



Ricerca di Sistema elettrico

## Fattibilità tecnica di sistemi di raffreddamento integrati

F. D'Annibale, A. Lattanzi, M. Morlacca, A. Scotini, L. Simonetti

## FATTIBILITÀ TECNICA DI SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO INTEGRATI

F. D'Annibale, A. Lattanzi, M. Morlacca, A. Scotini, L. Simonetti (ENEA)

Dicembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

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

Responsabile del Progetto: Pier Paolo Prosini, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....	5
2.1 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO E DELLE PROVE SPERIMENTALI.....	5
2.2 RISULTATI DELLE PROVE SPERIMENTALI CON AUMENTO DELLA VELOCITÀ DELL'ARIA .....	7
2.3 RISULTATI DELLE PROVE SPERIMENTALI CON ALLAGAMENTO DEL PACCO BATTERIE.....	10
2.4 UTILIZZO DEL PROGRAMMA DI SIMULAZIONE PER VALUTARE ALTRI CASI .....	11
2.4.1 <i>Valutazione della sensibilità alle variazioni della distanza tra le celle</i> .....	12
2.4.2 <i>Simulazione del comportamento di celle prismatiche</i> .....	13
2.5 DISCUSSIONE DEI RISULTATI OTTENUTI .....	15
3 CONCLUSIONI .....	16
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	16
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI .....	17

## Sommario

Nella prosecuzione dell'attività sperimentale con l'impianto per l'emulazione del comportamento termico di celle al litio, sono stati eseguiti test per valutare l'efficacia di metodi di intervento finalizzati alla riduzione del rischio in condizioni di abuso.

Per le situazioni di abuso è stata testata la possibilità di sistemi integrati in cui la gestione termica in condizioni normali è effettuata con il raffreddamento con aria mentre, qualora dovessero verificarsi condizioni estreme, vengono attivati sistemi di mitigazione di emergenza come l'aumento della velocità dell'aria o l'allagamento con liquido.

I risultati dei test sono stati anche confrontati con le previsioni del programma di simulazione semplificato, realizzato nell'ambito dei due precedenti PAR. Il programma poi è stato utilizzato per esaminare in modo più dettagliato i possibili interventi del tipo descritto, estendendo la casistica a situazioni non esaminate sperimentalmente.

## 1 Introduzione

Nell'ambito del precedente PAR, utilizzando l'impianto per l'emulazione del comportamento termico di batterie, sono stati eseguiti test sperimentali sia con riscaldamento equivalente a quello rilasciato in condizioni di funzionamento normale, sia con alti flussi termici tipici delle condizioni vicine al thermal runaway. I dati sono stati anche utilizzati per validare un programma che permette di simulare in modo rapido tale comportamento.

In questo trimestre si è studiata sperimentalmente la fattibilità tecnica di sistemi integrati in cui la gestione termica in condizioni normali è effettuata con una soluzione attiva semplice, il raffreddamento con aria in convezione forzata, mentre qualora dovessero verificarsi condizioni estreme, vengono attivati sistemi di sicurezza aggiuntivi, passivi (allagamento automatico) o attivi (incremento di portata). Tale combinazione deve essere in grado di evitare che il sistema di raffreddamento normale diventi inappropriato nel momento in cui vengano richieste elevate potenze (situazione di abuso) o quando, a causa di problemi interni alla batteria, possano verificarsi condizioni estreme che, se non controbilanciate in tempo, porterebbero ben presto a situazioni di irreversibilità. Infatti il deterioramento termico di una parte del sistema, se non tempestivamente arginato, potrebbe propagarsi rapidamente anche ad altri elementi sani della batteria.

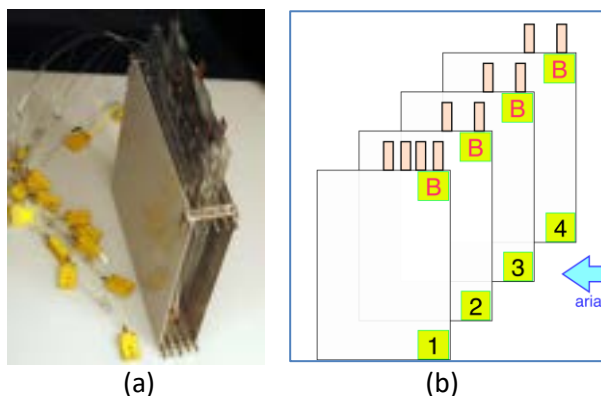
Il problema principale che continua a persistere anche nei molti studi comparsi in letteratura negli ultimi anni, è che l'intervento sulla cella in cui inizia l'aumento anomalo della temperatura deve essere molto rapido e efficace per raffreddarla prima che superi una temperatura che può essere spesso intorno o poco superiore ai 100°C. Ma mentre l'intervento di distacco del carico elettrico può essere gestito rapidamente dal BMS o ancora a più basso livello da termostati o termofusibili, la rimozione del calore dalla cella attraverso la superficie è molto più critica e i sistemi di raffreddamento attualmente in uso possono limitare la propagazione alle altre celle, ma molto difficilmente riescono ad evitare la rapida salita dell'interno di quella in crisi, soprattutto per celle spesse. E' necessario quindi valutare sistemi di emergenza che attuino interventi aggiuntivi molto più efficaci appena le condizioni cominciano a divergere.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 *Descrizione dell'impianto e delle prove sperimentali*

I test sperimentali sono stati condotti utilizzando l'impianto BACOS, già descritto nei precedenti Rapporti Tecnici [1, 2], che permette di emulare dal punto di vista termico il comportamento di un pacco batterie sia in condizioni normali che in situazioni di abuso o di funzionamento anomalo con alti rilasci di calore. In questo modo si è potuto valutare l'efficienza di diverse filosofie di intervento nel mitigare le conseguenze di tali situazioni che, se lasciate evolvere, possono portare alla generazione incontrollata di calore (thermal runaway di una cella) e alla sua pericolosa propagazione al resto del pacco batterie.

Le celle implementate sono di tipo "pouch", di dimensioni 12.7x19.5 mm e spessore 7 mm, come la EIG-C020. Il pacco è costituito da quattro celle distanziate di 3 mm, con il refrigerante che scorre orizzontalmente tra esse. In Figura 1 è mostrato il pacco con le quattro celle e la loro disposizione rispetto al flusso del refrigerante, con la numerazione che sarà usata nei grafici sperimentali. Si ricorda che le celle sono costituite da un riscaldatore sul piano centrale e da pareti con caratteristiche termiche complessive simili alle celle Li-Ion di riferimento. Tre delle celle (la 1, 2 e 4) sono realizzate per potenze termiche simili o leggermente superiori al riscaldamento in condizioni normali, mentre una, la n. 3, può essere alimentata con potenze molto maggiori, per poter simulare una cella in condizioni anomali pre-incidentali.



