



Ricerca di Sistema elettrico

Valutazione del comportamento
termico di un modulo batteria
utilizzando un impianto di simulazione:
test sperimentali di raffreddamento in
condizioni normali e/o di abuso

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

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

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

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 SPERIMENTALI PER TRANSITORI CON POTENZA NORMALE	11
2.3 RISULTATI SPERIMENTALI PER TRANSITORI CON ALTA POTENZA.....	16
2.4 GRAFICI RIEPILOGATIVI DELLE PROVE SPERIMENTALI.....	22
2.5 CONFRONTO CON I RISULTATI DEL PROGRAMMA DI SIMULAZIONE.....	25
2.6 VALUTAZIONE DELLA SENSIBILITÀ ALLE VARIAZIONI DELLA GEOMETRIA	28
3 CONCLUSIONI	31
4 APPENDICE 1 - SCHEDE DEI DUE LIQUIDI.....	32
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	35
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	35

Sommario

Sono stati eseguiti numerosi test sperimentali utilizzando l'impianto realizzato nella precedente annualità, che permette di emulare quattro celle Li-Ion di tipo pouch simulandone il comportamento termico sia per potenze simili alla dispersione termica in condizioni di normale funzionamento, sia per alti rilasci di calore tipici delle condizioni di abuso e thermal runaway. Per ciascuna condizione sono stati valutati sperimentalmente diversi sistemi di raffreddamento: aria in convezione forzata a diverse velocità, un liquido per scambio termico a bassa viscosità (Galden HT135) e un olio siliconico (Clearco PSF-50cSt) entrambi a diverse velocità o in condizioni stazionarie. Nei test per condizioni di abuso, con una cella riscaldata a potenza elevata, è stata valutata anche l'influenza sulle celle adiacenti del suo aumento improvviso di temperatura.

I risultati dei test sono stati anche confrontati con le previsioni del programma di simulazione semplificato, realizzato nell'ambito del PAR2016, verificandone l'affidabilità e i limiti.

1 Introduzione

Nel corso della precedente annualità è stato realizzato un impianto sperimentale che permette di emulare in piena scala il comportamento termico di un pacco di celle, consentendo di eseguire rapidamente il confronto sperimentale tra diversi sistemi di raffreddamento. Rispetto alle prove con celle vere, questo sistema non necessita di far seguire alla scarica la fase di ricarica, solitamente più lenta ed evita di dover scaricare potenze elettriche molto elevate di cui solo una piccola parte diventa calore da asportare (di solito meno del 10%). Altro vantaggio è di permettere di ripetere le prove nelle stesse condizioni, mentre le celle vere variano la loro resistenza interna con l'invecchiamento per cui scariche della stessa intensità possono disperdere potenze termiche diverse. Infine la caratteristica di maggior interesse del sistema realizzato è la possibilità di riscaldare le celle, una in particolare nella presente configurazione, con potenze anche molto superiori a quelle che le celle vere disperderebbero in condizioni normali, anche per scariche molto intense. Questo permette di testare i sistemi di raffreddamento anche per quelle condizioni di abuso che precedono la situazione di incidente con "thermal runaway", condizioni che per essere ottenute con celle vere implicherebbero condizioni molto pericolose, fino al rischio di successivo incendio o esplosione.

L'attività si propone lo studio e il confronto delle prestazioni di diversi sistemi nella gestione termica del calore generato nelle batterie. Le celle sono disposte con una piccola distanza tra loro per ottenere dei canali di passaggio del refrigerante. Nei test del presente rapporto si prende in considerazione il raffreddamento ad aria direttamente soffiata tra le celle oppure con liquido anch'esso in contatto diretto e velocità in questo caso molto piccola. Per tali metodi di gestione termica si vuole ottenere dati sperimentali che coprano un buono spettro di condizioni (soprattutto potenze e velocità), per permettere così anche di validare l'affidabilità di modelli e sistemi di calcolo.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Descrizione dell'impianto e delle prove sperimentali

Per comodità in Figura 1 sono mostrati gli schemi dell'impianto già riportati nel precedente rapporto tecnico /1/, a cui si rimanda per la descrizione dettagliata dei componenti.

Riepilogando in breve, il circuito in alto è per le prove con raffreddamento a liquido ed è costituito da una pompa volumetrica, un misuratore di portata Coriolis, un preriscaldatore, uno scambiatore compatto per raffreddare il fluido prima della pompa, la sezione di prova costituita da un contenitore con le celle tra le quali viene fatto defluire il liquido.

La seconda parte dell'impianto (in basso) è invece costituita da un condotto per prove di raffreddamento con aria a diverse velocità ed è costituito da ventilatori per il soffiaggio dell'aria, un preriscaldatore elettrico, un anemometro, un canale di lunghezza sufficiente a ottenere il profilo pienamente sviluppato come richiesto dall'anemometro, la sezione di prova contenente il pacco di batterie;

La strumentazione prevede la misura di:

- Temperatura della superficie delle quattro celle (in tutto 14 termocoppie);
- Temperature di ingresso e uscita del fluido di raffreddamento;
- Portata del fluido;
- Pressione del fluido;
- Potenza scaldante

L'acquisizione di dati e il controllo automatico sono ottenuti usando sistema National Instruments CompactDAQ con un programma sviluppato in Labview.

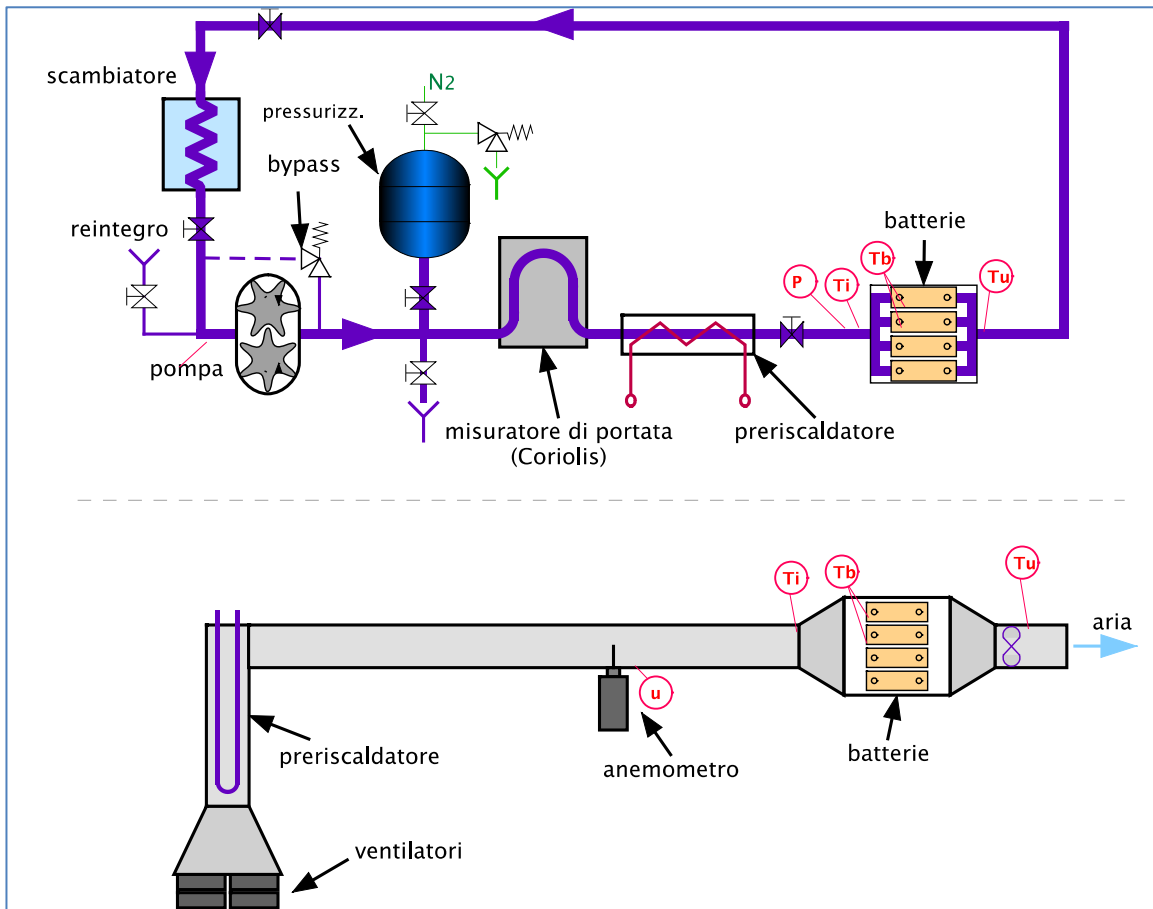


Figura 1 – schema del circuito per le prove con liquido e del condotto per quelle con aria

Per quanto riguarda le celle, è stato scelto come riferimento reale la EIG-C020 di dimensioni 12.7x19.5 mm e spessore 7 mm. Le quattro celle normali sono costituite ciascuna da un riscaldatore posto tra due lastre di acciaio e quattro strati di “coffee bag”, di cui l’ultimo viene saldato sotto vuoto per ottenere la busta di contenimento (come le celle reali EIG-C020). In una delle quattro celle è stato inoltre inserito un riscaldatore aggiuntivo nella zona vicina agli elettrodi, per simulare un riscaldamento non uniforme con presenza di macchie calde, cosa che spesso si verifica soprattutto con l’invecchiamento /2, 3/.

Si è inoltre realizzata una quinta cella (indicata come “cella_TR”), che può essere sostituita a una delle precedenti, a cui si può fornire una potenza molto più elevata per simulare il raggiungimento di condizioni di incidente e poter valutare la capacità di mitigazione e di blocco della propagazione del calore alle altre celle, da parte dei diversi sistemi di raffreddamento. In essa il riscaldatore è dimensionato per potenze maggiori e non è stato usato il coffee bag, che non avrebbe resistito alle alte temperature previste, ma il contorno tra le lastre metalliche è stato sigillato con silicone per alte temperature. In Figura 2 sono mostrate le celle con le termocoppie sulle pareti, mentre in Figura 3 è riportata la disposizione delle termocoppie su ogni faccia e la relativa numerazione che sarà in seguito utilizzata nei grafici.

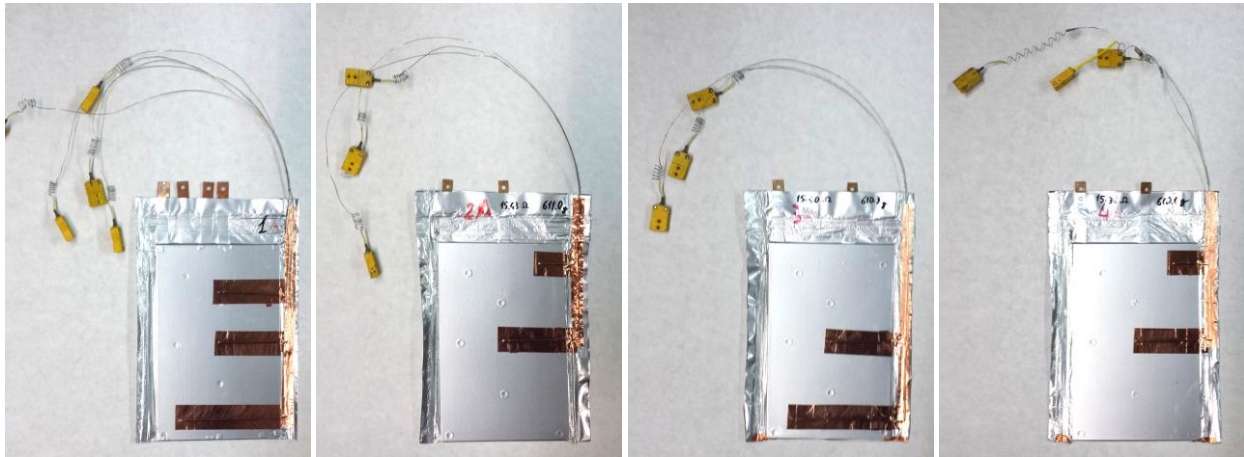


Figura 2 – le quattro celle “normali”, con le relative termocoppie, prima dell’installazione nel contenitore.

