria come refrigerante, al variare della distanza tra le celle e a parità di potenza di pompaggio.

Si è effettuata una valutazione dell'influenza che ha la distanza tra le celle sull'efficacia di asportazione del calore a parità di potenza di pompaggio, ossia a parità di dispendio energetico in fase operativa.

La potenza di pompaggio è data da:

$$W_p = \Delta P * A * v \quad (3)$$

dove:

$\Delta P$  sono le perdite di carico  $\rightarrow \Delta P = f \frac{L \rho v^2}{D}$ , in cui  $f$  è il fattore di Darcy

$A$  è l'area di passaggio del fluido

$v$  è la velocità del fluido.

Le potenze di pompaggio dell'aria al variare dell'area di passaggio devono, quindi, essere equiparate:

$$W_{p-1} = W_{p-2}$$

$$\Delta P_1 * A_1 * v_1 = \Delta P_2 * A_2 * v_2$$

Nelle condizioni in cui **si ha moto laminare** il numero di Darcy è dato da  $f_{1/2} = 64/Re$ ; si ottiene, quindi:

$$f_1 \frac{L}{D_{eq1}} \frac{\rho_{aria} v_1^3}{2} \left[ (d_1 + D)^2 - \frac{\pi D^2}{4} \right] = f_2 \frac{L}{D_{eq2}} \frac{\rho_{aria} v_2^3}{2} \left[ (d_2 + D)^2 - \frac{\pi D^2}{4} \right]$$

Sostituendo la formula del Diametro equivalente (equazione ( 2 )) si ha:

$$\frac{f_1(\pi D + 4d_1)}{4} v_1^3 = \frac{f_2(\pi D + 4d_2)}{4} v_2^3$$

La correlazione tra le due velocità dell'aria al variare della distanza tra le celle risulta, infine, pari a:

$$v_2 = v_1 \cdot \sqrt{\frac{(\pi D + 4d_1)^2}{[4(d_1 + D)^2 - \pi D^2]} * \frac{[4(d_2 + D)^2 - \pi D^2]}{(\pi D + 4d_2)^2}} \quad (4)$$

Nelle condizioni, invece, in cui **si ha moto turbolento** il numero di Darcy è:  $f_{1/2} = 0.079 * 4 / Re^{0.25}$  e si ottiene:

$$v_2 = v_1 \frac{[4(d_2 + D)^2 - \pi D^2]^{1/4} (\pi D + 4d_1)^{5/4}}{[4(d_1 + D)^2 - \pi D^2]^{1/4} (\pi D + 4d_2)^{5/4}} \quad (5)$$

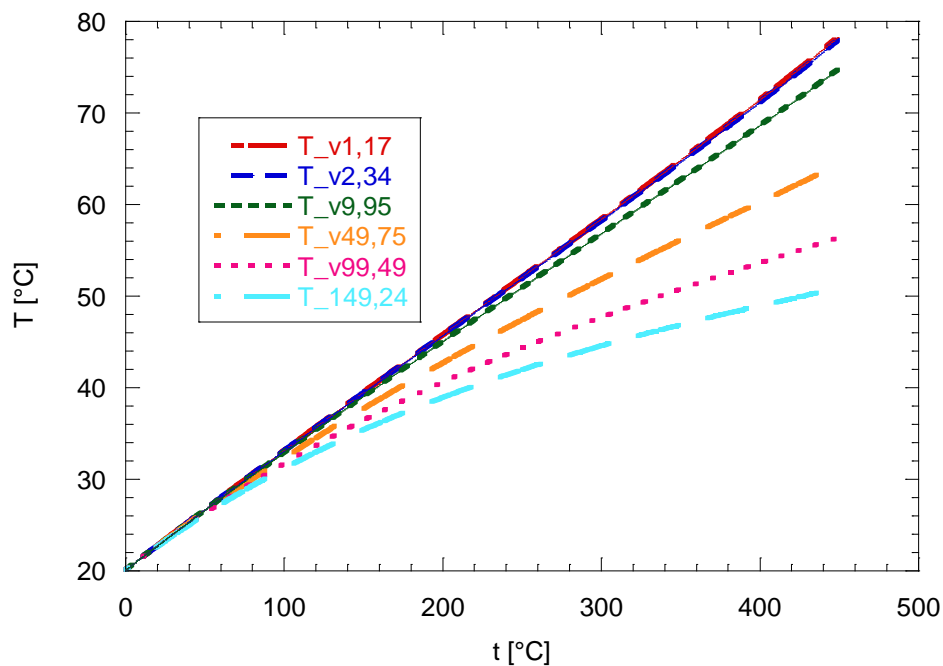
In cui  $v_1$  è la velocità dell'aria per una distanza tra le celle pari a  $d_1$  e  $v_2$  è la velocità dell'aria per una distanza pari a  $d_2$ .

Sono state ricavate le velocità dell'aria aumentando la distanza tra le celle da 1 mm a 3 mm, considerando la medesima potenza di pompaggio e quindi i medesimi consumi energetici per la movimentazione del fluido nei canali di passaggio: i risultati sono riportati in Tabella 3.

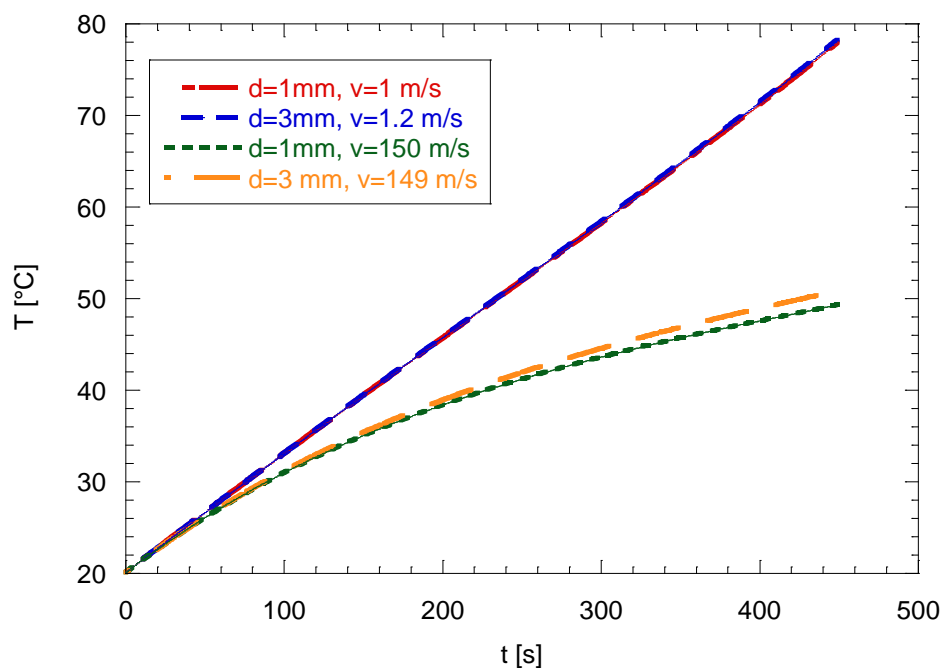
**Tabella 3 velocità dell'aria al variare della distanza tra le celle a parità di potenza di pompaggio**

Potenza di pompaggio (W)	V <sub>aria</sub> (m/s), d=1 mm	V <sub>aria</sub> (m/s), d=3 mm	Re, d=1 mm	Re, d=3 mm
8,20E-05	1	1.17	4,66E+02	8,38E+02
3,28E-04	2	2.34	9,32E+02	1,68E+03
0,023	10	9,95	4,660E+03	5,44E+03
1,91	50	49,75	2,330E+04	2,72E+04
12,84	100	99,49	4,66E+04	5,44E+04
39,16	150	149,24	6,99E+04	8,16E+04

In Figura 8 è riportato l'andamento della temperatura superficiale delle celle cilindriche 18650 distanziate tra loro 3 mm per diverse velocità dell'aria, che vanno da 1,17 a 149,24 m/s, calcolate a parità di potenza di pompaggio, come riportato in Tabella 3. L'andamento della temperatura delle celle è molto simile a quello ottenuto con una distanza di 1 mm tra le batterie, a parità di potenza di pompaggio. In Figura 9 è riportato il confronto tra l'andamento della temperatura superficiale delle celle cilindriche 18650 distanziate tra loro 3 mm ed 1 mm per due diverse velocità dell'aria corrispondenti rispettivamente alla minima e alla massima potenza di pompaggio (vedi Tabella 3). L'andamento della temperatura delle celle è molto simile: l'aumento della distanza tra le celle non comporta un incremento dello scambio termico significativo. Per una potenza di pompaggio di circa 39 W passando da una distanza di 1 mm ad una distanza di 3 mm tra le celle si riesce a ridurre la temperatura di solo 1°C circa a fine scarica. Considerando che la compattezza dei moduli batteria ha un'importanza notevole, è auspicabile ridurre il più possibile le distanze tra le celle e quindi, a valle delle considerazioni precedenti, la distanza di 1 mm è quella considerata ottimale.



**Figura 8** Confronto tra l'andamento della temperatura di batterie cilindriche sottoposte ad una corrente di scarica continua pari a 20 A e raffreddate con aria,  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $d=3\text{mm}$



**Figura 9** Confronto tra l'andamento della temperatura di batterie cilindriche sottoposte ad una corrente di scarica continua pari a 20 A e raffreddate con aria,  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $d=3\text{mm}$

### 2.1.2 Comparazione dell'efficienza di rimozione del calore tra diversi fluidi refrigeranti, a parità di potenza di pompaggio.

Sono state ricavate le correlazioni per il calcolo delle velocità di diversi fluidi refrigeranti a parità di potenza di pompaggio ( $W_{p\_fluido1} = W_{p\_fluido2}$ ).