**Figura 1 – simulatori delle celle nel contenitore; b) disposizione rispetto al flusso di refrigerante.**

Le prove sperimentali effettuate sono relative alla mitigazione delle conseguenze di condizioni anomale in una cella, studiando il comportamento del pacco di quattro celle quando in una di esse si verifica un riscaldamento anomalo dovuto a una eccessiva potenza termica generata all'interno, che può essere dovuta a condizioni di abuso (corrente eccessiva sia in carica che in scarica con conseguente surriscaldamento fino al thermal runaway) o a problemi meccanici o elettrochimici (rottture dovute a dendriti, deformazioni per urti, riscaldamento esterno ecc.). Nelle prove sperimentali tali condizioni sono state ottenute fornendo improvvisamente ad una cella una potenza termica molto maggiore di quella generata durante il normale funzionamento e, quando la temperatura della cella ha raggiunto un valore eccessivo, eseguendo un intervento di emergenza. In particolare, partendo dalle celle raffreddate ad aria, gli interventi sono stati di due tipi:

- aumento della velocità dell'aria quando la temperatura raggiunge 80°C, testando diverse velocità e potenze di riscaldamento;
- allagamento con i due diversi liquidi già utilizzati nelle prove sperimentali della precedente annualità [2], anche in questo caso al superamento degli 80°C.

La potenza termica per le condizioni normali è 30W/cella, tipica di scariche più gravose previste dal costruttore, 5C. La condizione di abuso principale esaminata nei test è con 300 W su una cella, ma sono state eseguite prove anche con 100W e 500 W.

Come sistema di raffreddamento in condizioni normali, nella precedente annualità oltre al raffreddamento ad aria era stato provato anche il raffreddamento per contatto diretto con liquido in convezione forzata. Quest'ultimo caso non è stato preso in considerazione come condizione iniziale per le prove di intervento di emergenza in quanto in quanto i risultati precedenti comprendevano già anche i casi con alta potenza termica e da questi risultati si evince che il sistema è sufficientemente efficiente da abbattere i rischi per condizioni di abuso come quelle appena descritte.

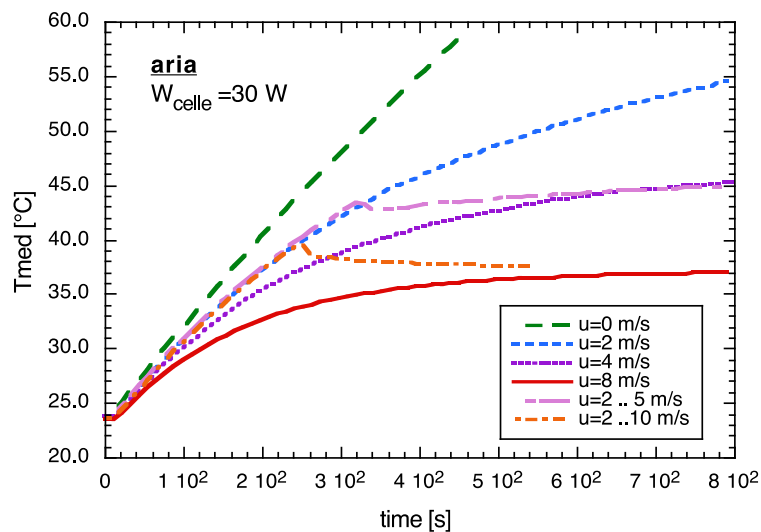
La procedura completa delle prove sperimentali è la seguente:

1. il pacco di celle viene portato alla temperatura iniziale e il refrigerante alla velocità iniziale, aspettando che le condizioni siano stazionarie e la differenza tra le termocoppie sulle sia piccola (minore di 0.5°C);
2. viene data a tutte le celle una potenza di 30 W per portarle a una temperatura iniziale di 40°C, al fine di simulare una condizione tipica durante il normale funzionamento a correnti abbastanza alte;
3. raggiunti i 40°C si fornisce la potenza di abuso (100, 300 o 500 W) alla cella n.3, mentre le altre continuano a essere alimentate con 30 W;
4. quando la cella 3 raggiunge gli 80°C si attua l'intervento di emergenza:
  - o aumento della velocità dell'aria a 5, 10 o 16 m/s, oltre a una prima prova di riferimento senza aumento di velocità;
  - o allagamento del pacco batterie con uno dei due liquidi testati, un liquido per scambio termico a bassa viscosità (Polietere Perfluorato "Galden HT135" della Solvay) o un olio siliconico (Clearco PSF-50cSt), già descritti in [2] e [3];

La durata della prova è circa 800 s ma viene interrotta prima se la temperatura sale a valori che potrebbero danneggiare il dispositivo sperimentale, e che comunque sono superiori a quelli accettabili per le vere celle.

## 2.2 Risultati delle prove sperimentali con aumento della velocità dell'aria

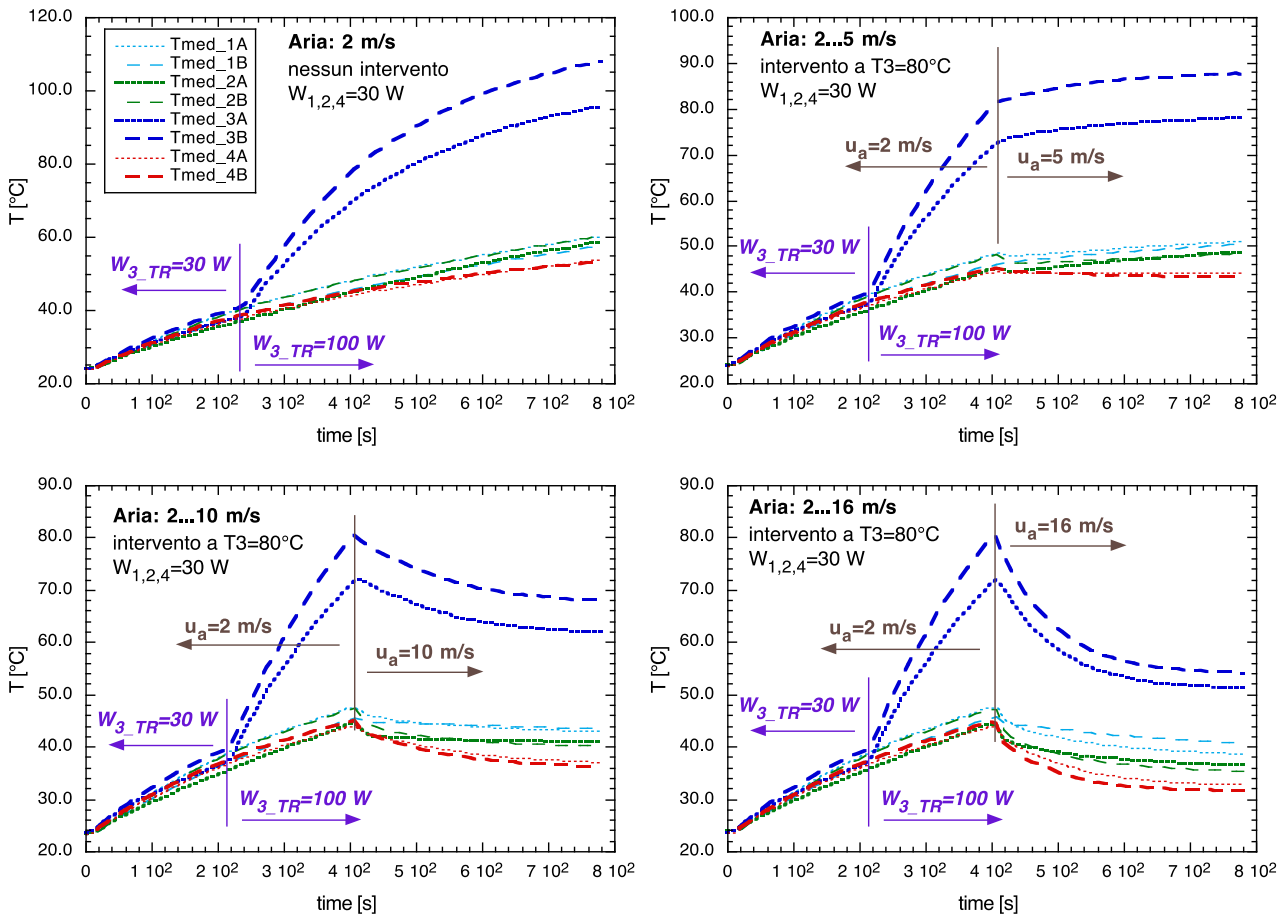
Per valutare l'effetto dell'aumento di velocità dell'aria anche in condizioni normali, son state effettuate anche due prove preliminari senza aumento di potenza, confrontando i transistori con quelli con velocità costante riportati nel precedente report [2]. I risultati sono mostrati in Figura 2, dalla quale si vede che l'aumento di velocità porta le celle a una temperatura abbastanza vicina a quella con la stessa velocità già dall'inizio del transitorio, ma con tempi superiori a 200 s.