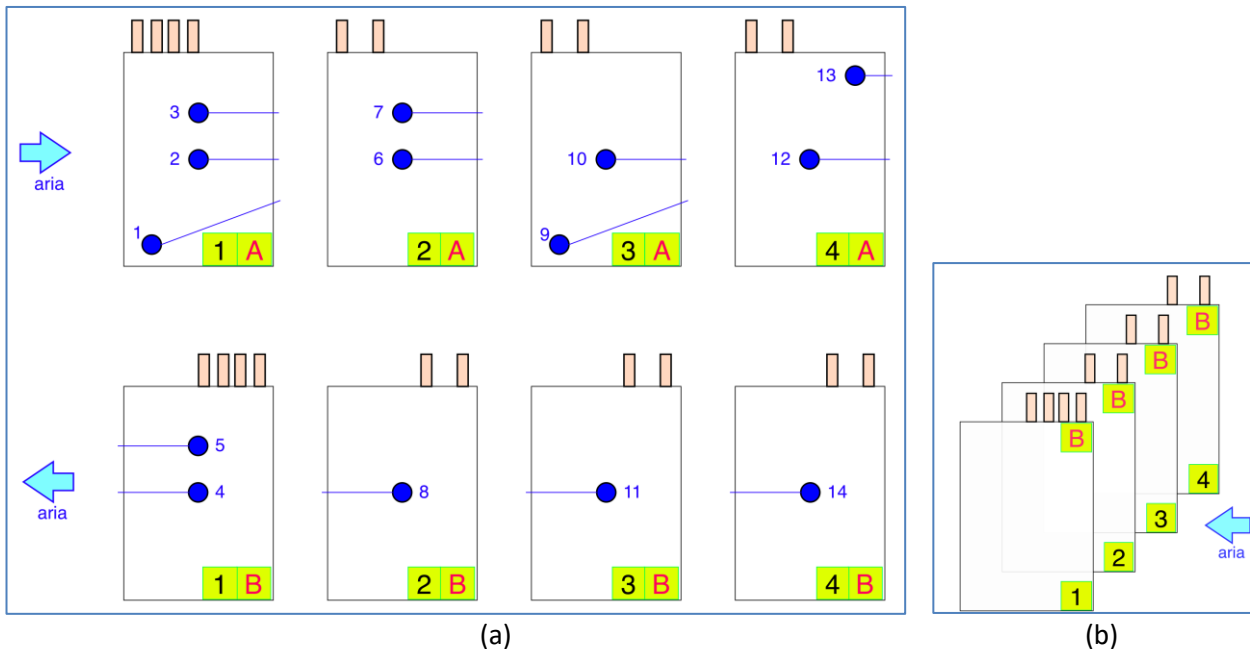


Figura 3 – a) disposizione delle termocoppie sulle facce delle celle; b) disposizione delle facce rispetto al flusso di refrigerante.

Le quattro celle sono mantenute a una distanza di 3 mm da una griglia (Figura 4a), all’interno di un contenitore aperto alle due estremità per permettere al refrigerante di scorrere orizzontalmente (Figura 4b). Il pacco così ottenuto è stato inserito nella sezione di prova con aria e poi in quella per liquido, mostrate in Figura 5. Nel primo caso l’aria è obbligata a passare attraverso l’apertura (Figura 6) e ne viene misurata la velocità e le temperature. Nel caso del liquido, il pacco è immerso nel contenitore coibentato, con la portata di liquido immessa con un tubo posizionato a metà dell’altezza del pacco e prelevata dall’altro lato per essere raffreddata e reimpressa nella pompa (Figura 7). Prima del pacco il liquido percorre un tratto divergente per rendere uniforme la velocità sulla sezione di ingresso.

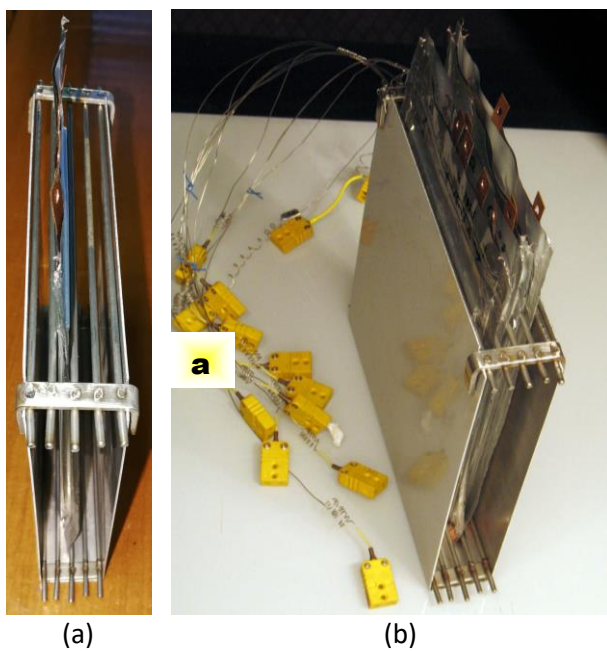


Figura 4 – contenitore e griglie di supporto delle celle; b) pacco celle completato.

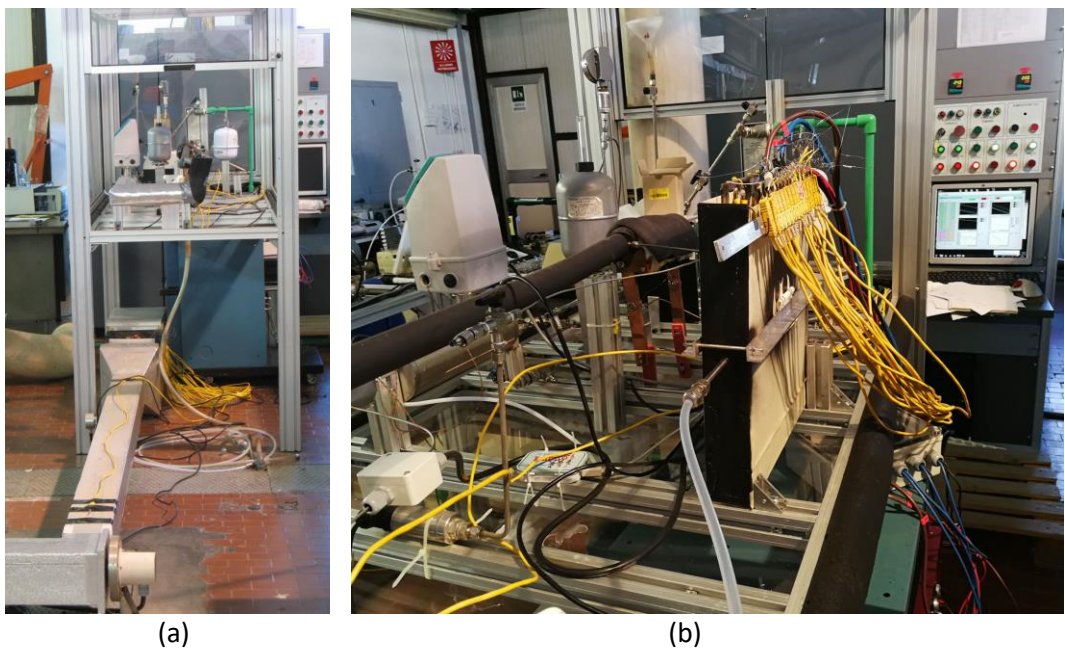


Figura 5 –a) impianto sperimentale con, in basso, il condotto per raffreddamento ad aria; b) circuito con contenitore per raffreddamento con liquido.

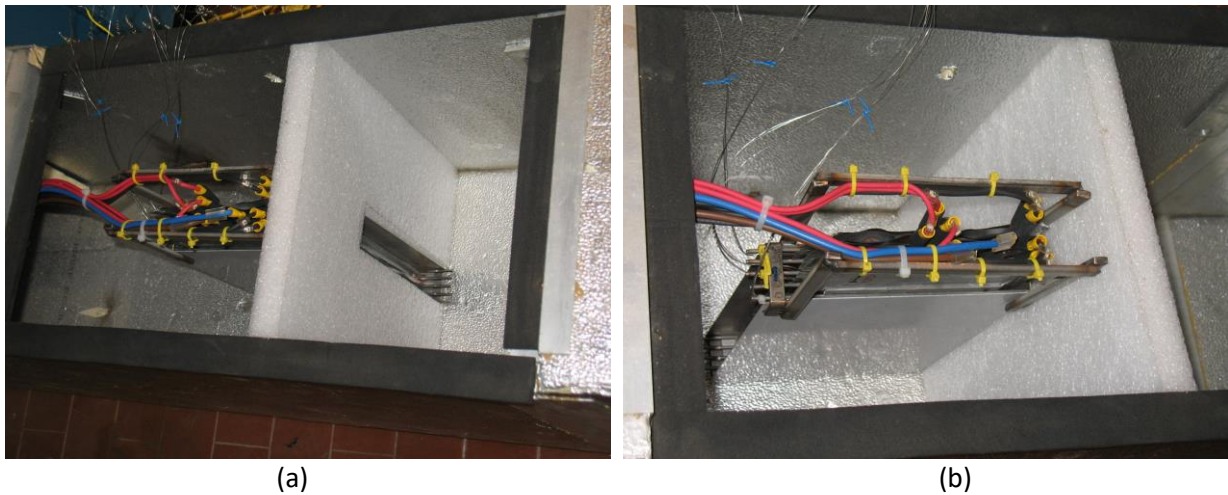


Figura 6 – sezione di prova per raffreddamento ad aria: a) vista dell’ingresso dell’aria; b) pacco celle dal lato dell’uscita dell’aria.

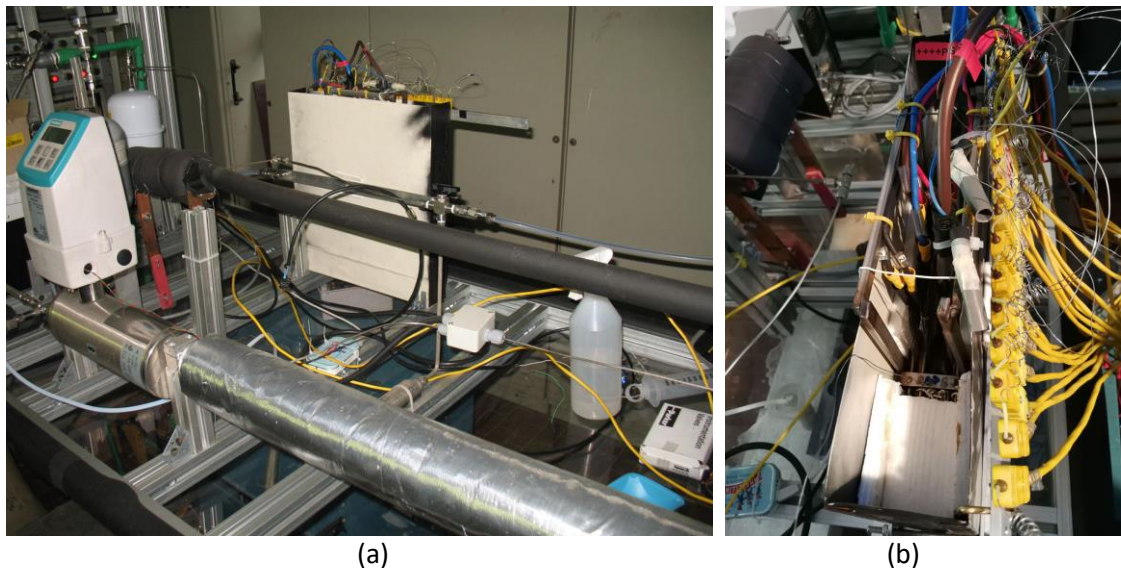


Figura 7 – a) sezione di prova per raffreddamento a liquido; b) pacco celle nel contenitore.

Le prove con aria sono state effettuate raffreddando le celle inserite in un condotto coibentato in cui viene soffiata aria con una portata prefissata. Prima di ogni prova si porta l’impianto in condizioni stazionarie, imponendo la portata di aria e aspettando che le celle non riscaldate si portino alla stessa temperatura dell’aria in ingresso. Si inizia quindi l’acquisizione dei dati e si fornisce la potenza ai riscaldatori delle celle, generando un transitorio termico con riscaldamento delle stesse.