Nelle condizioni in cui **entrambi i fluidi sono in moto laminare** il numero di Darcy è dato da:

$$f_{fluido1/fluido2} = 64/Re$$

si ottiene, quindi:

$$f_{fluido1} * \rho_{fluido1} * v_{fluido1}^3 = f_{fluido2} * A_{fluido2} * v_{fluido2}^3$$

$$\frac{64 \mu_{fluido1}}{\rho_{fluido1} v_{fluido1} D_{eq}} \rho_{fluido1} v_{fluido1}^3 = \frac{64 \mu_{fluido2}}{\rho_{fluido2} v_{fluido2} D_{eq}} \rho_{fluido2} v_{fluido2}^3$$

$$v_{fluido2} = v_{fluido1} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{fluido1}}{\mu_{fluido2}}} \quad (6)$$

Nelle condizioni, invece, in cui **un fluido è in moto laminare e l'altro in moto turbolento** il numero di Darcy è paria a:

$$f_{fluido1} = 64/Re \text{ e } f_{fluido2} = 0.079 * 4/Re^{0.25}$$

si ottiene quindi:

$$\frac{64 \mu_{fluido2}}{\rho_{fluido2} v_{fluido2} D_{eq}} \rho_{fluido2} v_{fluido2}^3 = \frac{0.079 * 4}{\rho_{fluido1}^{1/4} v_{fluido1}^{1/4} D_{eq}^{1/4}} \mu_{fluido1}^{1/4} \rho_{fluido1} v_{fluido1}^3$$

$$v_{fluido2} = \sqrt{\frac{0.079 * 4}{64} * \frac{\mu_{fluido1}^{1/4} \cdot \rho_{fluido1}^{3/4} \cdot v_{fluido1}^{11/4}}{\mu_{fluido2}} D_{eq}^{3/4}} \quad (7)$$

In ultimo, nelle condizioni in cui **entrambi i fluidi sono in moto turbolento e/o di transizione** il numero di Darcy è dato da:

$$f_{fluido2} = f_{fluido1} = 0.079 * 4/Re^{0.25}$$

si ottiene quindi:

$$\frac{0.079 * 4}{\rho_{fluido2}^{1/4} v_{fluido2}^{1/4} D_{eq}^{1/4}} \mu_{fluido2}^{1/4} \rho_{fluido2} v_{fluido2}^3 = \frac{0.079 * 4}{\rho_{fluido1}^{1/4} v_{fluido1}^{1/4} D_{eq}^{1/4}} \mu_{fluido1}^{1/4} \rho_{fluido1} v_{fluido1}^3$$

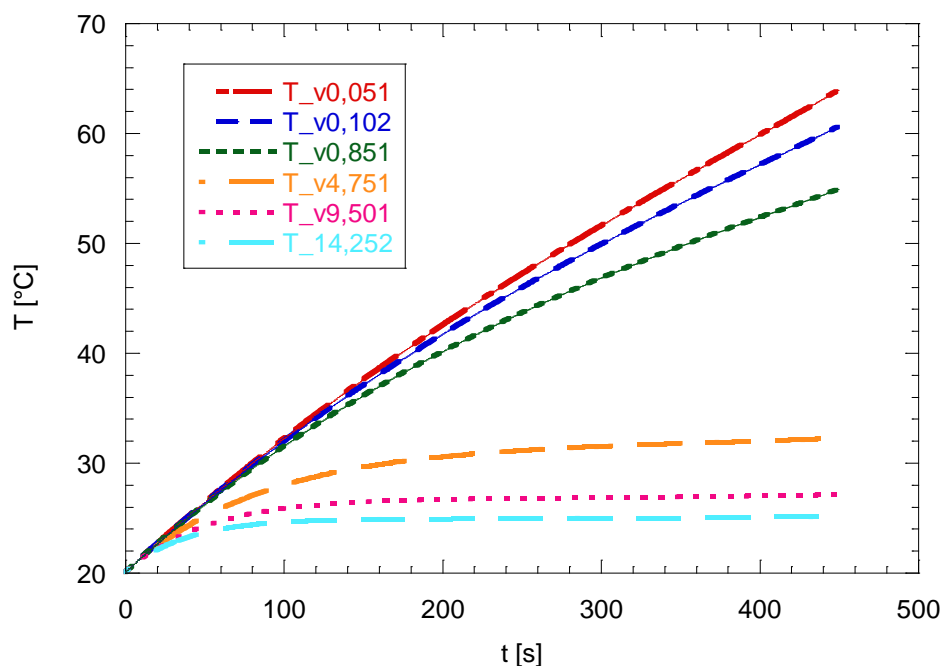
$$v_{fluido2} = v_{fluido1} \cdot \left(\frac{\mu_{fluido1}}{\mu_{fluido2}}\right)^{1/11} \left(\frac{\rho_{fluido1}}{\rho_{fluido2}}\right)^{3/11} \quad (8)$$

Sono stati studiati gli andamenti della temperatura delle celle cilindriche 18650, sottoposte ad una scarica con corrente pari a 20 A, raffreddate con **olio MidelICE** [1].

Sono state calcolate le velocità dell'olio per potenze di pompaggio pari a quelle utilizzate per raffreddare il pacco batteria con l'aria (Tabella 4).

**Tabella 4 velocità dell'olio a parità di potenza di pompaggio dell'aria**

Potenza di pompaggio (W)	V <sub>aria</sub> (m/s)	V <sub>olio</sub> (m/s)	Re <sub>aria</sub>	Re <sub>olio</sub>	Regimi aria/olio
8,20E-05	1	0.051	466	47,5	lamin/lamin
3,28E-04	2	0.102	932	95,1	lamin/lamin
0,023	10	0.851	4660	793	turbol/lamin
1,91	50	4.751	23300	4430	turbol/trans
12,84	100	9.501	46600	8861	turbol/trans
39,16	150	14.252	69900	13291	turbol/turbol



**Figura 10 Andamento della temperatura di batterie cilindriche sottoposte ad una corrente di scarica continua pari a 20 A e raffreddate con olio MidelICE a velocità che vanno da circa 0 a 14 m/s, T<sub>a</sub>=20°C**

Utilizzando l'olio, con potenze di pompaggio dell'ordine di 2 W si riesce a mantenere la temperatura delle batterie cilindriche al di sotto dei 35°C (vedi Figura 10 Andamento della temperatura di batterie cilindriche sottoposte ad una corrente di scarica continua pari a 20 A e raffreddate con olio MidelICE a velocità che vanno da circa 0 a 14 m/s, T<sub>a</sub>=20°C Figura 10). Con l'aria sono, invece, necessarie potenze di pompaggio di circa 40 W per non superare la temperatura limite di 50°C (vedi Figura 7). L'olio come fluido refrigerante si è rivelato, quindi, molto più efficace nel rimuovere il calore prodotto in eccesso rispetto all'aria.

E' stata anche valutata la capacità di rimozione del calore in eccesso del **Novec 1230** [4], (dodecafluoro-2-methylpentan-3-one, Tabella 5), prodotto dalla 3 M. Il Novec 1230 è un idrocarburo alogenato di nuova generazione utilizzato come mezzo estinguente: è liquido a temperatura ambiente e presenta una temperatura di ebollizione pari a 49.2°C. Si considera la conducibilità termica del NOVEC 1230 pari a quella del NOVEC 7000 per mancanza di dati in letteratura.

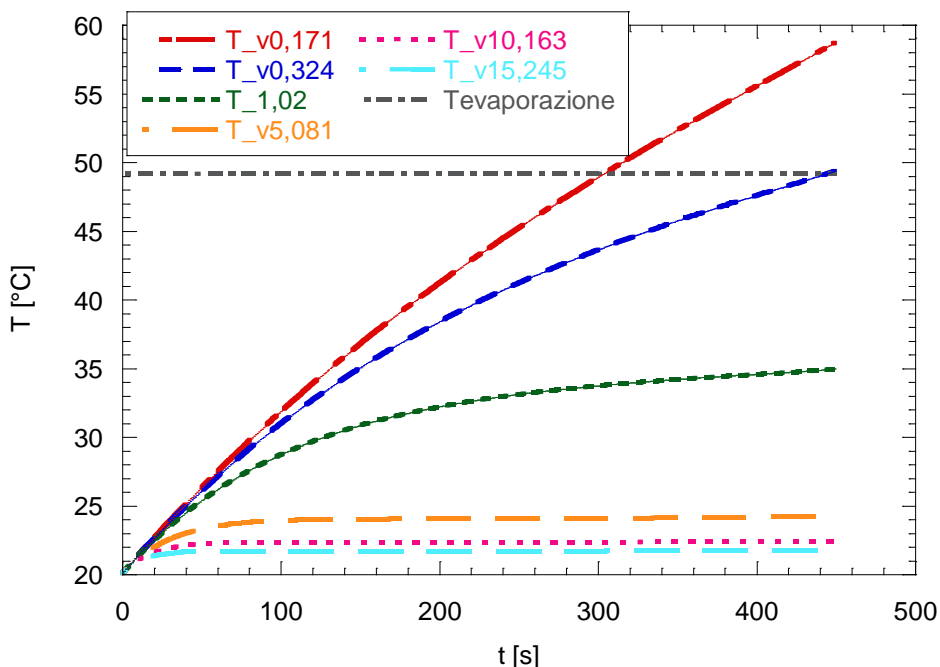
**Tabella 5 Proprietà del NOVEC 1230**

Cp (J/kg K)	K (W/m K)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	μ (kg/m s)
1103.00	7.500E-2	1600.00	6.240E-4

Anche in questo caso sono stati studiati gli andamenti della temperatura delle celle cilindriche 18650, sottoposte ad una scarica con corrente continua pari a 20 A, raffreddate con il Novec pompato nei canali di passaggio a velocità calcolate a potenze equivalenti a quelle utilizzate per raffreddare il pacco batteria con l'aria (vedi Tabella 6).