**Figura 2 –Temperatura superficiale media in transistori con potenza di abuso 100 W, a diverse velocità di ventilazione di emergenza dell'aria**

Passiamo ora ali test con aumento anomalo della potenza sulla cella 3. In Figura 3 è mostrato l'andamento delle temperature medie delle celle, per una potenza di abuso di 100 W e per tre diversi incrementi della velocità dell'aria (oltre al caso senza intervento di emergenza). Le varie fasi sono indicate dalle linee verticali, quella viola mostra l'istante di aumento della potenza mentre quella nera è in corrispondenza all'intervento di emergenza.

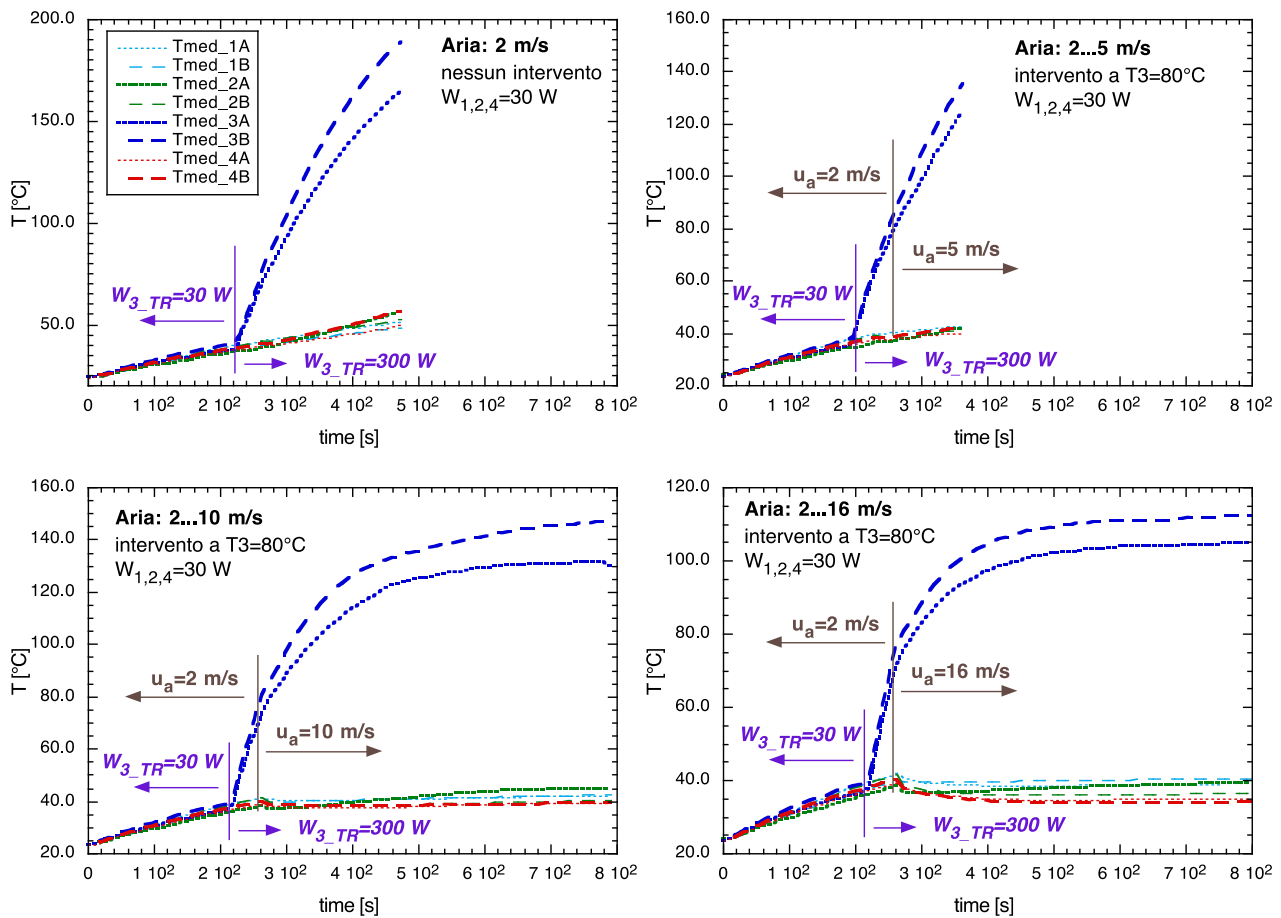
Se non si effettua l'intervento, dalla prima figura si può vedere che la temperatura della cella 3 continua ad aumentare, mentre l'aumento della velocità da 2 a 5 m/s è appena sufficiente a limitare l'ulteriore aumento di temperatura, che comunque sale ancora qualche grado su entrambe le facce della cella 3. L'aumento a valori maggiori invece provoca una diminuzione della temperatura che scende sotto i 70°C con 10 m/s e sotto i 60°C con 16 m/s. L'effetto della cella calda sulle celle vicine è trascurabile, infatti le due facce vicine ad essa (la 2A e la 4B, come mostrato in Figura 1) non si differenziano dalle altre.



**Figura 3 – Temperatura superficiale media in transitori con potenza di abuso 100 W, a diverse velocità di ventilazione di emergenza dell’aria**