La durata dei test è generalmente maggiore del tempo di scarica completo della cella di riferimento con la corrente che produrrebbe la potenza termica che si sta provando, a meno che non si raggiunga prima una temperatura massima. Per la maggior parte delle prove “normali” si è scelta una potenza termica di 30 W/cella, tipica di scariche 5C, per cui il tempo sarebbe 12 minuti. Le prove di abuso invece sono state interrotte in anticipo nel caso di valori eccessivi della temperatura (che quindi nella realtà avrebbero già innescato la thermal runaway).

Nelle prove con liquido le celle sono immerse in un contenitore in cui viene immesso il liquido a portata prestabilita, procedendo poi anche in questo caso come descritto per l’aria. La scelta dei liquidi è stata basata sui risultati di un’analisi effettuata nell’ambito del PAR2016 dall’Università di Roma “Sapienza” /4/.

Durante il transitorio termico sono registrate la portata e le temperature di ingresso e uscita del refrigerante, le potenze elettriche fornite alle celle e 14 temperature di parete.

Sono state eseguiti 60 transitori sperimentali, di cui 30 “normali” con potenze tra i 19 e i 43 W a cella e 30 di abuso con una cella riscaldata con alta potenza (tra 50 e 500 W) e le altre tre celle riscaldate ancora con 30 W oppure non riscaldate.

In Tabella 1 sono mostrate le principali proprietà fisiche dei fluidi utilizzati, il Polietero Perfluorato (PFPE) “Galden HT135” della Solvay e l’olio siliconico “CLEARCO PSF-50cSt”, nelle condizioni di ingresso medie delle prove (T=25°C, P=1 bar). In ultima riga è anche riportato il prezzo al litro indicativo. In Appendice 1 sono riportate le caratteristiche complete dei due liquidi.

Tabella 1 – proprietà fisiche dei fluidi utilizzati

	aria	Galden	Clearco
ρ [kg/m ³]	1.17	1720	960
c_p [J/kg-K]	1004	1000	1500
μ [kg/m-s]	1.8e-5	0.0017	0.048
k [W/m K]	0.026	0.065	0.15
costo [€/l]	-	150	26

I valori minimi e massimi dei parametri delle prove sono riassunti in Tabella 2, dove W_{norm} è la potenza fornita alle celle normali e W_{TR} quella alla cella speciale nelle prove di abuso. Le ultime due righe riportano le temperature massime raggiunte rispettivamente dalle celle normali in tutte le prove e dalla cella TR nelle prove ad alta potenza (300 e 500 W). Questa cella è stata sostituita alla cella 3 e quindi le temperature sperimentali di questa cella sono le T9, T10 e T11 (vedi Figura 3) e le temperature medie della cella e delle due facce saranno indicate rispettivamente come Tmed_3, Tmed_3A e Tmed_3B . Sempre da Figura 3 si può vedere che la faccia 3A della cella TR è adiacente alla 4B e la 3B è adiacente alla 2A.

Tabella 2 – valori dei vari parametri nelle prove sperimentali

	Aria	Galden	Clearco
u [m/s]	0 - 10	0 - 0.0082	0 - 0.0052
W_p [W]	0 - 0.61	0 - 3.9e-5	0 - 4.3e-4
G [kg/m ² s]	0 - 11.8	0 - 14.1	0 - 5.0
ΔP [Pa]	0 - 21	0 - 1.62	0 - 28.6
W_{norm} [W]	0 - 43	30	30
W_{TR} [W]	50 - 500	100 - 500	100 - 500
$T_{norm,max}$ [°C]	26 - 61	35 - 54	28 - 60
$T_{TR,max}$ [°C]	148 - 193	50 - 87	80 - 100

In Tabella 3 e in Tabella 4 sono riportate le matrici sperimentali delle prove con potenza normale e con alta potenza. Da tenere presente che i valori della velocità sono indicati in mm/s e che la corrispondente potenza di pompaggio, definita in seguito dalla eq. (1), è indicativa in quanto dipende dalle condizioni della singola prova.

Tabella 3 – matrice sperimentale delle prove normali

FLUIDO	Aria						Galden						Clearco				
u [mm/s]	0	2e3	4e3	6e3	8e3	10e3	0	0.2	1.02	2.05	4.1	8.2	0	0.389	0.77	1.55	3.89
W_p [mW]	0	24	98	220	390	610	0	2e-5	6e-4	2.4e-3	0.01	0.04	0	2.4e-3	9.5e-3	0.04	0.24
W [W]	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30, 43	30	30, 43	30	30	30	30	30	30, 43	30, 43	30	30

Tabella 4 – matrice sperimentale delle prove ad alta temperatura

FLUIDO	Aria					Galden					Clearco						
u [mm/s]	0	2e3	4e3	6e3	10e3	0	1.02	4.1	4.1	8.2	0	0.77	1.55	1.55	3.89	4.8	5.2
Wp [mW]	0	24	98	220	610	0	6e-4	0.01	0.01	0.04	0	9.5e-3	0.04	0.04	0.24	0.38	0.43
W [W]	0,30	0,30	0	0	0	0	0	0	30	0	0,30	0	0	30	0	0,30	0
W_{TR} [W]	300	100,300	50,300	300,500	300,300	300	300	300,500	100,300	300,500	300	300,500	300	100,300,500	300,500	300	300

2.2 Risultati sperimentali per transistori con potenza normale

La prima serie di prove è stata eseguita con le celle “normali” e quindi con potenza termica bassa, equivalente a quella generata nelle batterie nel loro funzionamento in condizioni abbastanza spinte ma nei limiti permessi dal costruttore. Tenendo conto delle prove sperimentali eseguite ciclando celle EIG-C020 /1/ sono state scelte due potenze, 19 W e 30 W, equivalenti alla dispersione termica in scariche rispettivamente 4C e 5C (valore massimo consentito). Sono state fatte anche alcune prove con 43 W, considerando una scarica 5C con cella molto invecchiata, anche se questo è molto improbabile dato che in tal caso l’aumento del riscaldamento per la maggiore resistenza interna viene di solito compensato dalla minore capacità e quindi dall’impossibilità di fornire la scarica alla massima corrente per un tempo abbastanza lungo.

In Figura 8 sono mostrati gli andamenti per alcune prove ripetute in giorni diversi durante la campagna sperimentale, per verificare la ripetibilità dei risultati. Si tratta delle prove con potenza 30 W velocità dell’aria 2 m/s e quella a 10 m/s. Si può vedere che il risultato è soddisfacente, infatti gli andamenti sono molto simili e la differenza, dovuta solo alla diversa temperatura iniziale, rimane pressoché costante in tutto il transitorio.

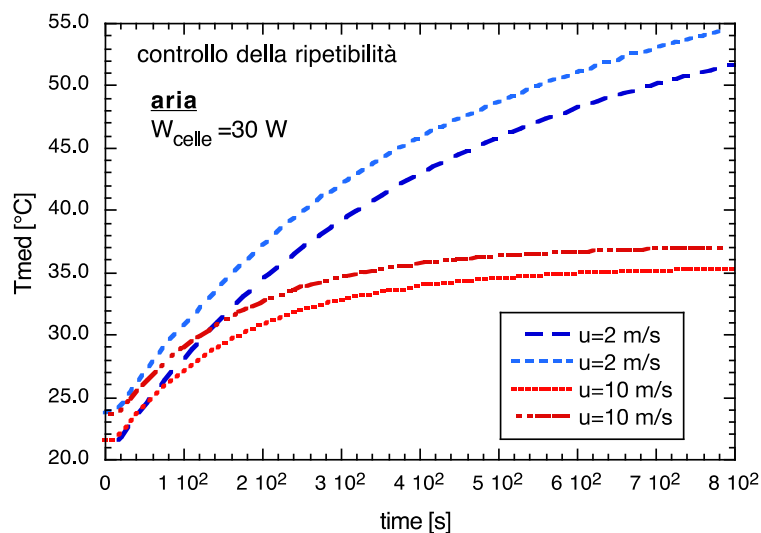


Figura 8 – Prove di ripetibilità

In Figura 9 sono riportati i test con tutte le celle a 19 W e velocità dell’aria da 0 a 10 m/s, per un tempo superiore ai 900 s della scarica completa per corrente 4C. Solo nel caso con aria ferma si sono superati i 60°C prima di tale tempo, mentre già i 2 m/s si sono dimostrati sufficienti a mantenere le celle abbondantemente sotto i 45°C.

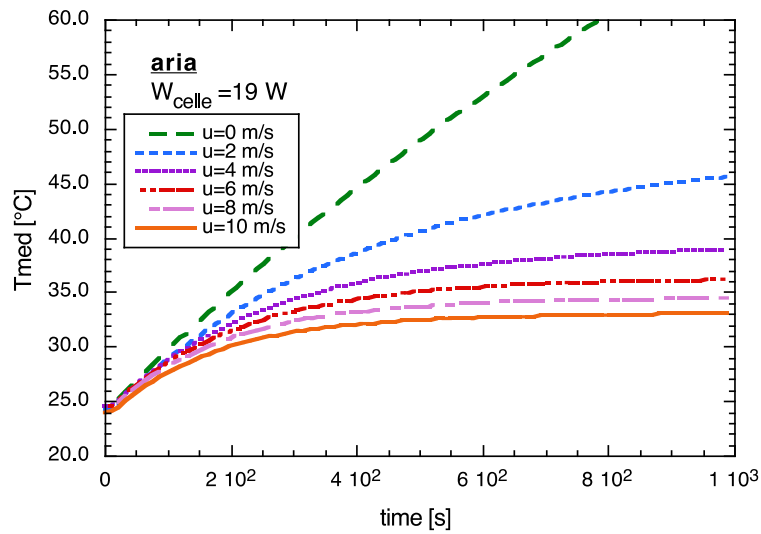


Figura 9 –Aria: temperatura superficiale media in transitori con potenza 19 W a diverse velocità

Con potenza 30 W, tipica della scarica 5C e a cui corrisponderebbe quindi un tempo di scarica di 720 s, sono stati eseguiti i test simili per i tre fluidi. In particolare in Figura 10 è mostrato l’andamento delle temperature medie delle celle per diverse velocità dell’aria, in Figura 11 e Figura 12 gli andamenti per i due liquidi a quattro velocità. Da notare che le velocità corrispondono a potenze di pompaggio notevolmente diverse, ad es. i valori massimi corrispondono a $W_p=610$ mW per l’aria, 0.04 mW per il Galden e 0.24 mW per il Clearco. Quindi il Galden permette di utilizzare potenze di pompaggio notevolmente più basse, al limite prossime a zero in quanto anche con liquido fermo la temperatura non supera i 45°C dopo 15 minuti. Con l’aria ferma invece si superano i 60°C in meno di 8 minuti e per rimanere sotto i 50°C bisogna avere una $u>2$ m/s, cioè $W_p>24$ mW. Con il Clearco si ha una situazione intermedia. In Figura 13 sono confrontati gli andamenti delle temperature medie per la stessa velocità dell’aria e diverse potenze.