**Tabella 6 velocità del NOVEC 1230 a parità di potenza di pompaggio dell'aria**

Potenza di pompaggio (W)	di	V <sub>aria</sub> (m/s)	V <sub>novec</sub> (m/s)	Re <sub>aria</sub>	Re <sub>novec</sub>	Regimi aria/olio
8,20E-05		1	0.171	466	3120	lamin/turbol
3,28E-04		2	0.342	932	6250	lamin/turbol
0,023		10	1.02	4660	18593	turbol/turbol
1,91		50	5.081	23300	92964	turbol/turbol
12,84		100	10.163	46600	185928	turbol/turbol
39,16		150	15.245	69900	278892	turbol/turbol



**Figura 11 Andamento della temperatura di batterie cilindriche sottoposte ad una corrente di scarica continua pari a 20 A e raffreddate con il fluido NOVEC1230 a velocità che vanno da circa 0.2 a 15.3 m/s, Ta=20°C**

In Figura 11 sono mostrati gli andamenti della temperatura delle celle, utilizzando il Novec 1230 come refrigerante a potenze di pompaggio equivalenti a quelle dell'aria (Tabella 6). Per basse potenze di pompaggio (< 0,0004 W) il Novec 1230 non è utilizzabile come fluido di raffreddamento monofase perché raggiunge temperature superiori ai 49.2°C, ossia la temperatura di evaporazione alla pressione atmosferica. Aumentando, però, la potenza di pompaggio (ossia per valori superiori a 0,023 W) la temperatura rimane al di sotto dei 35°C e quindi il fluido può essere utilizzato come refrigerante, partendo da una temperatura ambiente inferiore o uguale a 20°C. Al contrario per una potenza di pompaggio pari a 0,023 W la temperatura della batteria supera i 75°C con l'aria (Figura 7) e i 50°C con l'olio (Figura 10).

Un altro fluido con proprietà termiche interessanti è il Galden HT135, un fluorurato utilizzato per varie applicazioni hi-tech nel mercato dell'elettronica e dei dispositivi elettrici (Tabella 7).

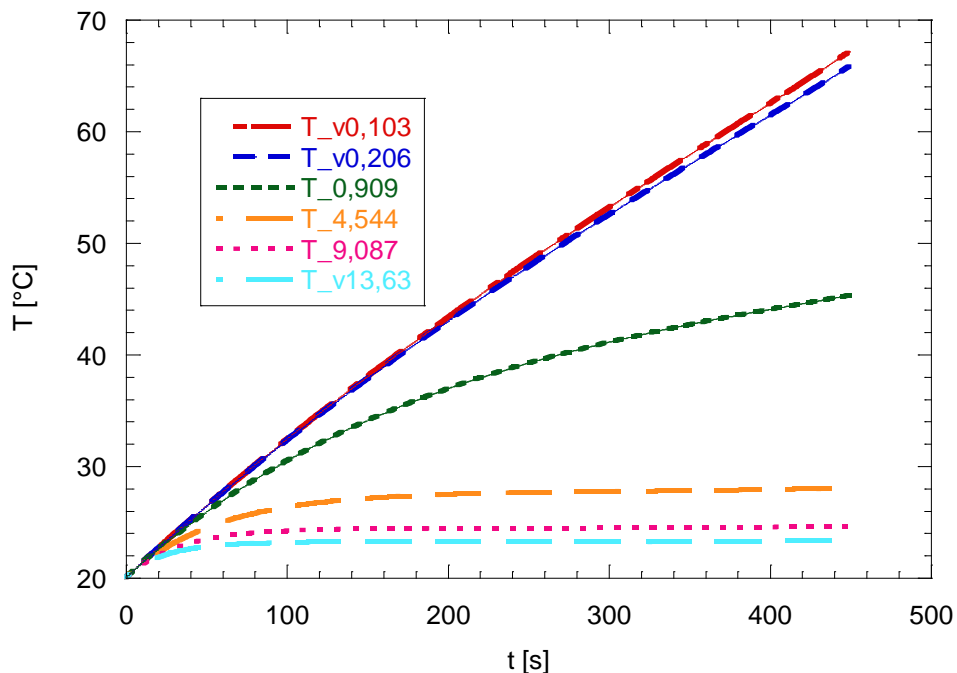
**Tabella 7 Proprietà del Galden HT135**

Cp (J/kg K)	K (W/m K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (kg/m s)
962.68	0.065	1720.00	0.00172

Come nei casi precedenti sono stati studiati gli andamenti della temperatura delle celle, utilizzando il Galden come refrigerante a potenze di pompaggio equivalenti a quelle dell'aria: i valori della velocità del fluido nei canali di passaggio sono riportati in Tabella 8.

**Tabella 8 velocità del Galden HT135 a parità di potenza di pompaggio dell'aria**

Potenza di pompaggio (W)	di	V <sub>aria</sub> (m/s)	V <sub>HT135</sub> (m/s)	Re <sub>aria</sub>	Re <sub>HT135</sub>	Regimi aria/olio
8,20E-05	1	1	0.103	466	734	lamin/turbol
3,28E-04	2	2	0.206	932	1339	lamin/turbol
0,023	10	10	0.908725891	4660	6483.5378	turbol/turbol
1,91	50	50	4.543629455	23300	32417.68922	turbol/turbol
12,84	100	100	9.087259	46600	64835.378	turbol/turbol
39,16	150	150	13.63089	69900	97253.068	turbol/turbol



**Figura 12 Andamento della temperatura di batterie cilindriche sottoposte ad una corrente di scarica continua pari a 20 A e raffreddate con il fluido GaldenHT135 a velocità che vanno da circa 0.1 a 13.6 m/s, T<sub>a</sub>=20°C**

Come è evidente in Figura 12 il Galden HT135, mostra un'ottima capacità di rimozione del calore anche in condizioni di funzionamento delle batterie piuttosto gravose (corrente di scarica pari a 20 A).

A parità di potenza di pompaggio, questo fluido si è dimostrato, difatti, nettamente più efficace rispetto all'aria, ma anche rispetto agli oli dielettrici. Per una potenza di pompaggio di circa 0,023 W il Galden consente alla batteria di rimanere ben al di sotto delle condizioni di sicurezza imposte dal costruttore (50°C): si raggiunge una temperatura massima a fine scarica di circa 45°C. Anche il Novec 1230 a parità di potenza di pompaggio consente di lavorare nel "safety range", ma sono notevoli le problematiche connesse con l'utilizzo di un refrigerante con bassa temperatura di ebollizione: per questo motivo il Galden HT135 si è dimostrato il fluido più adatto al raffreddamento del pacco batteria.

## 2.2 Estensione del modello a batterie di geometria prismatica

Il modello ha consentito, inoltre, di studiare lo smaltimento del calore prodotto durante il funzionamento di celle prismatiche. Come riferimento è stata presa una cella della HiPower (Figura 13) con chimica catodica LFP (litio-ferro-fosfato,  $\text{LiFePO}_4$ ). Le specifiche tecniche sono riportate in Tabella 9.

Nell'articolo di Viswanathan et al. [5] si trova un'analisi accurata del calore generato durante le fasi di carica/scarica per diverse chimiche catodiche. E' possibile dedurre, dai risultati riportati nel lavoro sopracitato, che celle con chimiche catodiche NMC e LFP hanno andamenti del  $\frac{dE_0}{dt}$  equivalenti: si farà, quindi, riferimento in questo report ai dati estrapolati da letteratura, e relativi a celle con chimica catodica NMC [1]. E' stato studiato l'andamento nel tempo della temperatura di celle prismatiche in un pacco batteria: si è ipotizzata una distanza tra le celle di 3 mm. Sono stati analizzati i risultati ottenuti utilizzando come fluidi refrigeranti aria ed olio dielettrico (in particolare il Midel ICE) a parità di potenza di pompaggio. Le velocità dell'aria e dell'olio sono riportate in Tabella 10, gli andamenti di temperatura sono riportati, invece, rispettivamente per l'aria in Figura 14 e per l'olio in Figura 15.



Figura 13 Batteria prismatica dell'HP, pacco batteria composto da 12 celle dell'HP [6]

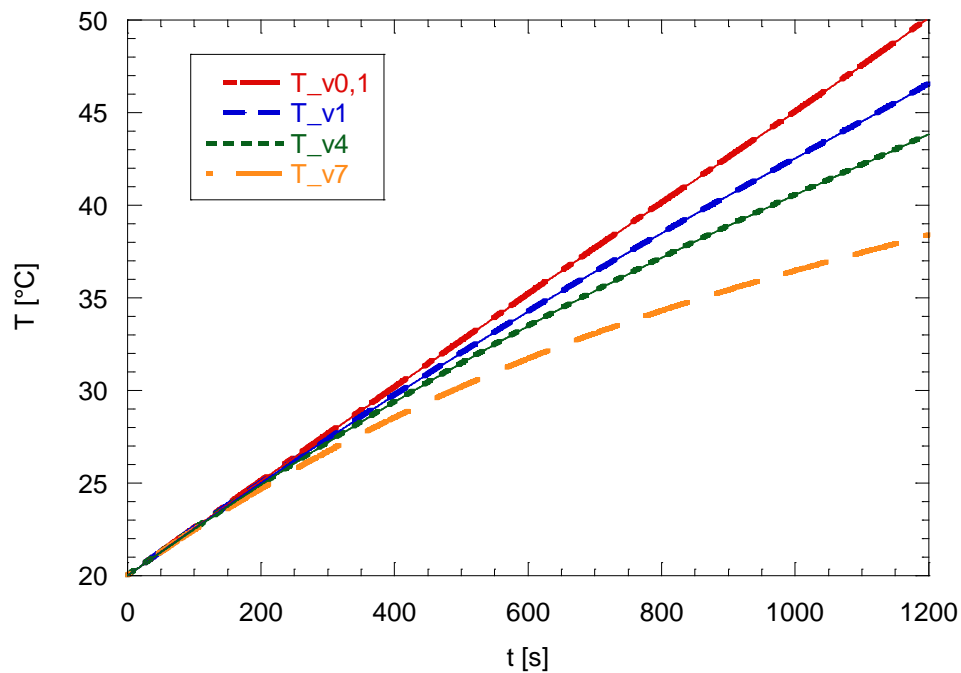
Tabella 9 Specifiche di una batteria agli ioni di Litio prismatica della HiPower [7]

Capacità Nominale	100 Ah
Voltaggio Nominale	3.2 V
Scarica Standard	0.5 C
Carica Standard	0.3 C
Massima corrente continua di scarica	300 A
Massima corrente impulsiva di scarica	500A for peak of 60s
Massima corrente continua di carica	100 A
Maximum temperatura di carica	45°C
Maximum temperatura di scarica	65°C
Dimensioni	H278 X L163X s51 mm
Peso	3.5 kg
Cp	1000 J/kg K