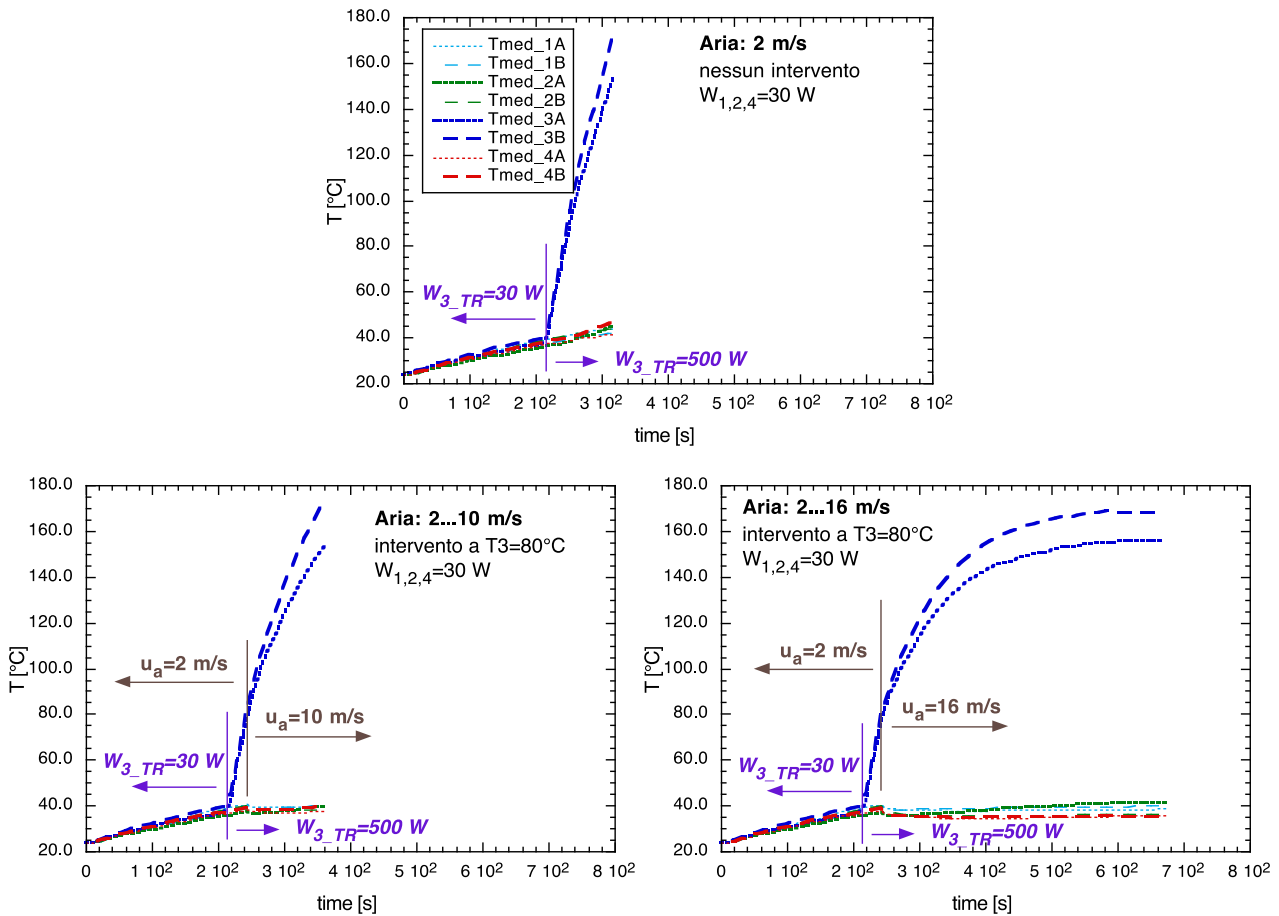
In Figura 4 è mostrato il caso con una potenza di abuso di 300 W. Si vede che senza intervento la temperatura della cella anomala sale molto rapidamente e provoca un aumento anche sulle facce vicine delle celle 2 e 4. In questo caso l’effetto dell’aumento da 2 a 5 m/s è quasi nullo, mentre un aumento maggiore porta a risultati non trascurabili, anche se la cella subisce comunque un riscaldamento eccessivo. Infatti la cella continua comunque ad aumentare di temperatura per oltre due minuti con 10 m/s e poco meno con 16 m/s, rallentando poi abbastanza vistosamente ma portandosi però rispettivamente a circa 140°C e 105°C. Un buon effetto si ha sulle altre celle, infatti anche in quelle adiacenti (Tmed\_2A e Tmed\_4B) non si ha l’aumento di temperatura che invece si verifica nel caso senza intervento.





**Figura 4 – Temperatura superficiale media in transistori con potenza di abuso 300 W, a diverse velocità di ventilazione di emergenza dell’aria**

In Figura 5 sono riportati gli andamenti delle temperature quando la potenza anomala è 500 W, per il caso senza intervento e due soli aumenti della velocità (10 e 16 m/s). In questo l’aumento della temperatura è stato tale da costringere ad interrompere la prova anche con 10 m/s e comunque anche alla massima velocità l’aumento nella cella anomala è notevole e solo dopo oltre 100 s si inizia a vedere un effetto del sistema di raffreddamento, quando però la temperatura ha ormai superato i 150°C. L’incremento della velocità dell’aria invece è sufficiente per evitare il riscaldamento delle celle vicine.



**Figura 5 – Temperatura superficiale media in transistori con potenza di abuso 500 W, a diverse velocità di ventilazione di emergenza dell’aria**

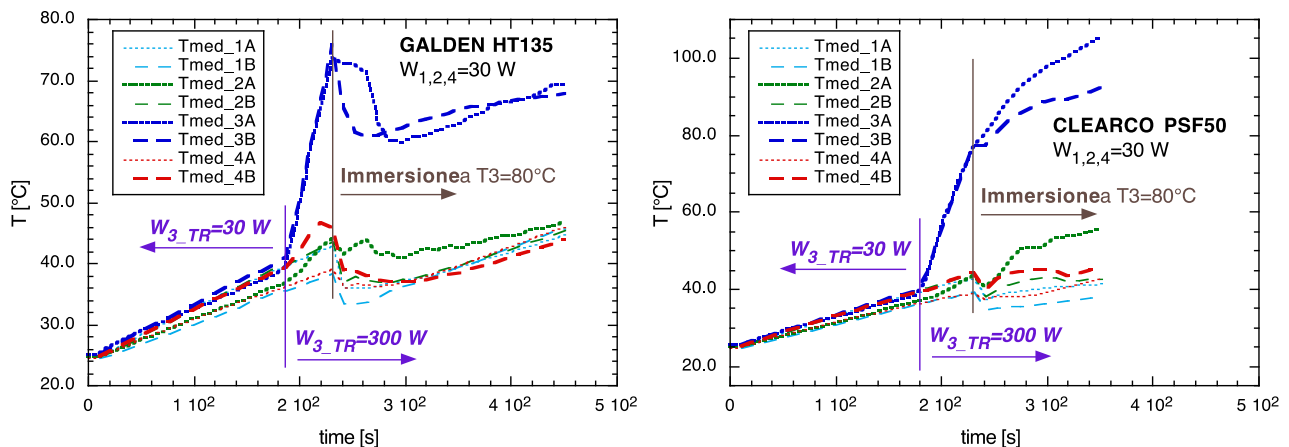
Quindi riepilogando i risultati può concludere che l’intervento di emergenza che prevede solo un aumento della velocità dell’aria è sufficiente a mitigare gli effetti solo di situazioni in cui la potenza termica anomala ha valori abbastanza limitati, mentre con valori maggiori si potrebbe avere ugualmente l’innesco del thermal runaway della cella.

Bisogna inoltre considerare che questo sistema non protegge dagli ulteriori effetti di incidenti più severi. Infatti un eventuale rigonfiamento o deformazione della cella riduce il canale di passaggio dell’aria proprio nella zona più critica peggiorando il raffreddamento. Inoltre la propagazione di eventuali fiamme continua ad essere possibile.

**2.3 Risultati delle prove sperimentali con allagamento del pacco batterie**

Anche in questo caso le celle sono inizialmente in aria e in condizioni di riscaldamento normali (potenza 30 W), e sempre come nei test precedenti quando le celle sono a 40°C la potenza della cella 3 viene aumentata a 300 W. Però una volta raggiunti gli 80°C su questa, l’intervento di emergenza fa fluire un liquido dielettrico che allaga rapidamente il contenitore fino a sommergere le celle. In questo caso il raffreddamento diventa per contatto diretto con il liquido e quindi si sfrutta soprattutto la maggiore capacità termica del fluido. Sono stati usati i due liquidi già testati nella precedente annualità [2], un liquido a bassa viscosità e un olio silconico con viscosità maggiore .