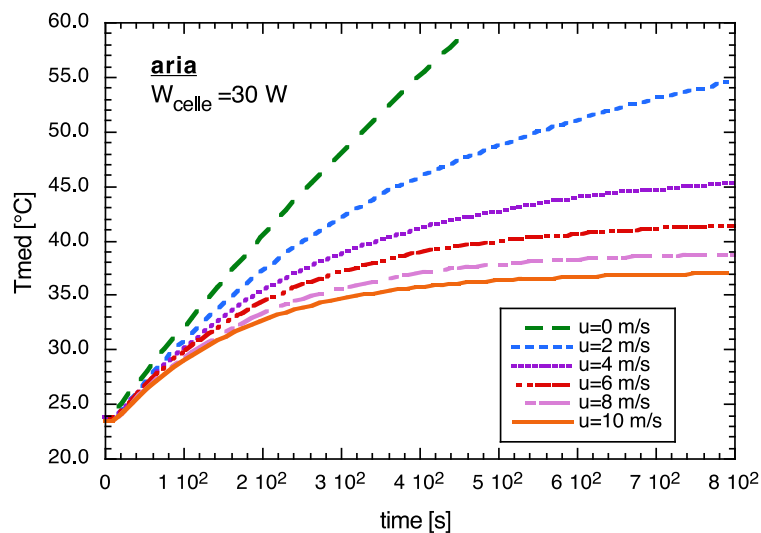


Figura 10 –Temperatura superficiale media in transitori con potenza 30 W e aria a diverse velocità

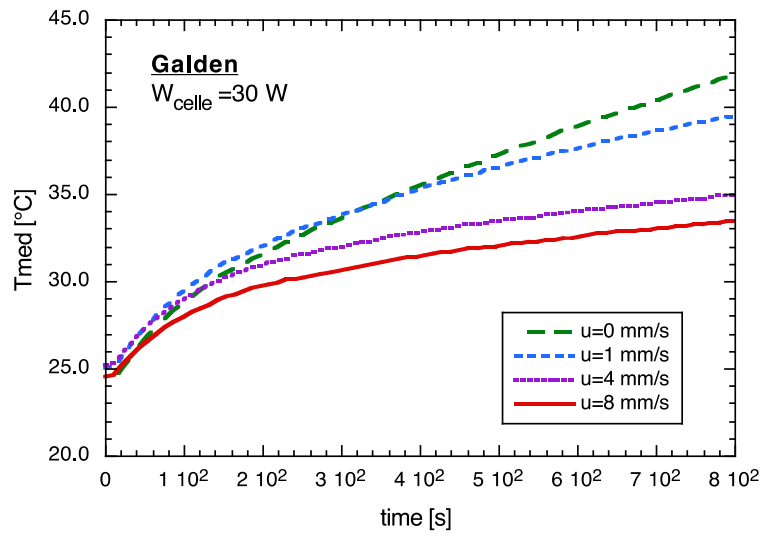


Figura 11 –Temperatura superficiale media in transistori con potenza 30 W e Galden a diverse velocità

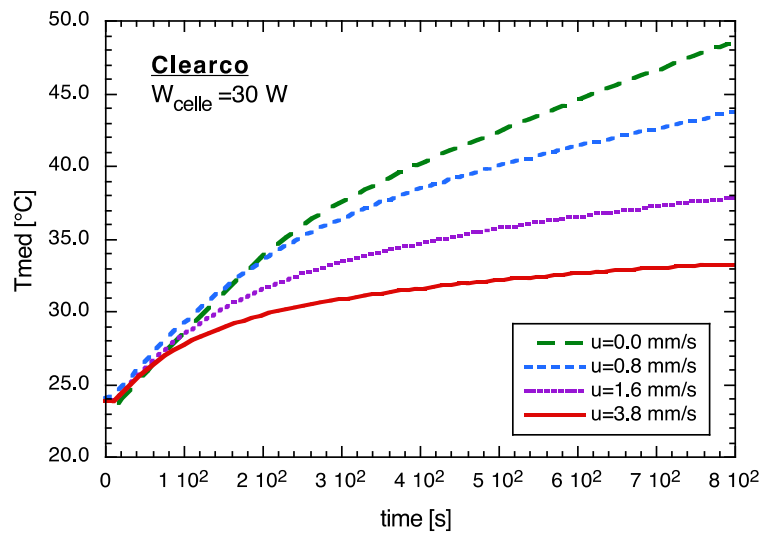


Figura 12 –Temperatura superficiale media in transistori con potenza 30 W e Clearco a diverse velocità

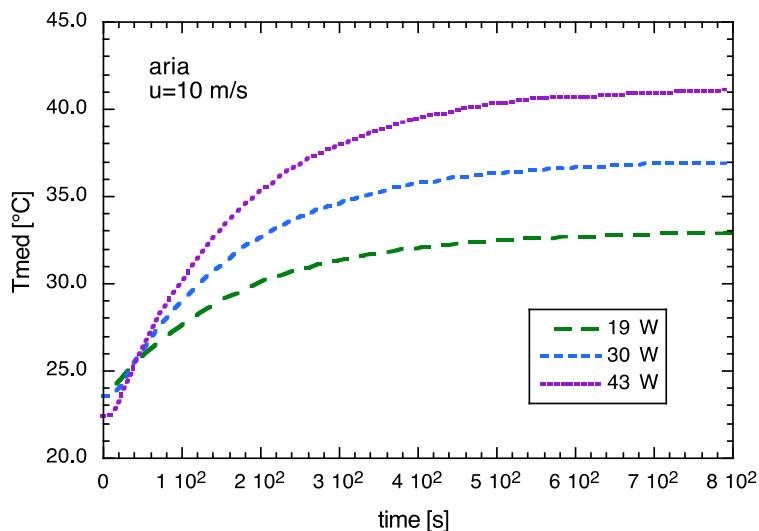


Figura 13 –Aria: temperatura superficiale media in transistori con velocità 10 m/s e diverse potenze

Le precedenti prove a 30 W saranno ora mostrate più in dettaglio, con grafici separati per ogni velocità e visualizzazione delle temperature medie delle singole facce. In Figura 14 è mostrata l’evoluzione delle temperature di ogni faccia e di quella media globale per le prove con aria, in Figura 15 quelle con il raffreddamento con il polietere perfluorato Galden-HT135 ed in Figura 16 con l’olio silconico Clearco PSF-50. La differenza tra le facce è legata alla posizione, con quelle esterne che si scaldano meno essendo il rispettivo canale scaldato solo su un lato. Inoltre le prove con i liquidi sono state effettuate con la cella 3 già sostituita dalla cella TR, che ha una resistenza termica minore non avendo gli strati di materiale plastico ed essendo quindi dedicata soprattutto alle prove ad alta potenza. Comunque la variazione tra le facce rispetto alla Tmedia aumenta con la velocità, cioè al diminuire della temperatura massima. Quindi anche se alcune facce hanno temperature più alte, sono confermate le conclusioni tratte dalle precedenti figure globali, e cioè che per il raffreddamento delle celle nel loro normale funzionamento le prestazioni migliori sono date dal Galden, seguito dall’altro liquido ed infine dall’aria. Comunque anche con quest’ultima si riesce a rimanere in condizioni accettabili se si fornisce una portata non bassissima, sempre però tenendo conto che la temperatura maggiore a fine transitorio dovrà essere abbassata prima di una nuova scarica. Come si vede in Figura 17, con l’aria a bassa velocità e temperatura iniziale abbastanza alta, il tempo necessario a tornare vicino ai 25°C è intorno a 20 minuti. Questo non è un problema in caso di ricarica normale, che ad es. per le nostre celle di riferimento va effettuata a 1C e quindi richiede un’ora. Può essere importante invece per la ricarica rapida dove, oltre al tempo più breve, si ha una produzione di calore ulteriore durante la carica che ritarderà il raffreddamento.

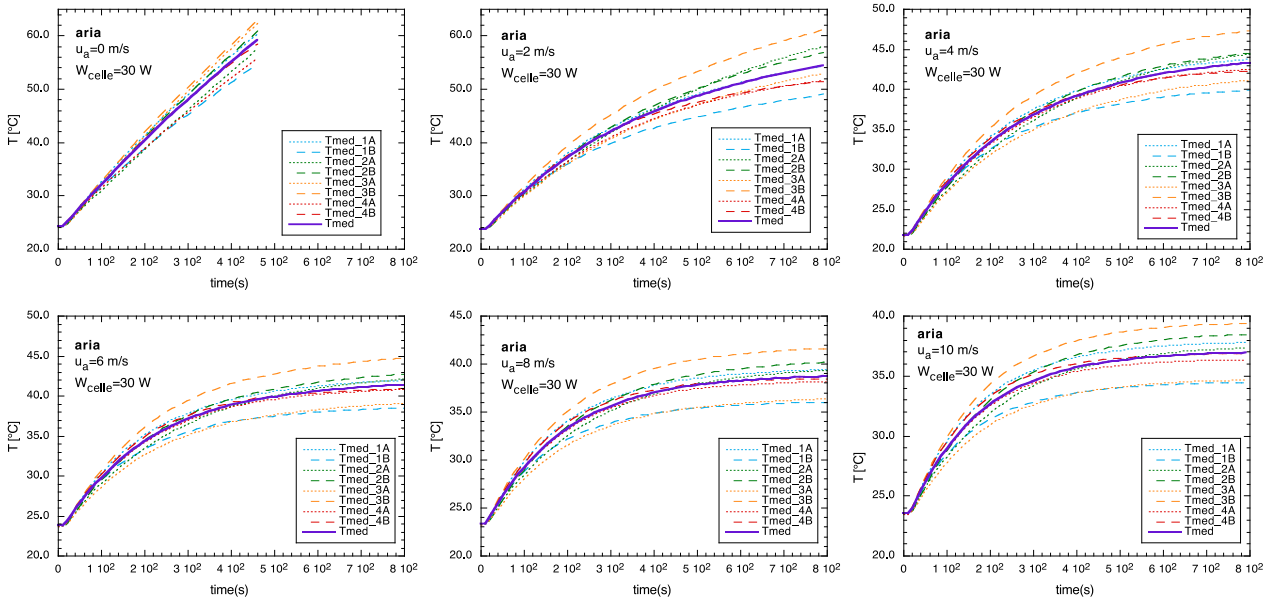


Figura 14 –Temperatura superficiale media in transistori con potenza 30 W e aria a diverse velocità

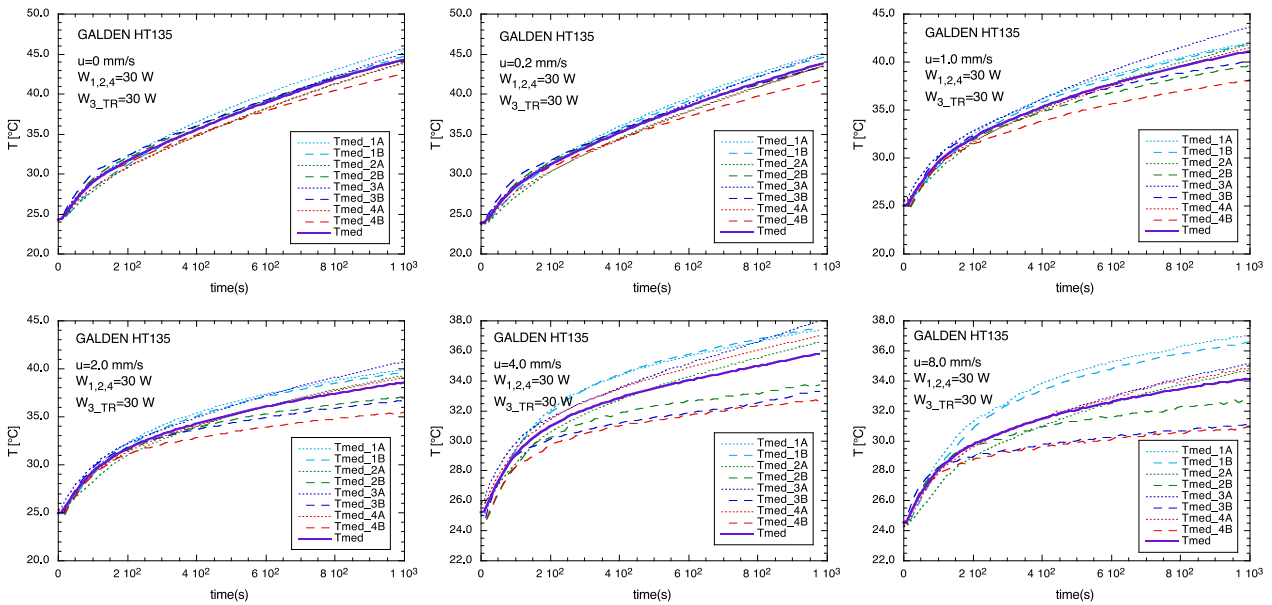


Figura 15 –Temperatura superficiale media in transistori con potenza 30 W e Galden a diverse velocità