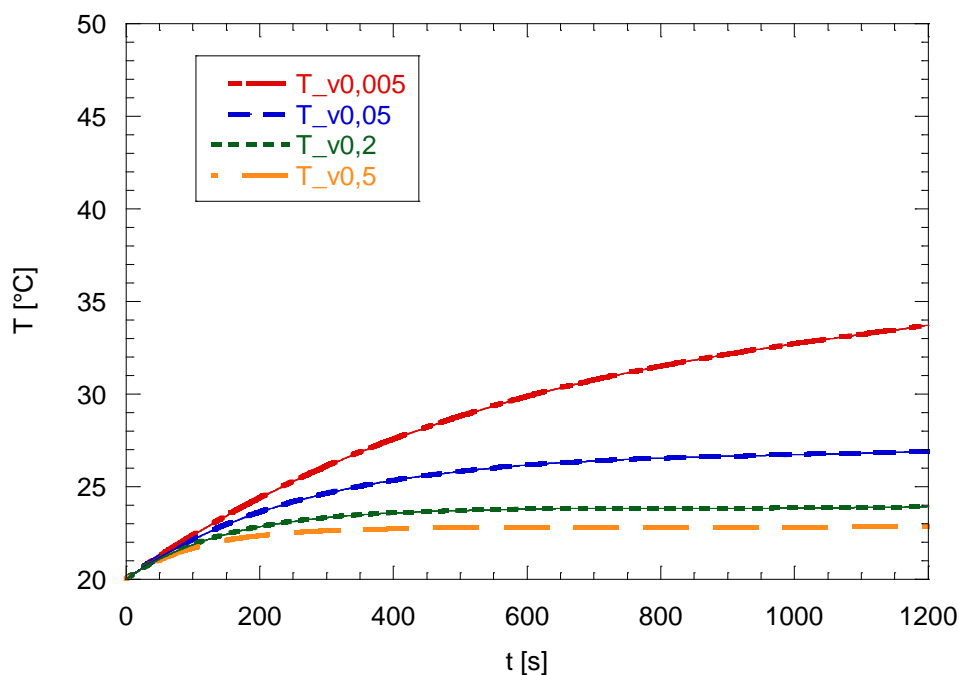


**Tabella 10 Velocità dell'aria e dell'olio dielettrico Midel ICE a parità di potenza di pompaggio**

Potenza di pompaggio (W)	$V_{aria}$ (m/s)	$V_{MidelICE}$ (m/s)	$Re_{aria}$	$Re_{MidelICE}$	Regimi aria/olio
2.2E-5	0.1	0.00496	39	3.89	lamin/lamin
2.2E-3	1	0.0496	392	38.9	lamin/lamin
0.035	4	0.198	1568	155.2	lamin/lamin
0.211	7	0.5	2743	392	trans/lamin



**Figura 14 Andamento della temperatura di batterie prismatiche sottoposte ad una corrente di scarica continua pari a 300 A e raffreddate con aria a velocità che vanno da 0.1 a 7 m/s,  $T_a=20^\circ\text{C}$**



**Figura 15 Andamento della temperatura di batterie prismatiche sottoposte ad una corrente di scarica continua pari a 300 A e raffreddate con olio a velocità che vanno da 0.05 a 0.5 m/s, Ta=20°C**

Dai risultati ottenuti è possibile dedurre che, anche per una scarica pari a 3C (ossia la massima consentita dal produttore), è sufficiente l'aria a basse potenze di pompaggio e in flusso laminare per lavorare in sicurezza. Con velocità dell'aria pari a 0.1 m/s si raggiungono 50°C a fine scarica: è sufficiente, quindi, una velocità di poco maggiore per non superare il limite massimo di temperatura.

Ad ogni modo, con l'olio dielettrico Midel ICE, anche utilizzando potenze di pompaggio molto basse ( $\sim 2 \cdot 10^{-5}$  W), non vengono superati i 35°C.

I risultati mostrano che l'elevata capacità termica delle batterie prismatiche consente di lavorare anche con aria, e quindi con un fluido a costo zero, anche con correnti di scarica di notevole intensità.

### 2.3 Studio dei sistemi di raffreddamento a transizione di fase

Lo studio di sistemi di raffreddamento a cambiamento di fase ha richiesto lo sviluppo di un modello in Fluent: la simulazione della transizione solido-liquido comporterebbe, difatti, una riscrittura completa del programma in Labview con tempi, dedicati alla stessa, nettamente superiori a quelli richiesti per la realizzazione di una modellizzazione CFD semplificata.

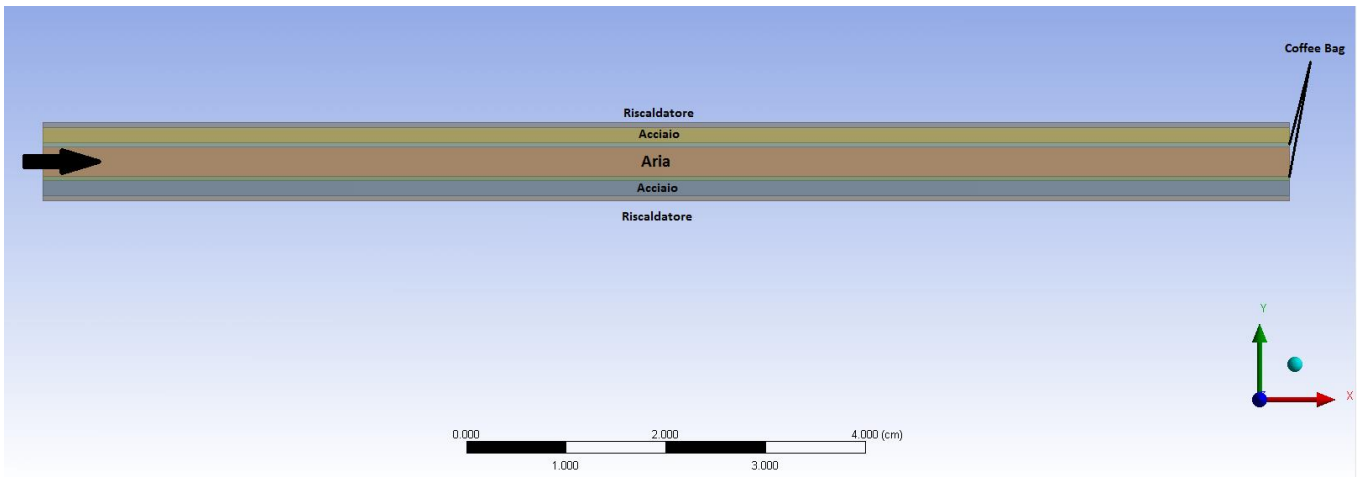
Si è provveduto, quindi, all'elaborazione di un modello che riproduce il comportamento termico di batterie pouch, già studiate nel precedente PAR [1]: come riferimento sono state prese le celle a bustina della EiG da 20 Ah, dispositivi sui quali si hanno a disposizione le informazioni necessarie per lo sviluppo di un simulatore dei transienti termici. Si considera che la distanza tra le celle sia pari a 3 mm e che le stesse siano sottoposte ad una scarica a correnti elevate (80 A). Il modello è stato realizzato sulla base degli studi di D'Annibale et al. [8] secondo i quali il comportamento termico di una cella EiG può essere riprodotto con un simulatore hardware costituito da un riscaldatore disposto centralmente, una lastra d'acciaio e 4 strati di coffee bag per ciascun lato (Figura 16).

Il modello CFD è stato inizialmente validato simulando un raffreddamento con aria a diverse velocità. Ciò ha consentito di valutare la corrispondenza tra i risultati ottenuti con il modello unidimensionale e quelli ottenuti con il modello in Fluent nelle medesime condizioni operative. Successivamente il modello è stato utilizzato per simulare il raffreddamento di un pacco batterie con materiali a cambiamento di fase.

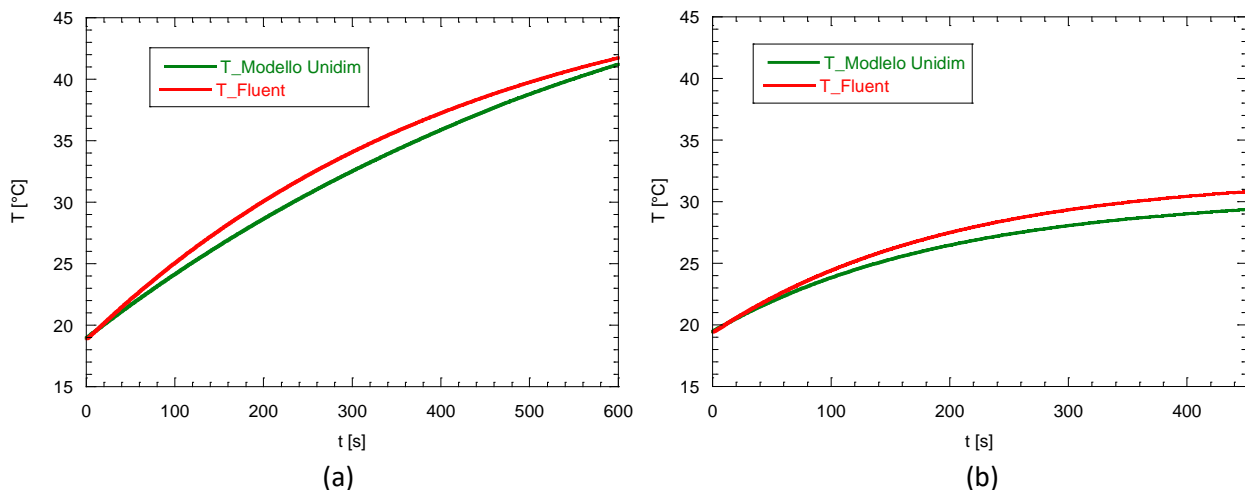
In Figura 17 sono riportati i risultati della comparazione tra i due modelli: il modello unidimensionale ed il modello CFD. In particolare sono stati messi a confronto gli andamenti di temperatura delle celle raffreddate con aria in condizioni di moto laminare (Figura 17a) e di moto turbolento (Figura 17b).

I due modelli prevedono degli andamenti di temperatura superficiali molto simili, con una differenza massima, tra i risultati ottenuti, inferiore al 5%.

Il modello in Fluent, che riproduce il simulatore hardware di celle pouch, può, quindi, essere utilizzato per studiare la rimozione di calore ottenibile con PCMs (materiali a cambiamento di fase), come refrigeranti passivi.