In Figura 6 si riportano i risultati dell’intervento di allagamento di emergenza. Il Galden riesce ad abbattere quasi subito le temperature e poi a mantenere la T3<70°C e le altre temperature sotto i 50°C. Invece con l’olio silconico Clearco le temperature continuano ad aumentare e la T3 supera i 100°C in circa due minuti, ed inoltre anche le due facce vicine alla cella calda aumentano la loro temperatura, cosa invece molto meno evidente con il Galden.

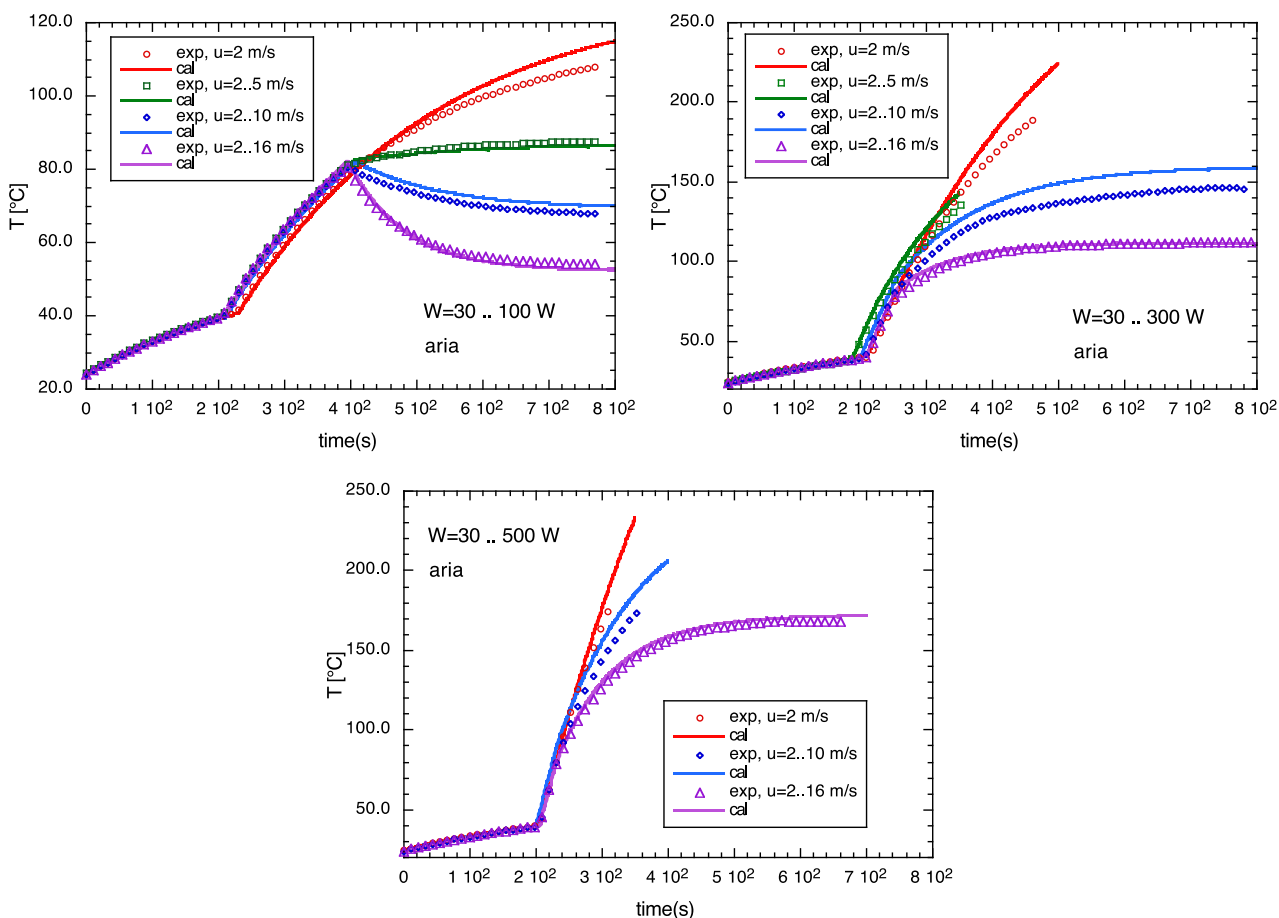


**Figura 6 –Temperatura superficiale media in transitorio con potenza iniziale 30 W in aria, poi potenza di 300 W alla cella 3 e successivo allagamento con liquido al superamento della temperatura di allarme.**

#### 2.4 Utilizzo del programma di simulazione per valutare altri casi

Come già descritto in [1] e [2], è stato realizzato un programma di simulazione del comportamento termico del pacco batterie, partendo da un modello semplificato alle differenze finite. Questo che ha permesso di ottenere uno strumento software in grado di effettuare simulazioni molto rapide sia come tempi di calcolo, sia per la variazione di diversi parametri geometrici e fisici.

Le prove di validazione del programma semplificato, con il confronto con i dati sperimentali precedenti è molto soddisfacente per l'aria, mentre con i liquidi l'errore è maggiore ed aumenta al diminuire della velocità [2]. La causa principale del disaccordo era stata ipotizzata nella convezione mista, che è stata quindi inserita ma in una forma necessariamente molto approssimata per non appesantire eccessivamente il programma snaturandone lo scopo di strumento di valutazione rapido. I risultati sono migliorati ma sono ancora poco soddisfacenti, mentre per l'aria il programma di simulazione sembra abbastanza affidabile. Questo è confermato anche dalla simulazione delle prove descritte in precedenza. In Figura 7 sono riportati i confronti con le prove sperimentali, rispettivamente con potenza 100 W, 300 W e 500 W e le diverse velocità dell'aria dopo l'intervento di emergenza. Si vede che l'accordo è buono soprattutto ad alta velocità, mentre al diminuire di questa si ha una leggera sovrastima dell'aumento di temperatura.

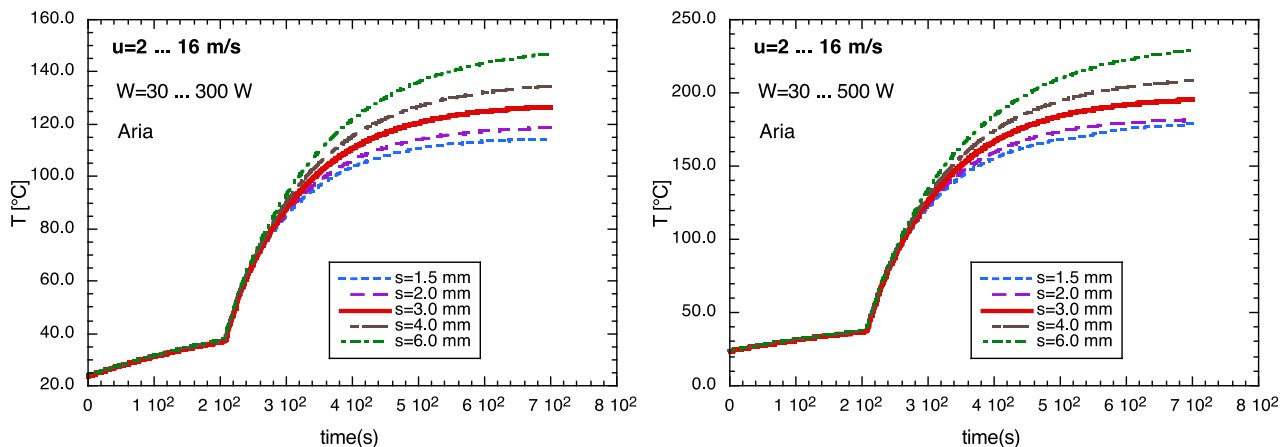


**Figura 7 – Confronto delle previsioni del programma di simulazione con i dati sperimentali, per le tre potenze di abuso (100, 300 e 500 W) e le diverse velocità dell’aria nell’intervento di emergenza**

Il programma è stato quindi utilizzato per valutare l’effetto della variazione di altri parametri non testati sperimentalmente, oppure per simulare celle diverse da quelle utilizzate nell’impianto BACOS, o ancora per valutare dati non misurati in esso come ad esempio la temperatura al centro della cella.