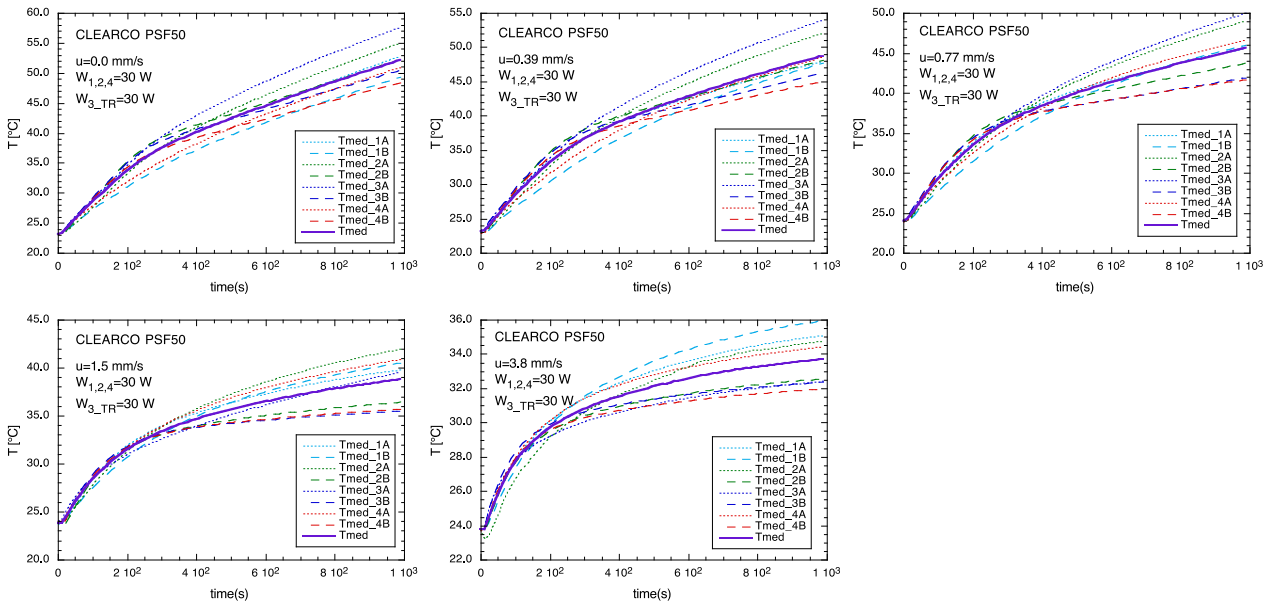


Figura 16 –Temperatura superficiale media in transistori con potenza 30 W e Clearco a diverse velocità

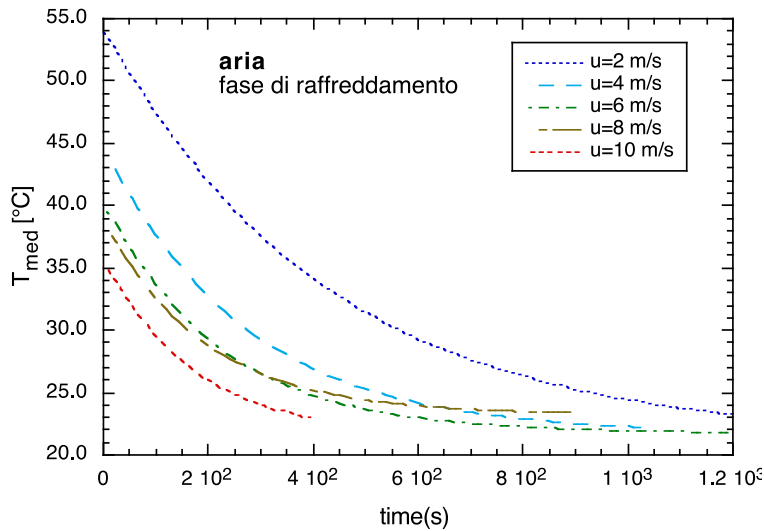


Figura 17 –Temperature medie durante il raffreddamento, con aria a diverse velocità

2.3 Risultati sperimentali per transistori con alta potenza

I test per simulare le condizioni di abuso sono stati eseguiti fornendo una alta potenza alla cella 3, che sarà indicata anche come cella_TR (Thermal Runaway), mentre alle altre celle è stata fornita la potenza di 30 W oppure potenza nulla per verificare l'effetto del riscaldamento eccessivo della cella TR sulle altre. La potenza alla cella TR nella maggior parte delle prove è stata 300 o 500 W, come riportato in Tabella 4. Considerando la temperatura media della superficie della cella TR e di quella della faccia ad essa contrapposta di una delle due celle normali adiacenti (si è scelta la cella T2, faccia A, disposta come si vede in Figura 3 e a distanza di 3 mm), verranno mostrati per ogni fluido tre grafici con gli andamenti per i transistori con potenza 300 W alla sola cella TR, quelli con 300 W alla TR e 30 W alle altre e quelli con 500 W alla TR. Essi vogliono simulare tre tipologie di evento pre-incidentale: quello con inizio del Thermal

Runaway in una cella e intervento del BMS con distacco delle altre celle, quello con assenza di intervento e quindi con le altre celle che continuano ad alimentare le utenze, infine quello equivalente al primo ma con potenza termica ancora maggiore per valutare l'effetto delle variazioni di essa (a tal fine sono state eseguite anche poche prove con potenza alla TR più bassa, 100 e 50 W).

Con l'aria si vede che l'effetto dell'aumento della W_{TR} da 300 W (Figura 18 e Figura 19) a 500 W (Figura 20) è notevole, infatti in quest'ultimo caso a parità di velocità la temperatura dopo 3 minuti supera 180°C contro i 120°C con 300 W. La presenza del riscaldamento delle altre celle invece non ha effetto sulla cella TR ed è abbastanza piccolo sulle altre. Comunque quelle vicine alla TR subiscono un riscaldamento da essa, molto più evidente per basse velocità dell'aria. Ad esempio con $u=0$ m/s la $W_{TR}=300$ W le può portare dopo 3 minuti a oltre 40°C se non hanno generazione interna di calore e a superare i 54°C se sono contemporaneamente scaldate anche dai 30 W, mentre con $u=2$ m/s si passa da 31 a 41°C (da Figura 10, con 30 W a tutte le celle esse si portavano rispettivamente a 39 e 36°C). Inoltre il raffreddamento ad aria si dimostra non adeguato a contrastare situazioni di abuso con riscaldamento anomalo, in quanto la cella coinvolta verrebbe a superare i 90°C in un tempo abbastanza rapido (intorno a un minuto) anche con velocità dell'aria molto alta, visto che il primo tratto della salita è pressoché indipendente dalla velocità in tutti i tre grafici.

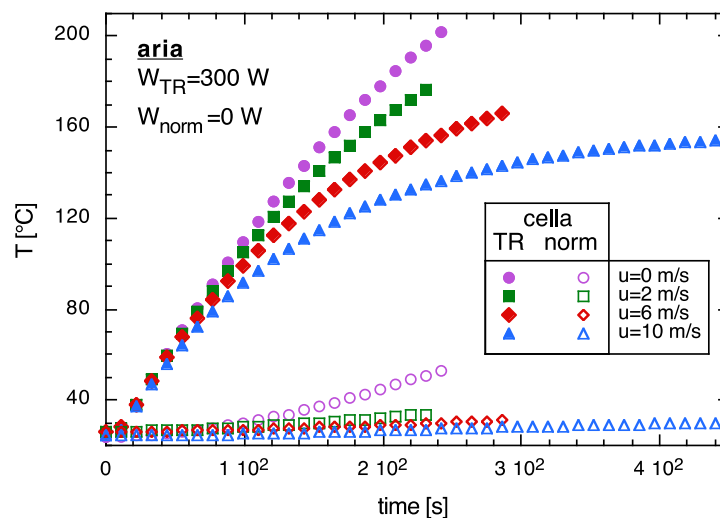


Figura 18 – Aria a diverse velocità: cella TR e cella “normale” (T2A) - $W_{TR}=300$ W, W_{norm} nulla

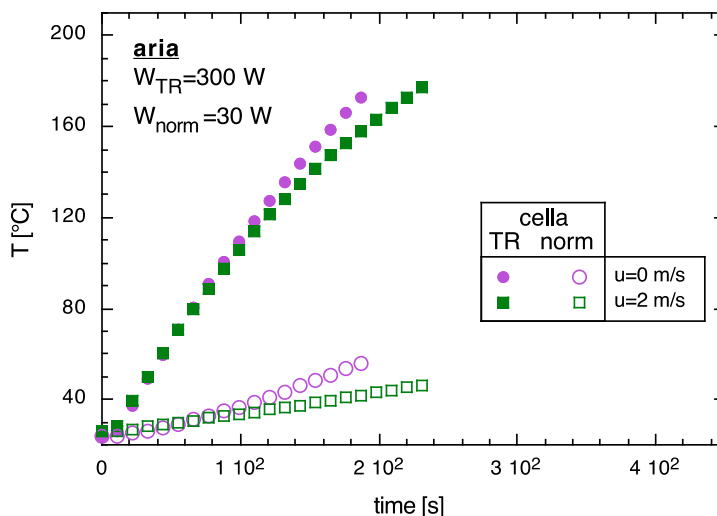


Figura 19 – Aria a diverse velocità: cella TR e cella “normale” (T2A) - $W_{TR}=300\text{ W}$, $W_{norm}=30\text{ W}$

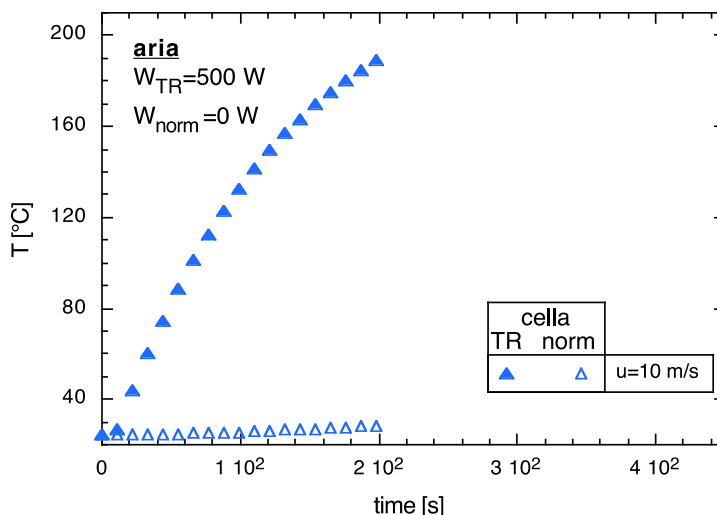


Figura 20 – Aria a diverse velocità: cella TR e cella “normale” (T2A) - $W_{TR}=500\text{ W}$, W_{norm} nulla

Col liquido Galden-HT135 i risultati sono completamente diversi, permettendo anche a liquido fermo di contenere la temperatura della cella calda sotto gli 80°C se $W_{TR}=300\text{ W}$ (Figura 21 e Figura 22) e poco sopra per $W_{TR}=500\text{ W}$ (Figura 23). Le celle adiacenti invece vengono riscaldate dallo strato di liquido a temperature anche maggiori dell’aria. Questo comportamento deriva dal fatto che con il liquido il riscaldamento innesca una convezione naturale che si aggiunge a quella forzata e, dato che si sono utilizzate velocità molto basse, diventa rapidamente predominante. Questo spiega quindi la piccola differenza di comportamento anche con velocità nulla ed è evidenziato dal netto cambio di pendenza tra 60 e 100 s. Spiega inoltre la maggiore influenza sulle celle adiacenti, in quanto nel suo moto verticale nel canale di 3 mm il liquido a temperature via via maggiori va in contatto con l’altra parete scaldandola. L’effetto dell’aumento della potenza da 300 a 500 W è praticamente nullo, mentre l’ulteriore potenza di 30 W alle altre celle porta a un moderato incremento della loro temperatura (con $u=4\text{ mm/s}$ si passa da 46°C a 53°C dopo 600 s).

Il Galden quindi limita fortemente le conseguenze del riscaldamento anomalo di una cella, riuscendo ad asportare anche 500 W senza eccessivi aumenti di temperatura. Inoltre, come vedremo in seguito, la potenza di pompaggio è molto minore di quella necessaria per l'aria.