**Figura 16** Schema del modello realizzato in Fluent per riprodurre il comportamento termico delle celle



**Figura 17** Comparazione del modello in Fluent e del modello unidimensionale per 3 diverse velocità dell'aria: a) 1,2 m/s e b) 7 m/s

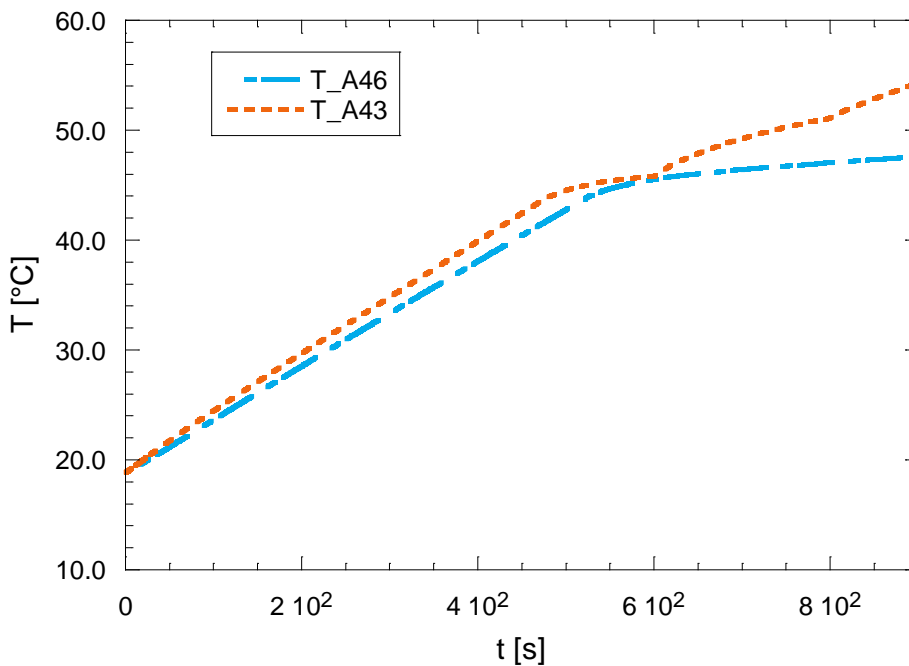
Sono stati selezionati dei materiali a cambiamento di fase prodotti dalla PCMProducts, che rientrano nel range di temperatura d'interesse. In particolare sono stati individuati i materiali con una temperatura di fusione che va dai 40 ai 48°C al fine di evitare che la temperatura di una cella possa raggiungere o superare i 50°C (vedi Tabella 11). Tra i PCMs selezionati, gli unici che non sono potenzialmente pericolosi per la salute dell'uomo sono l'A43 e l'A46, rispettivamente un materiale organico (la cui composizione non è specificata dal produttore) ed una cera paraffinica.

Si suppone di disporre il PCM in un pacco batteria tra le celle, distanziate l'una dall'altra di 3 mm: un confronto tra i trend delle temperature delle batterie raffreddate con A46 o A43 durante una scarica 4C (80

A) è riportato in Figura 18. Come è possibile dedurre dai risultati ottenuti, l'A46 sembrerebbe in grado di mantenere la temperatura delle batterie più bassa rispetto all'A43 durante l'intera fase di scarica.

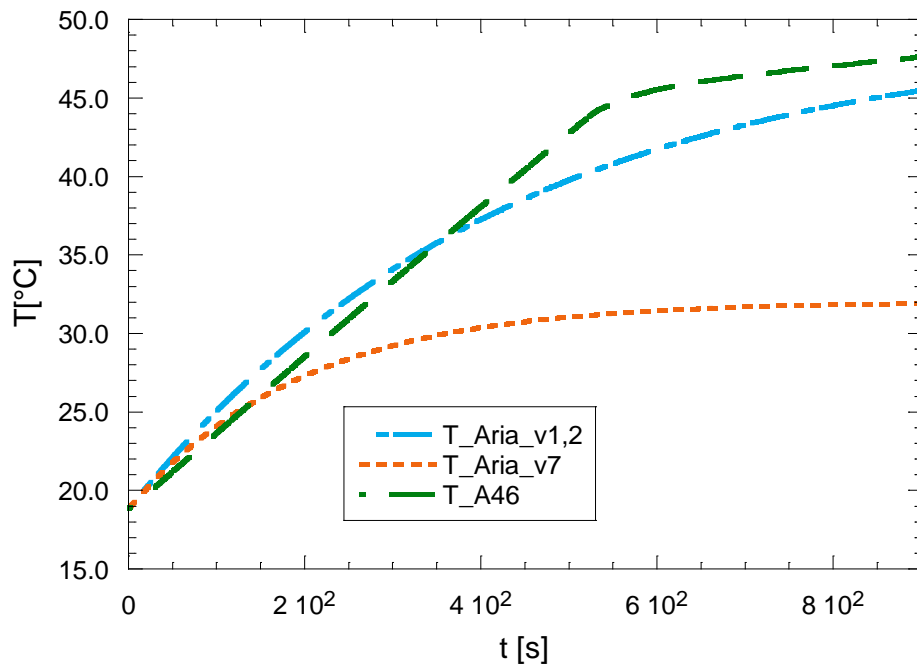
**Tabella 11 Proprietà dei PCMs**

Nome	Tipo	T <sub>f</sub> °C	ρ kg/m <sup>3</sup>	λ kJ/kg	VHC MJ/m <sup>3</sup>	c <sub>p</sub> kJ/kg K	k W/m K	T <sub>max</sub> °C	Pericolo
S46	Sale Idrato	46	1587	210	333	2.41	0.450	56	Si
S44	Sale Idrato	44	1584	100	158	1.61	0.430	120	Si
A48	Organico	48	810	234	190	2.85	0.180	300	Si
A46	Paraffina	46	910	155	141	2.22	0.220	300	No
A43	Organico	43	780	165	129	2.37	0.18	300	No
X40	Solido-solido	40	1046	125	131	1.67	0.36		Si



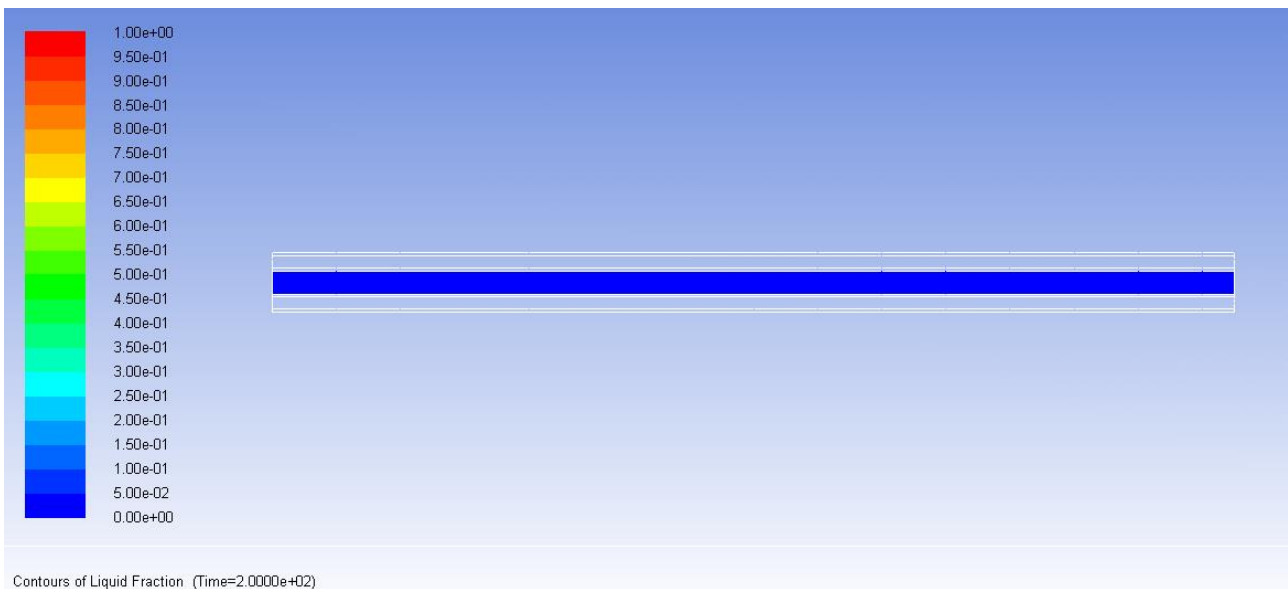
**Figura 18 Confronto tra gli andamenti di temperatura durante la scarica, utilizzando come refrigerante A46 o A43**

Mettendo a confronto le performances dell'A46 con quelle dell'aria in moto laminare e turbolento (vedi Figura 19) è possibile notare che utilizzando la paraffina come refrigerante passivo non si riesce a ridurre in modo significativo la temperatura delle celle. Un problema di scarso smaltimento del calore da parte dei materiali a cambiamento di fase è legato alla bassa conducibilità termica che li caratterizza e che va a compromettere notevolmente le performances degli stessi come refrigeranti.