**2.4.1 Valutazione della sensibilità alle variazioni della distanza tra le celle**

Per transistori simili a quelle appena descritti, considerando però le caratteristiche di vere celle EIG-C020, sono stati simulati gli andamenti della temperatura della cella previsti al variare dello spessore del canale in cui scorre l’aria refrigerante. Partendo quindi dal caso con lo spazio tra le celle di 3 mm, tale distanza è stata cambiata in 1.5, 2, 4 e 6 mm. In Figura 8 sono mostrati gli andamenti ottenuti con potenze di abuso 300 e 500 W e velocità che passa da 2 a 16 m/s dopo l’intervento di emergenza. L’efficienza del raffreddamento migliora al diminuire dello spessore, ma non riesce comunque a mantenere la temperatura a valori accettabili.



**Figura 8 – Confronto delle previsioni del programma di simulazione al variare dello spessore tra le celle, per due potenze di abuso (300 e 500 W) velocità dell’aria 16 m/s nell’intervento di emergenza**

#### 2.4.2 Simulazione del comportamento di celle prismatiche

Il programma di simulazione è stato usato per verificare le prestazioni dello stesso tipo di raffreddamento su celle prismatiche, caratterizzate da potenze e correnti molto maggiori ma nel contempo anche da spessori maggiori e da un guscio di materiale plastico molto più spesso della busta di “coffee bag” delle celle pouch.

Come tipo di celle sono state considerate batterie Li-Ion della Hipower Energy Group, con chimica LiFePO<sub>4</sub> con capacità 100Ah e tensione nominale 3.2V, testate in precedenti attività sperimentali [4]. Per le simulazioni sono state utilizzate le seguenti caratteristiche, riportate in [4]:

**Tabella 1 – caratteristiche della cella prismatiche**

Tensione nominale [V]		3,2
Capacità nominale [Ah]		100
Dimensioni (L x W x H) [mm]		163x51x278
Peso [kg]		3,40
Energia [Wh]		320
Temperatura di esercizio (scarica) [°C]		-20 ÷ +65°C
Temperatura di esercizio (carica) [°C]		0 ÷ +45°C
Scarica @ +23°C	Max corrente continuativa [A]	300
	Corrente di picco @ 60 sec [A]	500
Carica @ +23°C	Metodo di carica	CC/CV (3,65V)
	Max corrente di carica [A]	100

Nella simulazione è stata considerata una potenza dispersa pari a 100 W e una potenza di abuso di 1000 W, con le celle poste a una distanza di 5, 10 e 20 mm e diverse velocità dell’aria (2, 5, 10, 16 m/s). In Figura 9 sono mostrati gli andamenti delle temperature dall’istante in cui inizia l’intervento di emergenza, con la  $T_{sup}=80^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{aria}=23.5^{\circ}\text{C}$  e distanza 5 mm tra le celle. In particolare a destra sono mostrate le temperature della superficie per le quattro velocità dell’aria, mentre a sinistra, per le due velocità estreme, le temperature superficiali e i corrispondenti valori al centro. Si può vedere che in superficie si ottiene un buon miglioramento aumentando la velocità, mentre al centro l’effetto è molto ridotto a causa della resistenza termica dovuta al grande spessore della cella.

In Figura 10 e Figura 11 le stesse variabili sono riportate per le distanze 10 e 20 mm. A parità di velocità dell’aria, l’aumento della larghezza del canale tra le celle ha peggiora leggermente il raffreddamento per le velocità più velocità, mentre l’effetto è quasi nullo a 2 m/s. Per quanto riguarda invece le temperature al centro, queste risentono molto meno delle variazioni in superficie a causa del ritardo dovuto alla resistenza termica, per cui i valori restano molto alti in tutti i casi esaminati.

Si tenga presente che nelle simulazioni delle celle pouch la massima differenza tra centro e superficie raramente raggiunge 1°C.

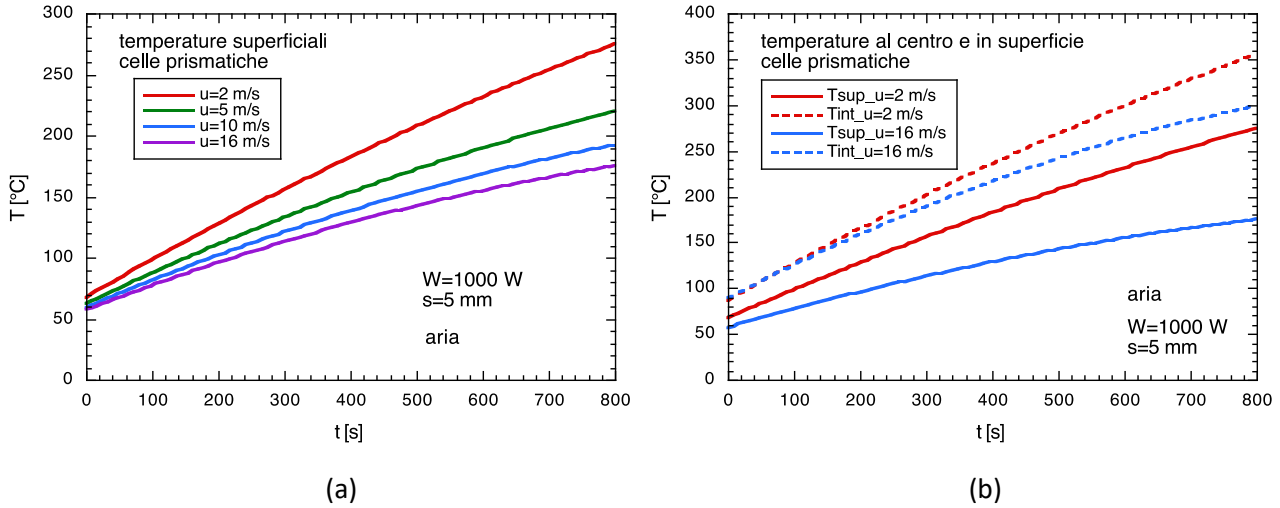


Figura 9 – Simulazione di celle prismatiche con potenza 1000 W e distanza 5 mm: a) temperature superficiali per differenti velocità dell’aria; b) temperature al centro e in superficie per due velocità