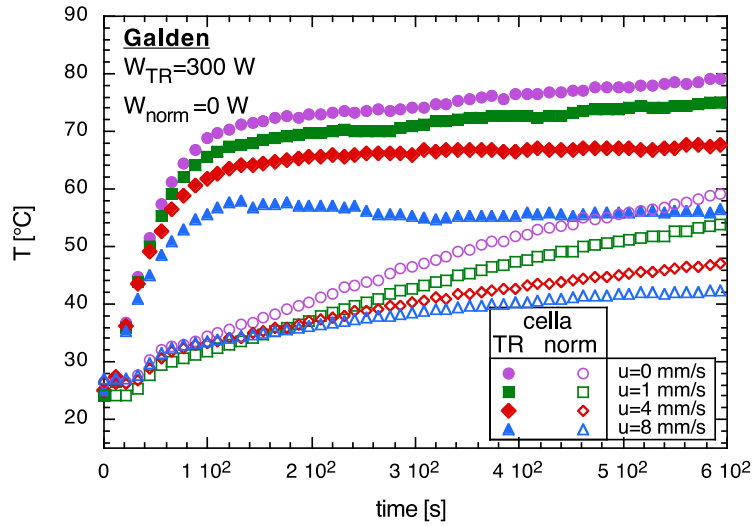


Figura 21 – Galden a diverse velocità: cella TR e cella “normale” (T2A) - $W_{TR}=300\text{ W}$, W_{norm} nulla

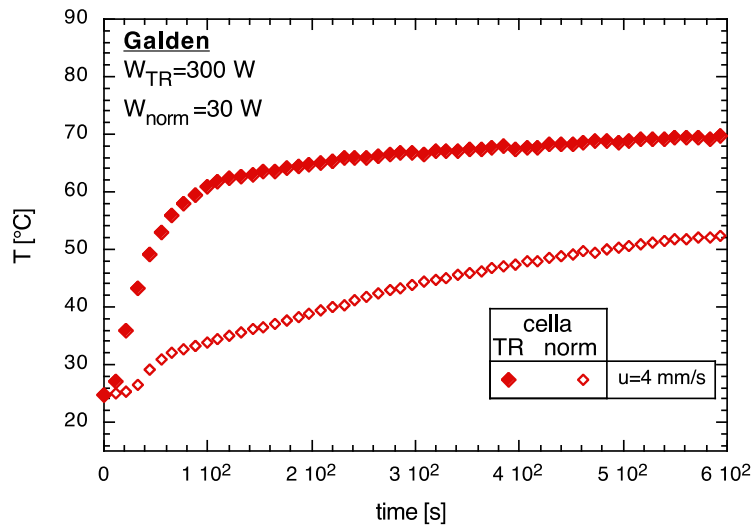


Figura 22 – Galden a diverse velocità: cella TR e cella “normale” (T2A) - $W_{TR}=300\text{ W}$, $W_{norm}=30\text{ W}$

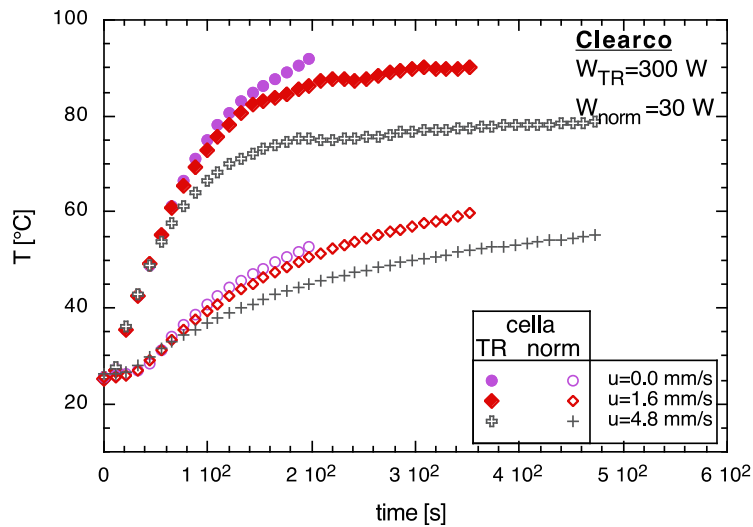


Figura 25 – Clearco a diverse velocità: cella TR e cella “normale” (T2A) - $W_{TR}=300\text{ W}$, $W_{norm}=30\text{ W}$

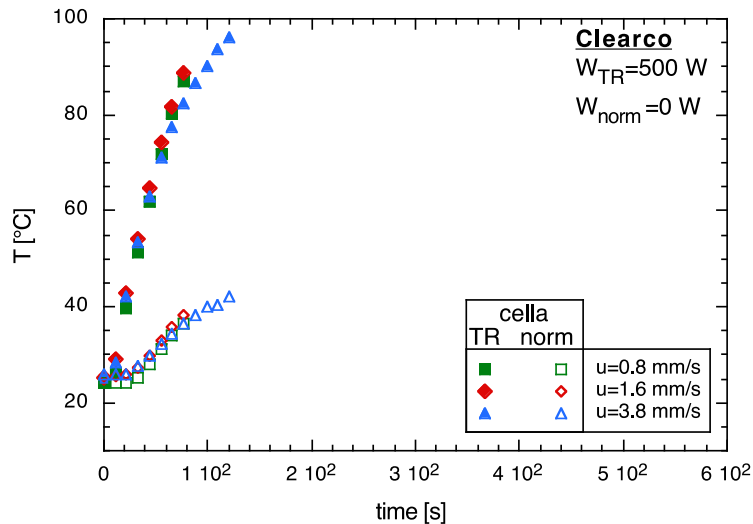


Figura 26 – Clearco a diverse velocità: cella TR e cella “normale” (T2A) - $W_{TR}=300\text{ W}$, $W_{norm}=30\text{ W}$

Un altro interessante confronto è con potenza più bassa, $W_{TR}=100\text{ W}$, e $W=30\text{ W}$ alle altre celle. In Figura 27 si vede l'andamento delle temperature per i tre fluidi per una tipica velocità ciascuno. Anche in questo caso si vede chiaramente il miglioramento nel passaggio dall'aria al Clearco ed infine al Galden. I primi due hanno un comportamento simile della T_{TR} nella prima parte, ma dopo circa 2 minuti con il Clearco smette di aumentare mentre con l'aria si raggiungono temperature molto alte. La temperatura della cella adiacente invece aumenta nello stesso modo con aria e Clearco, molto meno con il Galden.

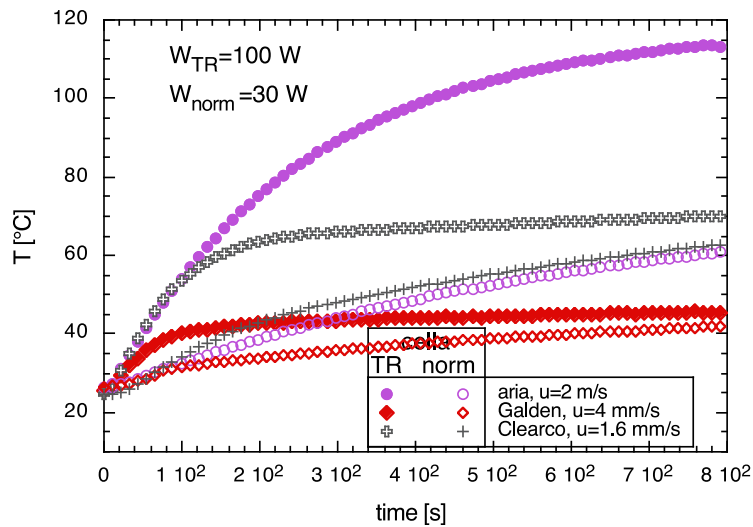


Figura 27 – Cella TR e cella “normale” (T2A) - confronto tra i fluidi con W_{TR}=100 W, W_{norm}=30 W

2.4 Grafici riepilogativi delle prove sperimentali

Le differenti prestazioni tra i diversi fluidi viste nei paragrafi precedenti sono state evidenziate con prove sperimentali in cui le velocità erano molto diverse, essendo fluidi con proprietà fisiche estremamente differenti e che quindi che non permettevano un criterio di scelta univoco (tipiche scelte possono essere di solito stessa velocità, portata, portata specifica, numero di Reynolds o altro).

Un confronto che però sembra interessante è in funzione della potenza di pompaggio, in quanto è un parametro che può incidere sul il rendimento complessivo del sistema di accumulo elettrico. La potenza di pompaggio minima teorica è:

$$W_p = Q D_p \quad \text{dove:} \quad D_p = f \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2} \quad (1)$$

In Figura 28 sono mostrate le temperature T3 raggiunte dalla cella TR dopo 60 e 180 s, per le tre potenze termiche e i differenti fluidi, in funzione della potenza di pompaggio. In Figura 29 le stesse T3 dopo 360 e 720 s. Il liquido fermo (W_p=0) è stato imposto a W_p=10⁻⁷ per poter usare la scala logaritmica, per cui i simboli a tali W_p sono in realtà a velocità nulla. Inoltre i simboli in Figura 29 sull’asse orizzontale superiore sono in realtà prove interrotte prima dei 360 o 720 s per temperatura eccessiva e mostrano solo che per quelle prove non si dispone del dato.

Il risultato più evidente è che con l’aria, nonostante la potenza di pompaggio molto maggiore, a parità di calore fornito si hanno sempre le temperature più alte. Tra i due liquidi la differenza, anche se minore, è comunque rilevante: con l’olio silconico la temperatura aumenta più rapidamente nonostante la potenza di pompaggio sia circa 10 volte quella del Galden. Inoltre mentre il Galden limita l’aumento della T3 a meno di 90°C anche dopo tempi lunghi, con il Clearco in molti casi si superano i 100°C entro i 4 minuti.

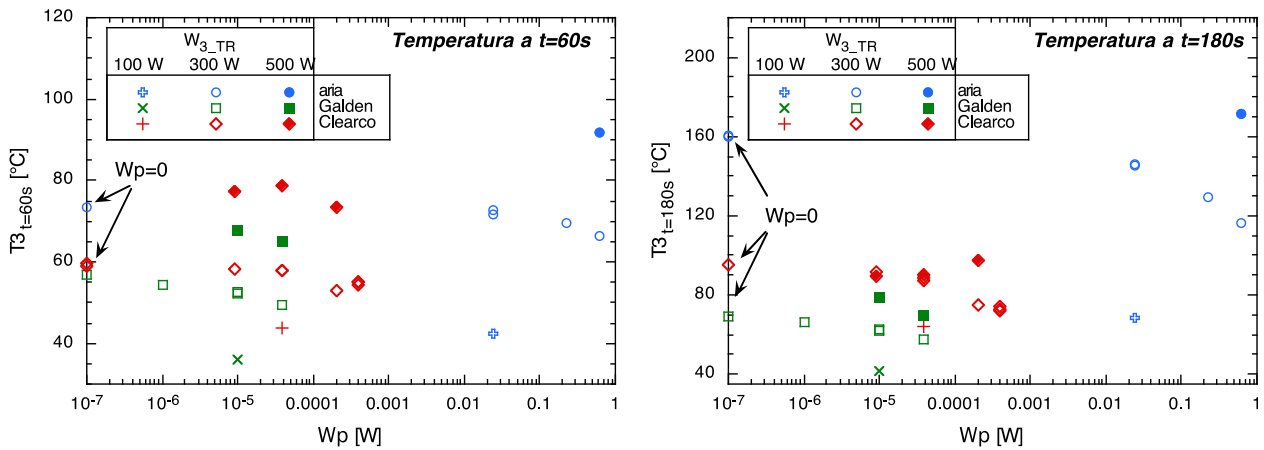


Figura 28 – Temperature della cella TR dopo 60 s e 180 s in funzione della potenza di pompaggio, per tre potenze. Il liquido fermo ($W_p=0$) è stato imposto a 10^{-7} per poter usare la scala logaritmica

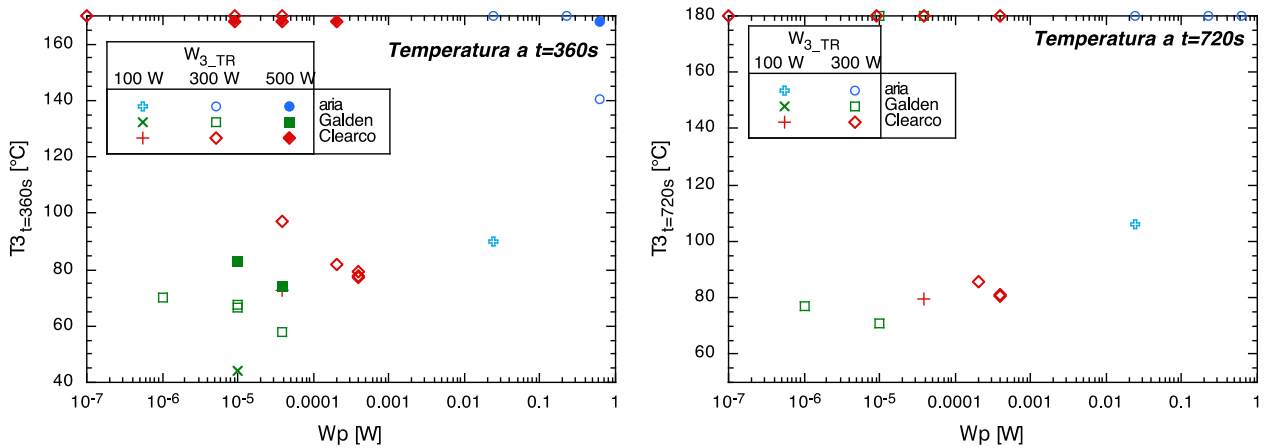


Figura 29 – Temperature della cella TR dopo 360 s e 720 s in funzione della potenza di pompaggio, per tre potenze.