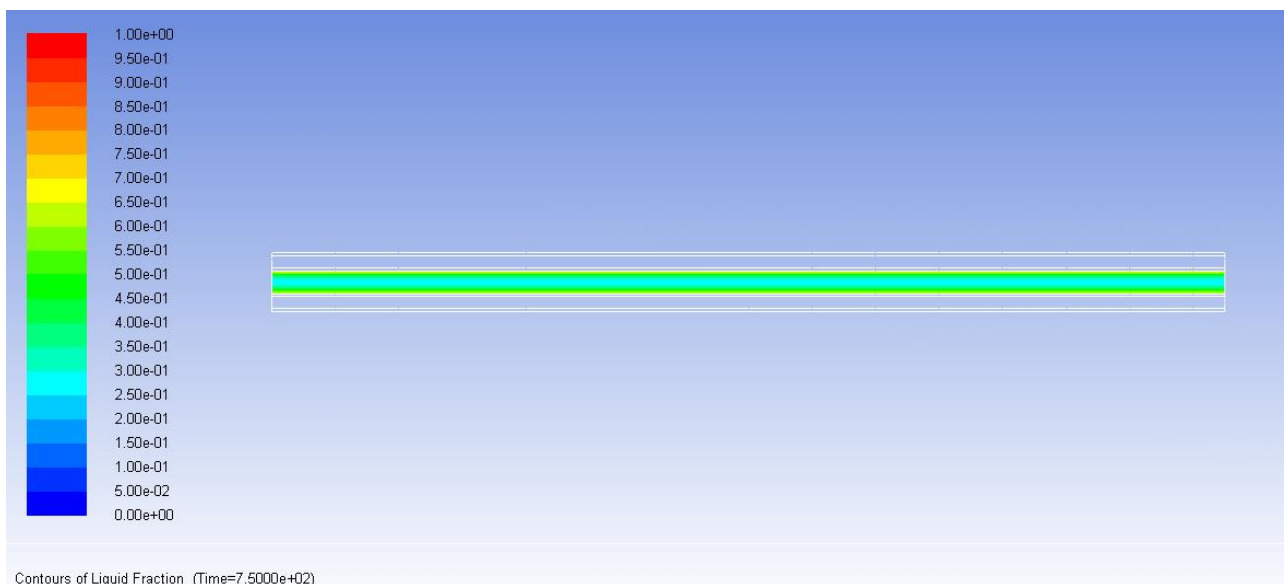


**Figura 19** Comparazione tra l'andamento delle temperature delle batterie utilizzando come refrigerante aria oppure A46.

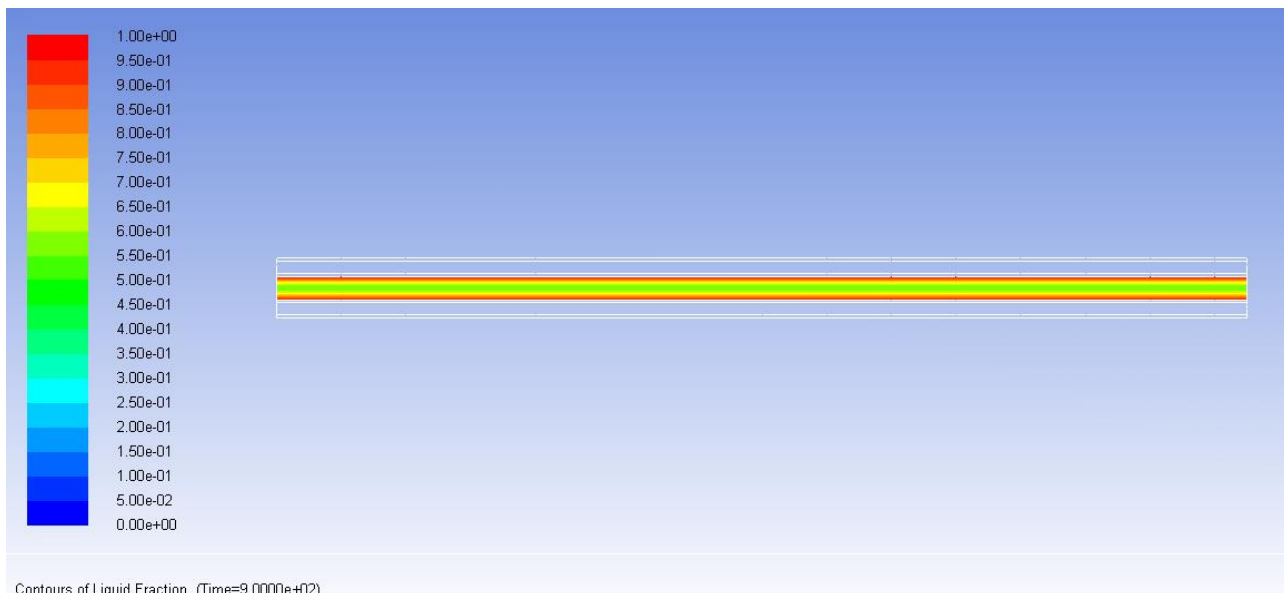
Di seguito sono riportate le *colour maps* che mostrano la frazione di PCM liquido, allocato tra le celle di un pacco batteria, rispettivamente dopo 200, 750 e 900 s dall'inizio della fase di scarica. Anche a fine scarica, ossia dopo circa 900 s, solamente la porzione di PCM in prossimità delle pareti è liquida: si deduce, quindi, che una parte minima del calore latente del materiale a cambiamento di fase viene realmente utilizzata durante i transitori rapidi di una fase di scarica intensa.



(a)



(b)



(c)

**Figura 20** Colour maps della frazione di liquido del PCM disposto tra le celle rispettivamente a) 200 s, b) 750 s, c) 900 s

Per aumentare la conducibilità termica dei materiali a cambiamento di fase è possibile utilizzare due sistemi:

- schiume solide: nei pori delle quali viene disposto il PCM (l'immagine di una schiuma di rame è riportata in Figura 21);
- nanoparticelle metalliche o ceramiche disperse all'interno del materiale a cambiamento di fase.

In quest'ultimo caso si possono, però, avere dei problemi di precipitazione delle particelle che, seppur disperse nel fluido tramite un surfattante, possono depositarsi sul fondo a causa della loro maggiore densità.

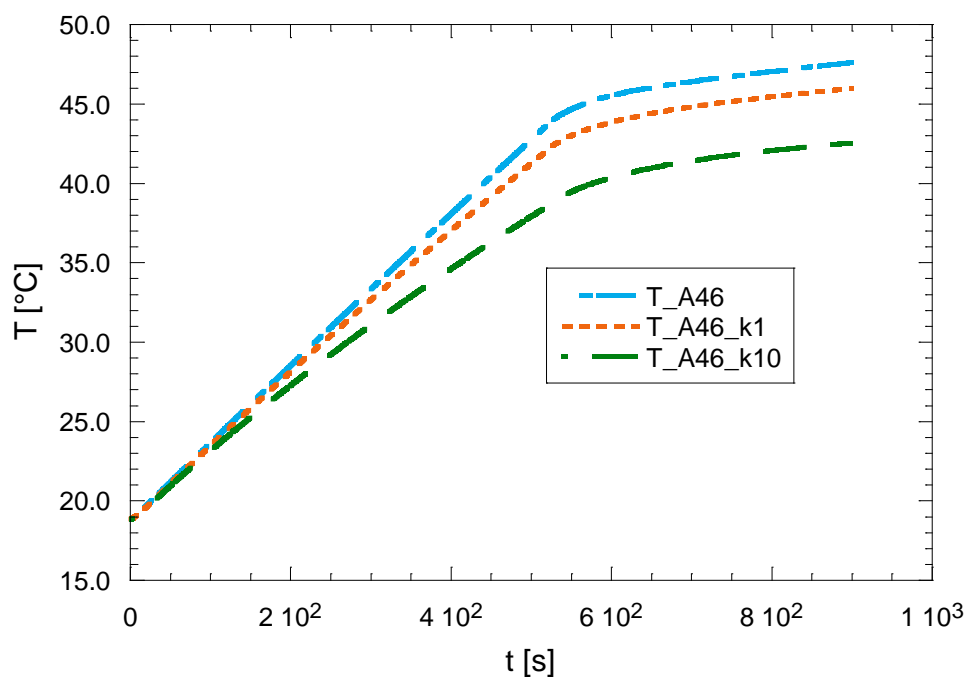
L'utilizzo di schiume solide è, quindi, la soluzione più facilmente attuabile per incrementare la conducibilità termica dei PCM al fine di asportare il calore prodotto da una batteria in tempi più rapidi. In Figura 22 è riportato un confronto tra gli andamenti di temperatura delle batterie raffreddate con un PCM puro e con

un materiale composito (PCM+schiuma) con conducibilità termica pari ad 1 o 10 W/mK, ossia pari rispettivamente a circa 4.5 o 45 volte la conducibilità del materiale puro ( $K=0.22$  W/mK).



**Figura 21 Schiuma di rame**

Com'è possibile dedurre da Figura 22, pur aumentando di 45 volte la conducibilità termica della paraffina si riesce a ridurre la temperatura delle celle solo di 6°C circa. L'aria in moto turbolento è, quindi, più efficace come mezzo di asportazione del calore prodotto in eccesso: a fine scarica si riesce a mantenere la temperatura delle batterie al di sotto dei 35°C con una velocità del fluido di 7 m/s.



**Figura 22 Confronto tra le temperature raggiunte dalle celle di un pacco batteria utilizzando A46 puro e A46+schiuma solida**

### 2.4 Prove sperimentali finalizzate all’ottimizzazione del modello

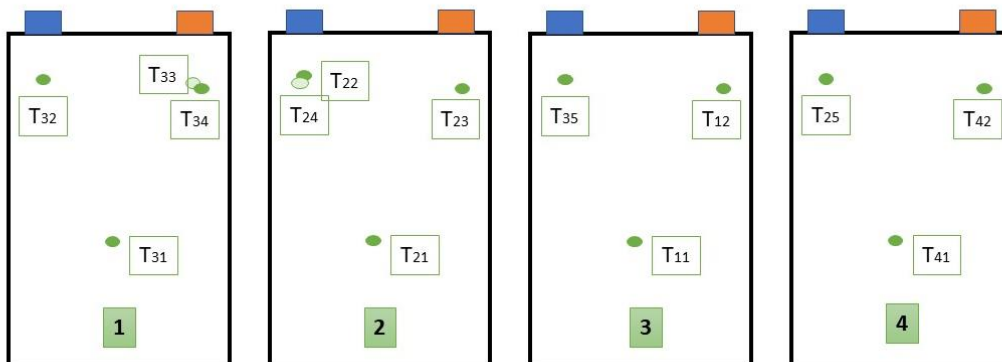
E’ stato studiato il comportamento termico di quattro celle EiG collegate in serie e disposte all’interno di un contenitore in legno, che le mantiene distanziate 3 mm l’una dall’altra. Ciascuna cella è stata sottoposta ad una scarica 4C (80 A) ed è stata monitorata con delle termocoppie posizionate in prossimità degli elettrodi e del centro della cella, come mostrato in Figura 23.

La matrice di prova per l’esecuzione dei test sulle 4 celle è riportata in Tabella 12. Dopo la scarica ad 80 A delle celle è prevista una pausa di un’ora e poi una ricarica a C/2.