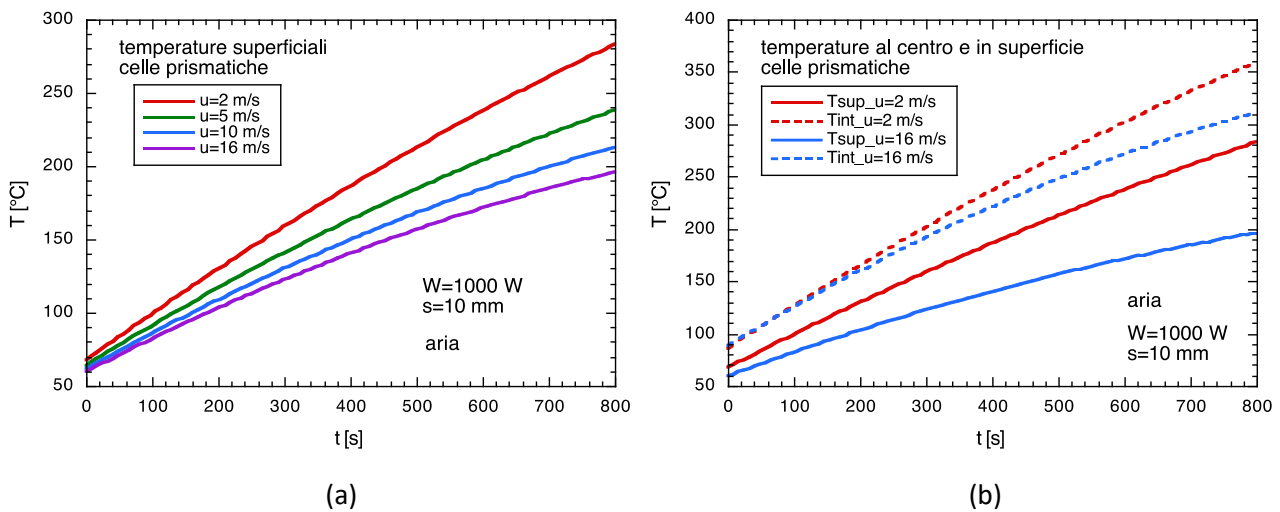
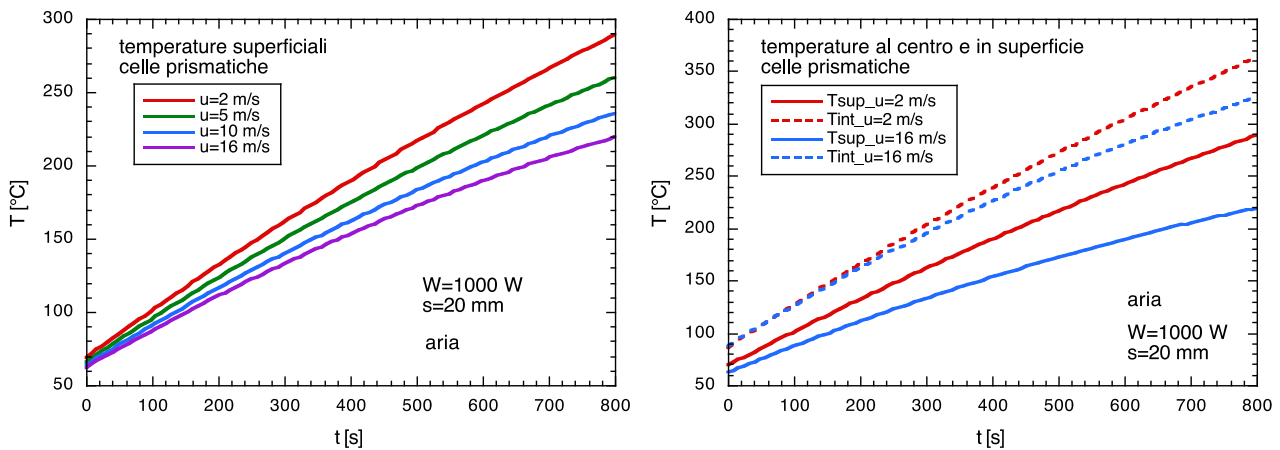


Figura 10 – Simulazione di celle prismatiche con potenza 1000 W e distanza 10 mm: a) temperature superficiali per differenti velocità dell’aria; b) temperature al centro e in superficie per due velocità

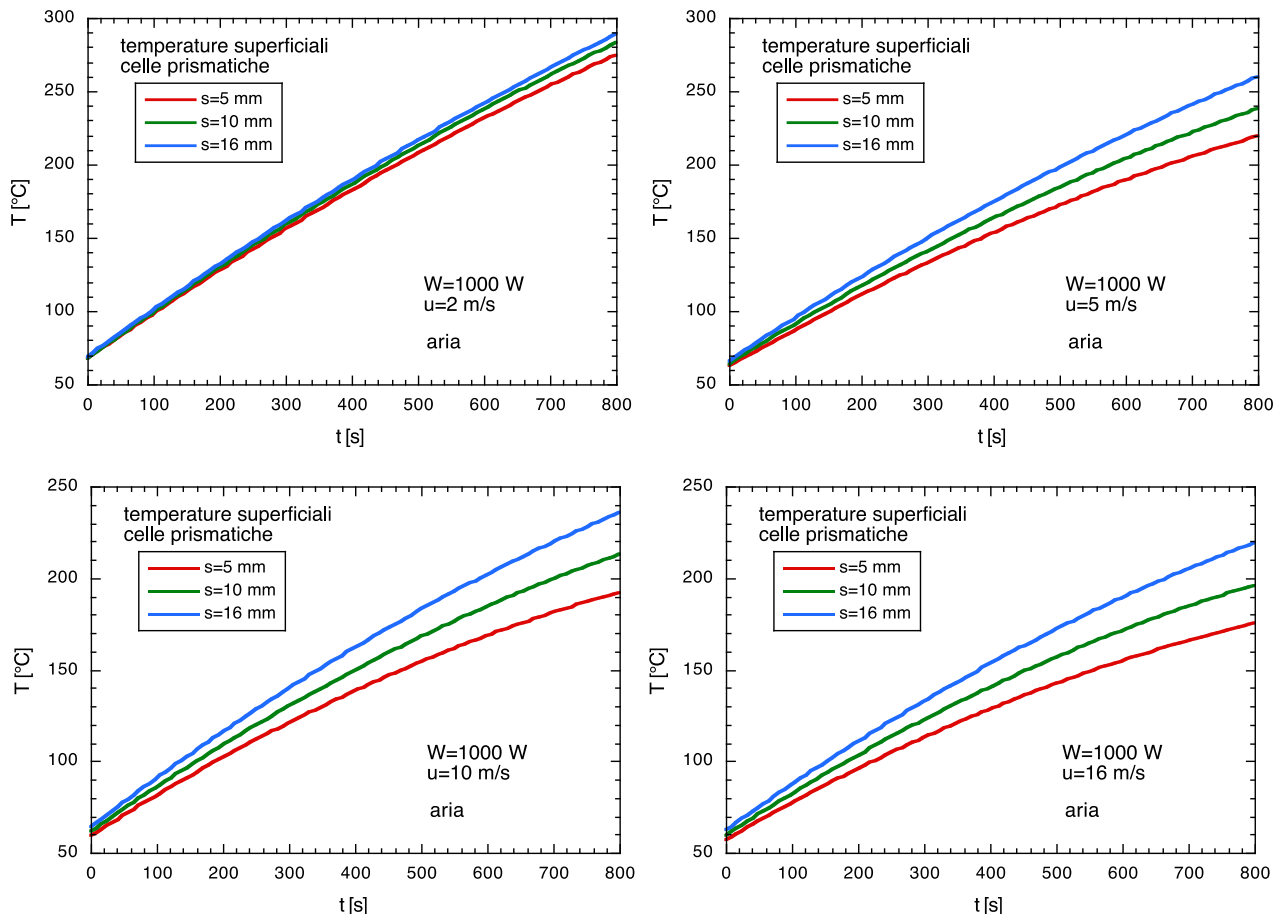


(a)

(b)

**Figura 11 – Simulazione di celle prismatiche con potenza 1000 W e distanza 20 mm: a) temperature superficiali per differenti velocità dell'aria; b) temperature al centro e in superficie per due velocità**

In Figura 12 le simulazioni sono infine confrontate a parità di velocità per evidenziare la dipendenza dallo spessore del canale. Come già notato nell'analisi delle precedenti figure, la distanza tra le celle è quasi ininfluente per le basse velocità, mentre per velocità maggiori si ha un piccolo peggioramento delle prestazioni all'aumentare della distanza.