In Figura 30 è mostrato il tempo necessario per raggiungere tre temperature, evidenziando quindi la rapidità del transitorio. All'inizio, fino a 40°C, il comportamento è simile in quanto l'inerzia termica della cella è predominante rispetto allo scambio termico con il fluido nel limitare il gradiente di temperatura. Tra i 40 e i 60°C invece inizia a delinarsi la differenza di scambio termico che poi diventa evidente a 90°C, che con il Galden sono raggiunti mai, col Clearco solo in alcuni casi e con l'aria sempre.

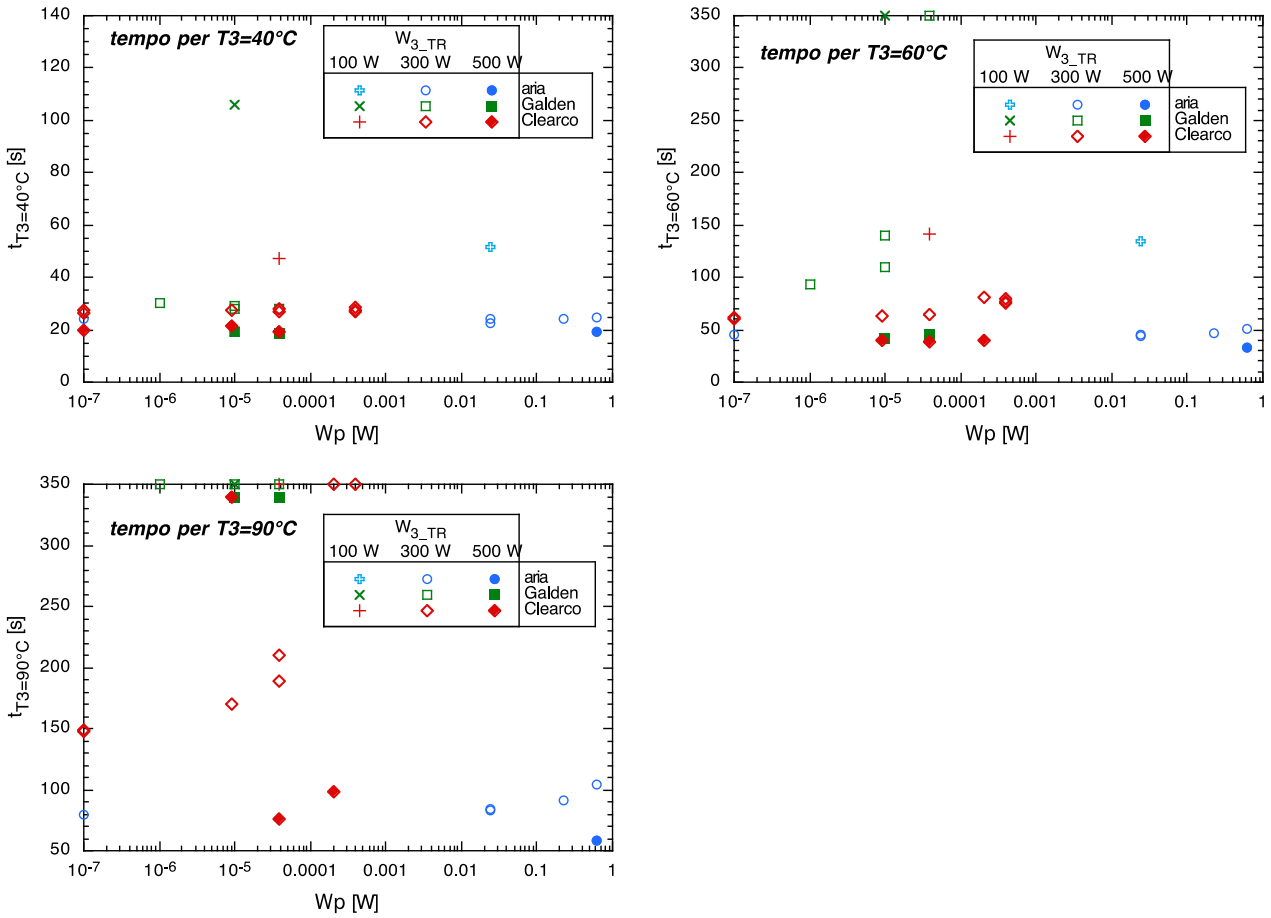


Figura 30 – Tempo impiegato dalla cella TR a raggiungere 40, 60 e 90°C, in funzione della potenza di pompaggio, per tre potenze.

Come ultime rappresentazioni riepilogative, in Figura 31 sono mostrati i confronti tra le temperature delle celle normali e quelle della cella TR dopo 60 e 180 s, dai quali si può apprezzare l’influenza della cella calda sulle altre. Infine Figura 32 evidenzia le disuniformità della distribuzione di temperatura tra le celle, riportando la temperatura media in funzione di quella massima nelle prove con le celle normali. Con i liquidi la temperatura superficiale presenta le maggiori differenze.

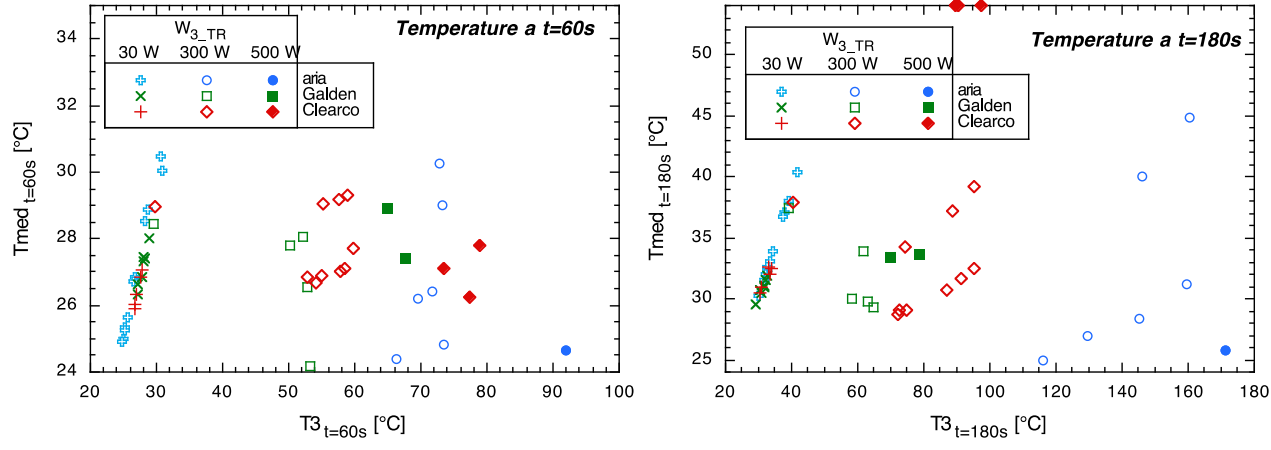


Figura 31 – Temperature delle celle normali dopo 60 s e 180 s in funzione di quella della cella TR.

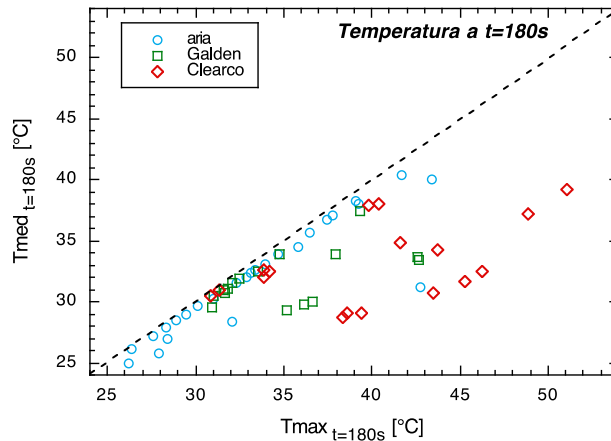


Figura 32 – Temperature medie delle celle normali dopo 180 s in funzione di quelle massime.

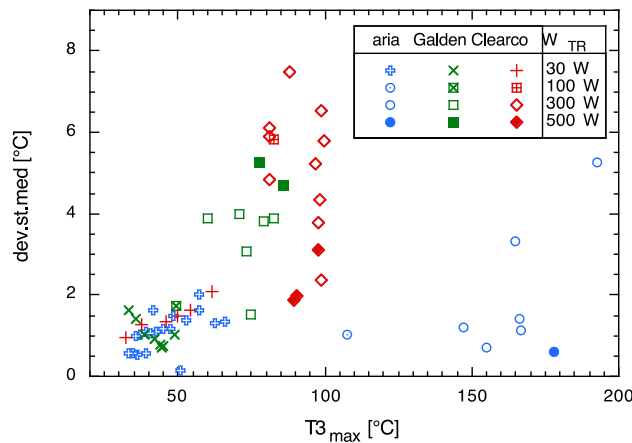


Figura 33 – Deviazione standard delle temperature medie delle facce delle celle normali, in funzione di quelle massime della cella TR per le diverse potenze ad essa e i tre fluidi.

2.5 Confronto con i risultati del programma di simulazione

Nelle prime prove di validazione del programma di simulazione riportate in /1/ si era evidenziata la necessità di implementare un modello adeguato per la convezione naturale, per simulare meglio i casi a bassa velocità. Dapprima si sono provati alcuni metodi di calcolo descritti in letteratura (/5/, /6/ per lo scambio termico, /7/ per la velocità), ma i risultati non sono soddisfacenti essendo tali metodi riferiti a condizioni di moto convettivo stazionarie, non adatti alle variazioni transitorie tipiche della fase di riscaldamento delle batterie. Infatti la velocità di risalita nel canale, dovuta alle pareti calde, aumenta in tempi abbastanza lunghi e a regime porta a un coefficiente di scambio termico più elevato.

Si è quindi scelto di calcolare il contributo della convezione naturale con una trattazione semplificata basata semplicemente sul bilancio delle forze di galleggiamento e di attrito nelle condizioni medie del liquido all'interno del canale tra le due pareti scaldanti. Il galleggiamento è

$$F_{gall} = V_{can} (r_{\forall} - r) g \quad (2)$$

mentre l'attrito in laminare è

$$F_{attr} = S_{base} \Delta p = S_{base} \frac{64}{\text{Re}} \frac{H}{D_{eq}} \frac{r u^2}{2} \quad (3)$$

quindi dall'accelerazione

$$a = \frac{F_{gall} - F_{attr}}{r S_{base} S} \quad (4)$$

può essere calcolata la velocità in ogni step temporale

$$u_1 = \frac{\left(u_0 + \frac{g D r \Delta t}{2 r} \right)}{1 + \frac{\Delta t}{r} \frac{16 m}{D_{eq}^2}} \quad (5)$$

la velocità media nello step viene poi sommata vettorialmente a quella fornita e questo valore viene usato per il calcolo del coefficiente di scambio termico.

Il confronto con i dati sperimentali precedenti è molto soddisfacente per l'aria, mentre con i liquidi l'errore è maggiore ed aumenta con la viscosità e al diminuire della velocità.

In Figura 34 sono mostrate le simulazioni di alcune delle prove sperimentali di raffreddamento con aria e potenza 30 W (prime tre figure) e 300 W (ultima). Sono inoltre mostrate (Figura 35) anche le simulazioni di alcune fasi di raffreddamento successivo alle prove con le diverse potenze termiche.