**Tabella 12 Matrice di Prova**

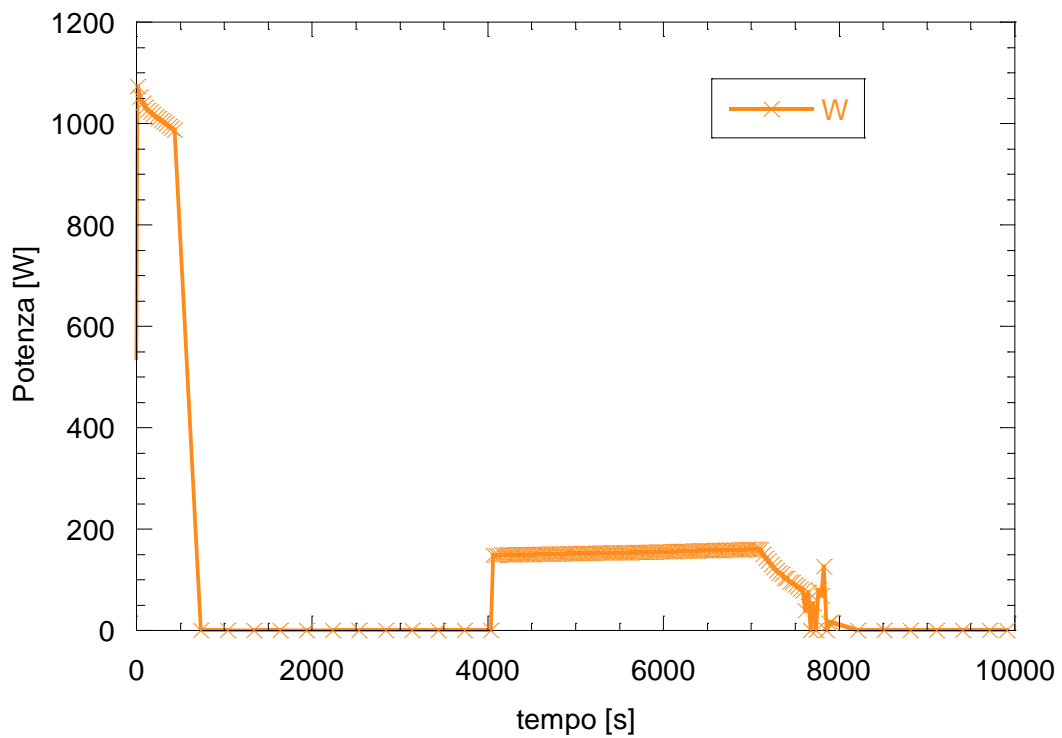
Operazione	Regolazione		Arresto			
	Tensione (V)	Corrente (I)	Tempo (s)	Capacità (Ah)	Tensione (V)	Corrente (I)
Pausa			10			
Scarica		80	900	22	10.4	
Pausa			3600			
Carica	16.8	10	5000	22		
Pausa			3600			

In Figura 24 è riportato l’andamento della potenza generata in base alla sequenza di operazioni riportate in Tabella 12.



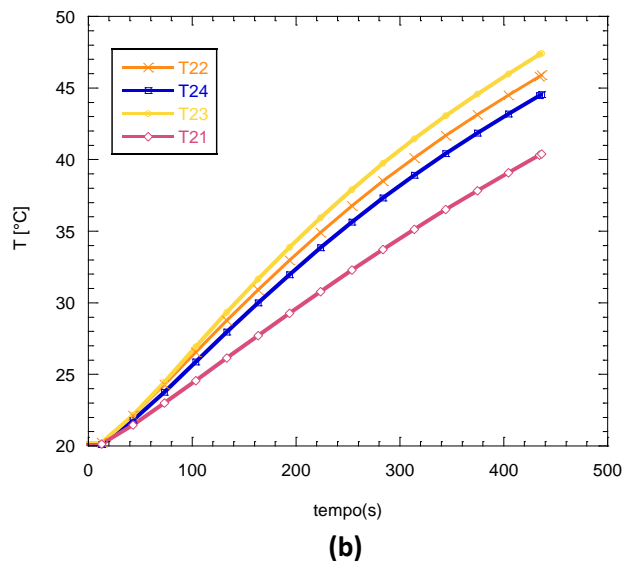
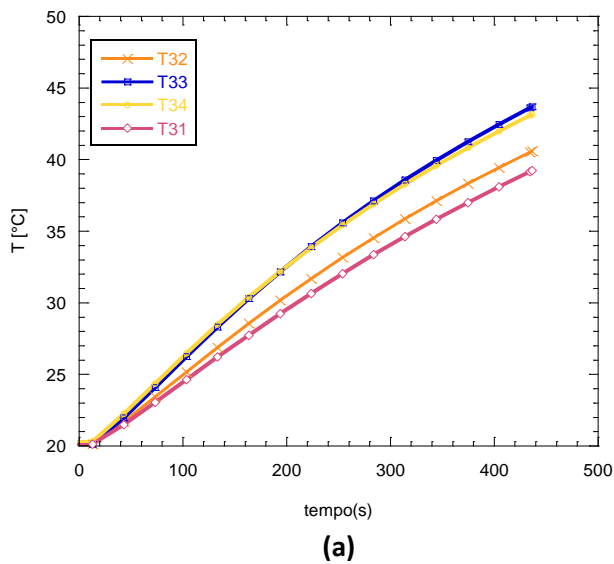
**Figura 23 Disposizione delle termocoppie sulle celle testate**

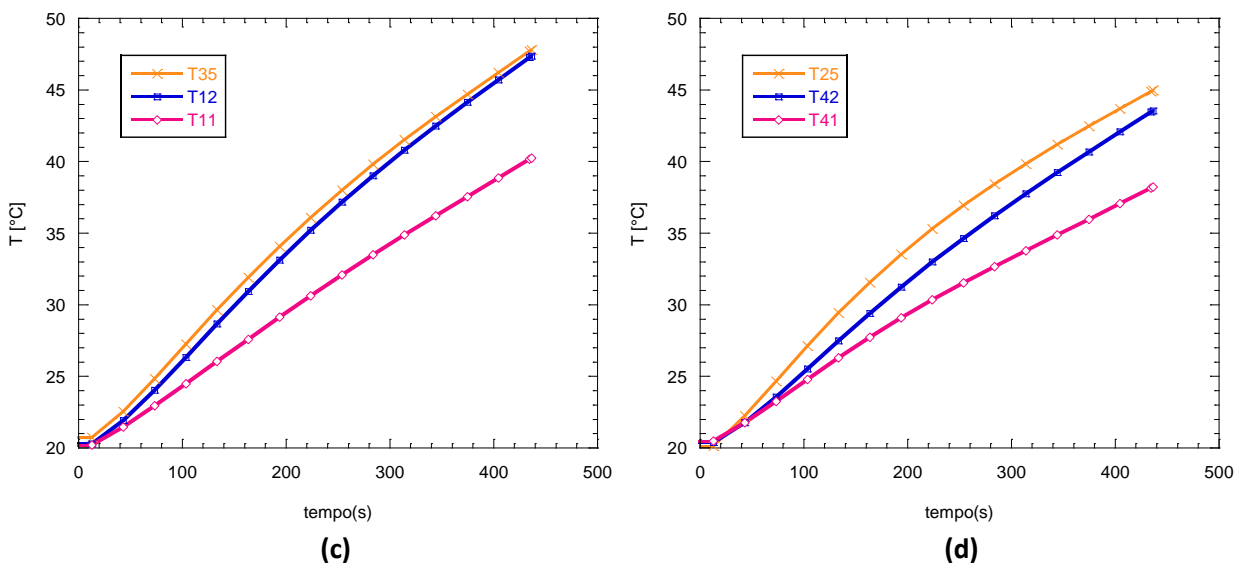




**Figura 24 Potenza generata durante i test sulle celle**

In Figura 25 sono riportati gli andamenti nel tempo delle temperature acquisite con i 14 sensori di tipo K disposti sulla superficie delle singole celle.



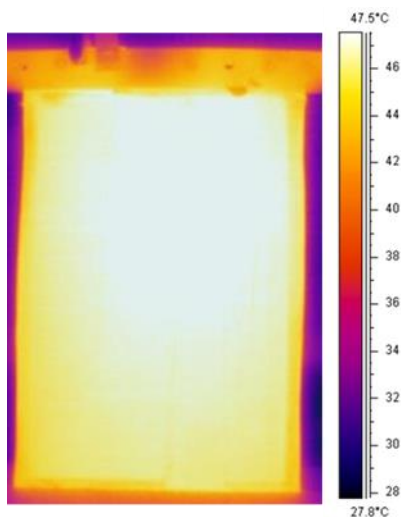


**Figura 25** Andamento delle temperature nelle 4 batterie testate: a) batteria 1, b) batteria 2, c) batteria 3, d) batteria 4.

Le due batterie posizionate alle estremità del pacco hanno globalmente una temperatura più bassa perché riescono, nonostante la presenza del contenitore in legno, a smaltire più efficacemente il calore verso l'esterno (vedi Figura 25).

Per quanto riguarda la distribuzione della temperatura sulla superficie delle celle è possibile dedurre, dai risultati riportati (Figura 25), che si ha un maggior accumulo di calore in corrispondenza degli elettrodi, dove la corrente è convogliata per essere trasferita all'apparecchio utilizzatore.

La temperatura delle batterie è stata monitorata anche utilizzando una termocamera ad infrarossi della FLIR (modello S40): l'immagine di seguito riportata (Figura 26) conferma una distribuzione non uniforme di temperatura sulla superficie e la presenza di una zona più calda in prossimità degli elettrodi.



**Figura 26** Immagine termografica di una cella EIG in fase di scarica

Alla luce dei risultati ottenuti, quindi, il modello andrebbe ottimizzato tenendo conto della distribuzione di temperatura superficiale e della presenza di hot spots, particolarmente pericolosi per una potenziale degradazione localizzata. Per ottenere un corretto dimensionamento del sistema di raffreddamento è necessario considerare le condizioni di lavoro più gravose e quindi la massima temperatura raggiungibile nel pacco batteria.