**Figura 12 – Simulazione di celle prismatiche con potenza 1000 W: effetto della variazione della distanza alle diverse velocità dell'aria**

## 2.5 Discussione dei risultati ottenuti

L'analisi dei risultati mostra che, per le celle pouch, l'intervento di emergenza con aumento della velocità dell'aria risulta efficace solo se la nuova velocità da imporre è molto alta e la potenza termica non è elevata, nel nostro caso circa tre volte quella tipica della normale scarica alla massima corrente prevista. Per potenze maggiori l'aumento della velocità migliora il raffreddamento della cella solo quando la sua temperatura ha ormai raggiunto valori elevati, per cui non garantisce la salvaguardia verso il rischio un'evoluzione pericolosa e incontrollabile. In tutti i casi la velocità da imporre all'aria deve essere molto alta, per cui l'apparente semplicità impiantistica di tale tipo di intervento può essere in parte complicata dalla necessità di predisporre un sistema di soffiaggio molto più potente di quello dimensionato per il raffreddamento in condizioni normali. Inoltre l'efficacia tale sistema può essere fortemente ridotta in caso di rigonfiamento o deformazione della cella surriscaldata e, soprattutto nel caso di sviluppo di fiamme, non riesce a limitare in modo soddisfacente la propagazione alle celle vicine.

L'allagamento con un liquido dielettrico al contrario ha un'efficacia molto maggiore e riesce a mitigare gli effetti anche di condizioni incidentali molto più severe, soprattutto se si utilizza un liquido a bassa viscosità. In questo caso l'intervento di emergenza può essere pensato come un sistema passivo, ad esempio un serbatoio pressurizzato con la quantità di liquido sufficiente all'allagamento di una batteria e una valvola asservita al BMS che apra in condizioni di raggiungimento di una temperatura pericolosa, con una filosofia simile a quella dell'air bag. In questo modo si può mantenere la semplicità impiantistica del raffreddamento ad aria in condizioni normali aumentandone la sicurezza per le situazioni a rischio di evoluzione pericolosa verso il thermal runaway.

Per quanto riguarda le celle prismatiche i risultati sono molto meno positivi, in quanto il grande spessore rende molto meno efficace e rapido l'effetto del raffreddamento della superficie. In caso di surriscaldamento di una cella, la sua temperatura interna continua ad aumentare e raggiunge valori pericolosi anche se l'esterno è ben raffreddato, per cui in questo caso si deve prevedere un sistema di contenimento degli effetti del thermal runaway che probabilmente non si riuscirà ad evitare nella cella in crisi. Questo risultato è confermato anche da altre prove sperimentali in letteratura. Ad esempio in [5] viene provato un sistema di raffreddamento a microcanali su celle prismatiche, ma nel caso di innesco del thermal runaway (generato in questo caso dall'inserimento di una punta metallica) l'aumento della portata di acqua fredda anche di 100 volte non ha effetti apprezzabili sulla temperatura massima raggiunta all'interno nella prima fase.

### 3 Conclusioni

L'utilizzo dell'impianto sperimentale per l'emulazione del comportamento termico di batterie al Litio, ha permesso di effettuare prove di abuso termico di una cella e valutare l'efficacia di due diverse filosofie di intervento di emergenza. Partendo dalla situazione di raffreddamento ad aria delle normali dispersioni termiche tipiche di scariche intense (ma nei limiti permessi), si sono studiate le conseguenze del surriscaldamento eccessivo di una cella su quelle vicine e l'evoluzione della sua temperatura dopo interventi che prevedono, superata una temperatura di allarme, l'aumento della portata di aria o l'allagamento con liquido. In quest'ultimo caso sono stati utilizzati i due liquidi già testati nella precedente annualità, un liquido a bassa viscosità (il PFPE "Galden-HT135") e un olio silconico ("Clearco PSF-50cSt").

Sperimentalmente sono stati studiati i casi con celle pouch, equivalenti a celle Li-Ion di tipo EIG-C020, distanziate di 3 mm e con potenza di surriscaldamento di 100, 300 e 500 W (contro i 30 W massimi dispersi normalmente con scariche 5C)

Altri casi, con diverse distanze tra le celle o celle di tipo prismatico, sono stati valutati utilizzando un programma di simulazione realizzato proprio per variare rapidamente i parametri geometrici e fisici.

I risultati mostrano che l'aumento di velocità ha risultati discreti solo per potenze termiche non elevate e necessita un notevole aumento della potenza di pompaggio, mentre l'allagamento con liquido riesce a mitigare le conseguenze in modo molto più efficace.

### 4 Riferimenti bibliografici

1. F. D'Annibale, A. Lattanzi, M. Morlacca, A. Scotini, L. Simonetti, "Sistema sperimentale per la caratterizzazione delle prestazioni del sistema di gestione termica di moduli di batterie, finalizzato alla diminuzione dei rischi di thermal runaway" (ENEA), RdS/PAR2016/175, settembre 2017
2. F. D'Annibale, A. Lattanzi, M. Morlacca, A. Scotini, L. Simonetti, "Valutazione del comportamento termico di un modulo batteria utilizzando un impianto di simulazione: test sperimentali di raffreddamento in condizioni normali e/o di abuso", (ENEA), Report RdS/PAR2017/186, settembre 2018



3. R. Bubbico, B. Mazzarotta, C. Menale, “Studio dell’ottimizzazione dello scambio termico all’interno di un pacco batterie, con particolare riguardo ai sistemi di raffreddamento passivi”, (Sapienza Università di Roma), Report RdS/PAR2016/174, settembre 2017
4. F. Vellucci, G. Pede, A. Mariani, F. D’Annibale, “Sviluppo e realizzazione di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non automotive”, (ENEA), Report RdS/2012/087, Settembre 2012
5. J. Xu, C. Lan, Y. Qiao, Y. Ma, “Prevent thermal runaway of lithium-ion batteries with minichannel cooling”, Applied Thermal Engineering 110 (2017) 883–890

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

BMS	Battery Management System
H	altezza della cella [m]
I	corrente [A]
L	Lunghezza [m]
P	pressione [Pa]
s	spessore del canale (spazio tra le celle) [m]
S	superficie [m <sup>2</sup> ]
T	temperatura [°C]
t	tempo [s]
u	velocità [m/s]
V	volume [m <sup>3</sup> ]
W	potenza [W]

### ***Pedici***

i	ingresso
int	interno
max	massimo
med	valore medio
sup	superficiale
u	uscita