### 3 Conclusioni

Obiettivo del lavoro era estendere le conoscenze e gli strumenti di calcolo, derivanti dal precedente accordo di collaborazione e riguardanti la valutazione dell'efficienza dei sistemi di scambio termico nell'asportazione del calore dalle celle agli ioni di Litio.

Il modello per la simulazione del comportamento termico di batterie agli ioni di Litio, descritto nella precedente annualità, è stato esteso a celle di geometria cilindrica e prismatica. Sono state prese come riferimento delle celle presenti in commercio: per la geometria cilindrica le celle 18650 della Sony con chimica catodica NMC e per le celle di geometria prismatica le celle della HiPower con chimica catodica LFP.

Per entrambe le tipologie di cella sono state studiate le condizioni di funzionamento più onerose in base a quanto dichiarato dai rispettivi produttori. Le celle cilindriche necessitano di un sistema di raffreddamento con fluidi particolarmente performanti, poiché le temperature possono raggiungere anche gli 80°C durante il funzionamento. Sono stati messi a confronto diversi fluidi dielettrici, e il Galden HT135, per le elevate prestazioni e le sue proprietà fisiche, è risultato il fluido più adatto.

Le batterie prismatiche sono, invece, caratterizzate da un'elevata capacità termica e difficilmente raggiungono temperature che superano il limite di sicurezza di 50°C. L'aria a basse potenze di pompaggio è, quindi, sufficiente per evitare surriscaldamenti nel pacco batteria.

E' stata inoltre realizzata una simulazione con il codice di fluidodinamica computazionale (CFD) Fluent, al fine di quantificare il calore rimovibile da un pacco batterie utilizzando materiali a cambiamento di fase, che sfruttano l'elevato calore latente per raffreddare le celle. Purtroppo, però, non sono state ottenute le risposte sperate: pur supponendo di aumentare di circa 45 volte la conducibilità termica dei PCM (Phase Change Materials) selezionati, utilizzando schiume metalliche, la riduzione massima di temperatura che si riesce ad ottenere è di pochi gradi.

Infine sono stati eseguiti dei test sperimentali per studiare il comportamento termico di celle pouch della EiG in condizioni di funzionamento gravose: le celle nel modulo sono state monitorate con termocoppie K e con una termocamera ad infrarossi. Si è evidenziata una distribuzione non uniforme di temperatura sulla superficie delle celle che rende necessaria un'ulteriore ottimizzazione del modello.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. Roberto Bubbico, Barbara Mazzarotta, Carla Menale, “Studio dell’ottimizzazione dello scambio termico all’interno di un pacco batterie, con particolare riguardo ai sistemi di raffreddamento passivi”, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico-ENEA, PAR 2016, Progetto C.5-Ob. C. Report/PAR2016/174.
2. Martin Brand, Simon Gläser, Jan Geder, Stefan Menacher, Sebastian Obpacher, Andreas Jossen, Daniel Quinger, “Electrical safety of commercial Li-ion cells based on NMC and NCA technology compared to LFP technology” EVS27, Barcelona, Spain, November 17-20, 2013.
3. Boxia Lei, Wenjiao Zhao , Carlos Ziebert, Nils Uhlmann, Magnus Rohde and Hans Jürgen Seifert, “Experimental Analysis of Thermal Runaway in 18650 Cylindrical Li-Ion Cells Using an Accelerating Rate Calorimeter”. Batteries 2017, 3, 14; doi:10.3390/batteries3020014.
4. 3M™ Novec™ 1230 Fire Protection Fluid, Technical Data | January 2018
5. Vilayanur V. Viswanathan\*, Daiwon Choi, Donghai Wang<sup>1</sup>, Wu Xu, Silas Towne, Ralph E. Williford, Ji-Guang Zhang, Jun Liu, Zhenguo Yang, “Effect of entropy change of lithium intercalation in cathodes and anodes on Li-ion battery thermal management,. Journal of Power Sources 195 (2010), 3720–3729.
6. <http://www.globalsources.com/si/AS/Hipower-New/6008835854434/pdt/LiFePO4-Battery/1046049101.htm>
7. <http://www.evlithium.com/LiFePO4-Battery/225.html>
8. F. D’Annibale, A. Lattanzi, M. Morlacca, A. Scotini, L. Simonetti, Report RdS/PAR2016 “Progettazione, realizzazione e test di un dispositivo sperimentale per la simulazione del comportamento termico di celle al litio”.

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

$A$  = area di passaggio [ $m^2$ ]

$c_p$  = calore specifico [ $J/kgK$ ]

$d$  = distanza tra le celle [ $m$ ]

$D$  = diametro [ $m$ ]

$h$  = coefficiente di scambio termico [ $W/m^2K$ ]

$I$  = Intensità di corrente [ $A$ ]

$k$  = conducibilità termica [ $W/mK$ ]

$L$  = lunghezza [ $m$ ]

$LFP$  = Lithium Iron Phosphate

$M$  = massa [ $kg$ ]

$NCA$  = Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide

$NMC$  = Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide

$\Delta P$  = perdite di carico [ $Pa$ ]

$\dot{Q}$  = Calore generato per unità di tempo [ $W$ ]

$S$  = superficie [ $W/Km^2$ ]

$SOC \%$  = Stato di Carica

$T$  = temperatura [ $K$ ]

$T_f$  = temperatura di fusione [ $K$ ]

$t$  = tempo [ $s$ ]

$u$  = volume [ $m^3$ ]

$V$  = Voltaggio della cella [ $V$ ]

$W_p$  = potenza di pompaggio [ $W$ ]

### Simboli Greci

$\varepsilon$  = costante dielettrica

$\mu$  = viscosità cinematica [ $Pa \cdot s$ ]

$\rho$  = densità [ $kg/m^3$ ]

$\sigma$  = costante di Stefan – Boltzmann

## 6 Appendice: curriculum scientifico del gruppo di lavoro

*Roberto Bubbico* è professore associato presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali e Ambiente della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Roma "Sapienza". È membro dei Consigli d'Area di Ingegneria Chimica e di Ingegneria della Sicurezza e protezione della stessa Facoltà. Dall'anno accademico 2003-2004 tiene il corso di Sicurezza degli Impianti Chimici nell'ambito dei corsi di Laurea magistrale in Ingegneria Chimica e Ingegneria della Sicurezza e protezione; dal 2013 tiene anche il corso di Impianti dell'industria di processo, nell'ambito del corso di Laurea in Ingegneria della Sicurezza.

Dal 2004 al 2011 è stato membro del Comitato Esecutivo della Society for Risk Analysis – Europe (SRA-E), di cui è stato Presidente nel biennio 2007-2009. È membro della European Technology Platform on Industrial Safety (ETPIS). È stato inoltre membro del gruppo di coordinamento della Piattaforma Tecnologica Italiana sulla Sicurezza Industriale (PTISI), e rappresentante italiano presso la corrispondente Piattaforma Europea (ETPIS). Svolge attività di revisore per diverse riviste scientifiche internazionali e per diversi convegni internazionali (ESREL 2008, 1st Int. Conf. RACR 2007, IChEAP, CISAP, SRA-Europe Annual Conference 2005-2007, ecc.). Le principali linee di ricerca hanno riguardato diversi settori, e in particolare la sicurezza negli impianti chimici, lo scambio termico con sistemi avanzati, la fluidodinamica industriale e gli impianti biotecnologico-alimentari. L'attività scientifica svolta è testimoniata da oltre 140 lavori scientifici pubblicati su riviste o atti di convegni prevalentemente internazionali. È stato/è responsabile o ha partecipato a diversi progetti di ricerca, sia istituzionali che finanziati da altri enti pubblici o privati, a livello sia nazionale che europeo.

*Barbara Mazzarotta* si è laureata con lode in Ingegneria Chimica presso l'Università di Roma "La Sapienza" nel 1980. Ricercatore universitario dal 1983, professore associato dal 1992 e ordinario dal 2000 ha svolto interamente la sua attività presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma "La Sapienza" nel settore Impianti Chimici.

Tiene per affidamento/compito didattico i corsi di Impianti chimici e di Progettazione degli impianti chimici I per i corsi di Laurea e Laurea Magistrale in Ingegneria Chimica presso la Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università di Roma "La Sapienza". Dal novembre 2014 è Presidente del Consiglio di Area Didattica in Ingegneria Chimica e Materiali. È membro AIChE, AIDIC e GRICU. È autrice di oltre 180 lavori pubblicati nei campi della sicurezza, della cristallizzazione, del mixing e dello scambio termico e ha partecipato e coordinato progetti di ricerca su questi stessi argomenti. I temi di ricerca nel campo della sicurezza coprono sia gli impianti fissi che il trasporto di sostanze pericolose. Ha coordinato o preso parte a vari progetti di ricerca di interesse internazionale e nazionale nel campo della sicurezza, tra cui i progetti iNTeg-Risk e ARAMIS, finanziati dalla UE.

I temi di ricerca nel settore della cristallizzazione hanno riguardato lavori sperimentali e modellistici relativi alla solubilità, alle cinetiche di nucleazione e accrescimento e, in particolare, ai fenomeni di attrizione, nei cristallizzatori agitati. I temi di ricerca nel settore del mixing sono stati principalmente focalizzati su sperimentazioni relative a sospensioni liquido-solido, specialmente su quelle ad alta concentrazione di solido e contenenti particelle di dimensioni non troppo piccole. I temi di ricerca nel settore dello scambio termico hanno riguardato lo studio, sia sperimentale che modellistico, della condensazione, totale o parziale, di miscele di vapori, accompagnate o meno da gas incondensabili e, più recentemente, quello di sistemi di refrigerazione basati sull'utilizzo di nano fluidi.

*Carla Menale* è assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali e Ambiente della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Roma "Sapienza". Ha conseguito la laurea di primo livello in Ingegneria chimica e dei processi nel 2009, e quella magistrale in Ingegneria chimica e dei processi nel 2012 con voto finale di 110/110. Ha conseguito, inoltre, il titolo di dottore di ricerca in ingegneria chimica e dei processi il 26/02/2016 con il massimo dei voti. Le esperienze di ricerca riguardano lo scambio termico con nanofluidi con particolare riferimento ai fenomeni di erosione e corrosione, l'ottimizzazione di sistemi di raffreddamento per batterie al litio in autoveicoli elettrici e sistemi di storage elettrici.