In Figura 36 il confronto delle simulazioni con i dati è per Galden con due velocità e due potenze. Il notevole disaccordo per il caso con 300 W e bassa velocità è probabilmente dovuto alla necessità di inserire anche un calcolo della convezione mista /8/, che in questo caso dovrebbe contribuire in modo non trascurabile in quanto lo strato a contatto con la parete molto più calda e subisce un maggior galleggiamento e una minore viscosità, per cui si avrebbe una maggiore velocità locale dovuta alla convezione naturale. Una prova qualitativa è data dal fatto che raddoppiando la velocità la simulazione diventa molto più simile all'andamento sperimentale.

Il disaccordo aumenta ancora con il Clearco (Figura 37), nel quale la maggiore viscosità amplifica i problemi visti con il Galden. In questo caso per avere valori che si avvicinano a quelli sperimentali, con potenza 30 W e bassa velocità, quest'ultima dovrebbe essere aumentata del 50% (Figura 37a), mentre per potenza 300 W la velocità andrebbe quadruplicata (Figura 37b).

La conclusione del confronto è che mentre per l'aria il programma di simulazione sembra molto affidabile, il suo utilizzo per i liquidi diventa meno preciso all'aumentare della potenza termica e dalla viscosità e al diminuire della velocità. Quindi con il Galden si possono ottenere ancora indicazioni accettabili mentre con il Clearco si può avere un errore in eccesso della temperatura che può essere notevole per alte potenze.

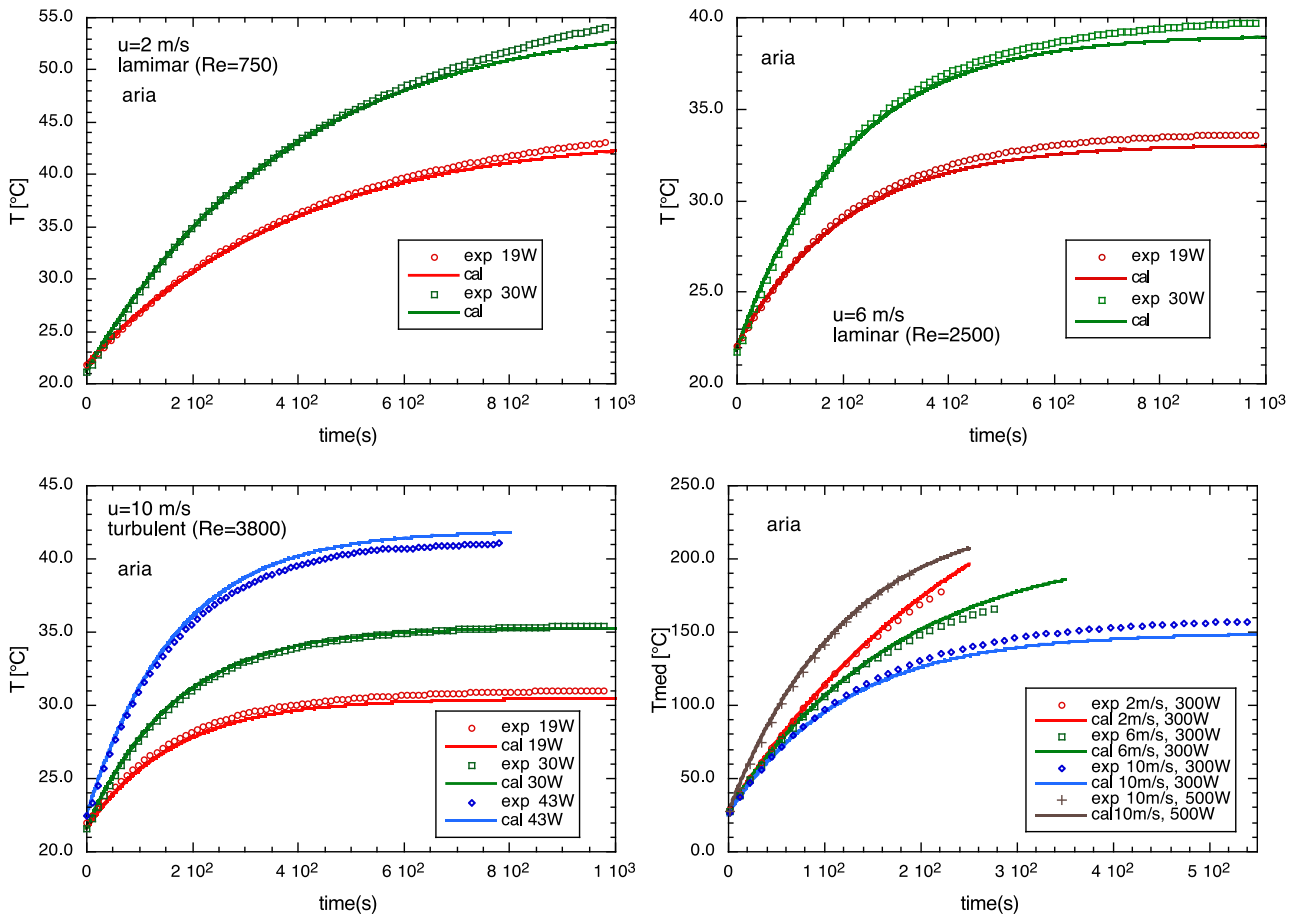


Figura 34 – confronto delle simulazioni con i dati sperimentali per alcuni test con raffreddamento ad aria.

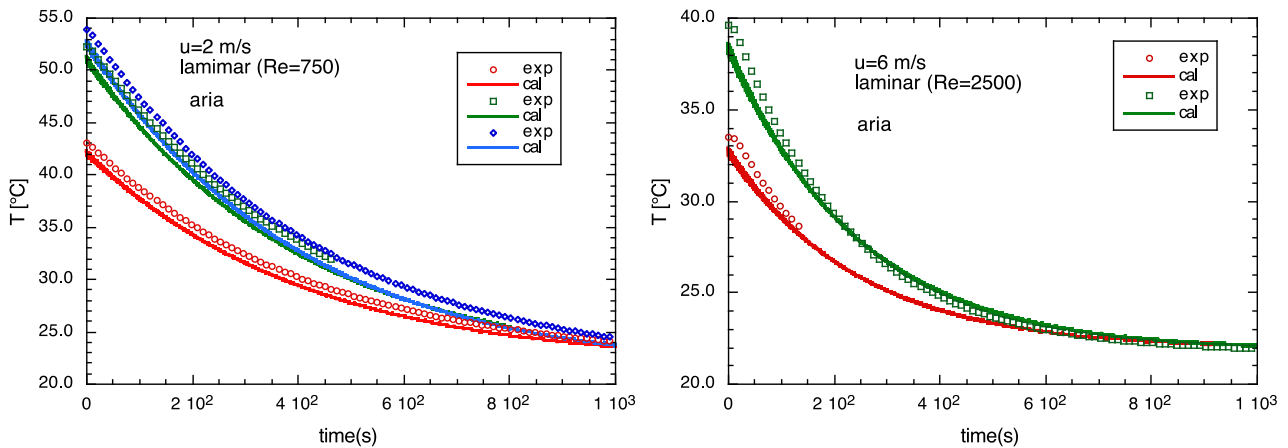


Figura 35 – confronto delle simulazioni con i dati sperimentali di alcune fasi di raffreddamento ($W=0$).

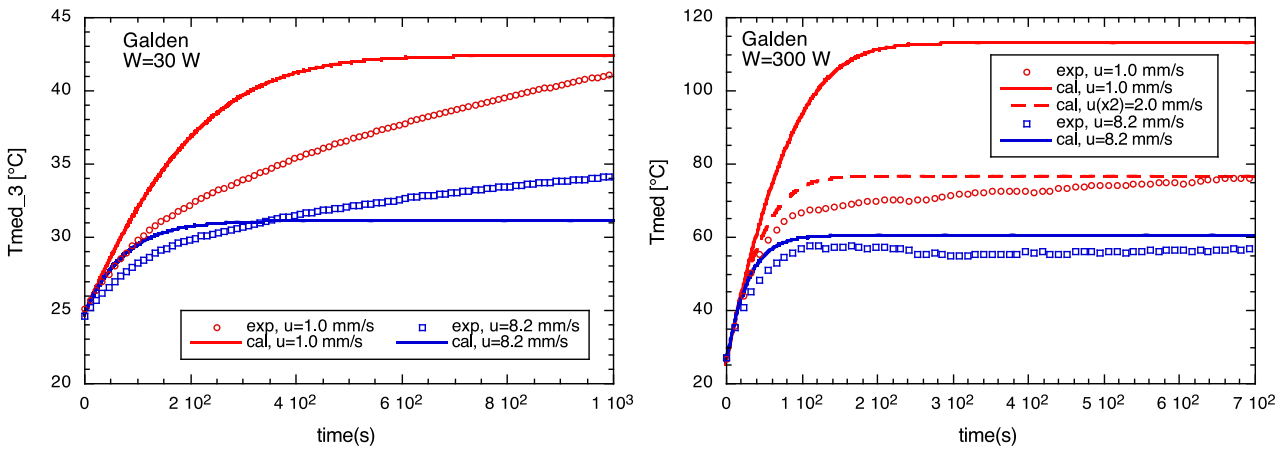


Figura 36 – confronto delle simulazioni con i dati sperimentali per alcuni test con raffreddamento con Galden.

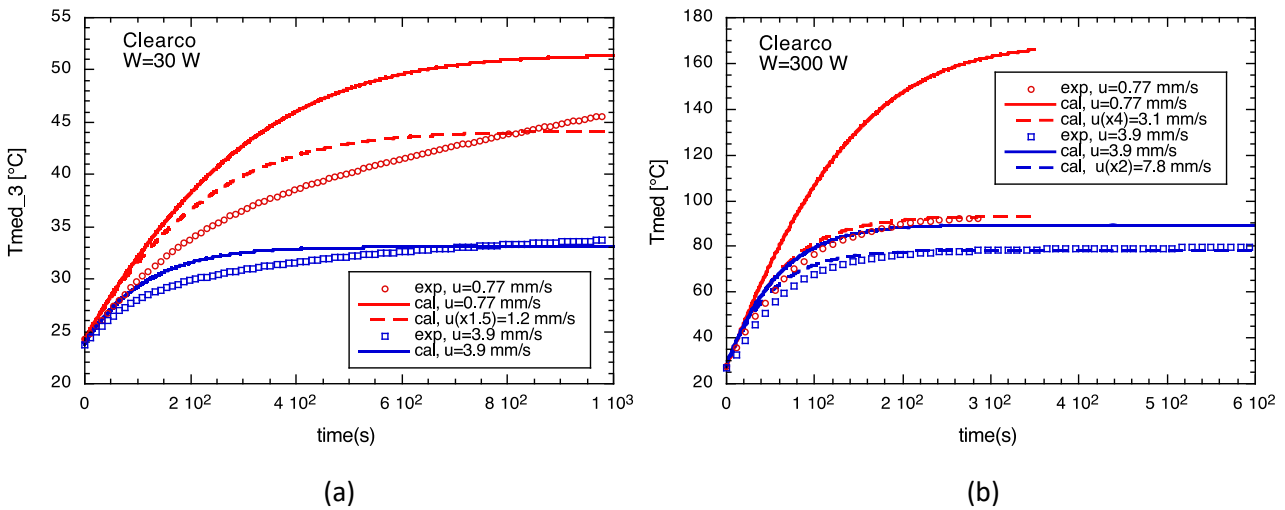


Figura 37 – confronto delle simulazioni con i dati sperimentali per alcuni test con raffreddamento con Clearco.

2.6 Valutazione della sensibilità alle variazioni della geometria

Come primo esempio di utilizzo del programma di simulazione, sono stati confrontati gli andamenti della temperatura della cella previsti al variare dello spessore del canale in cui scorre il 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. La velocità del fluido è stata variata in corrispondenza per mantenere la stessa potenza di pompaggio. Per l'aria in Figura 38 sono mostrati i casi con potenza 30 W, velocità 2 (figura a) e 8 m/s (figura b), mentre in Figura 39 per le stesse velocità è stata usata la potenza 300 W. In tutti i casi si può vedere che la diminuzione della distanza tra le celle porta sotto i 3 mm a un peggioramento consistente del raffreddamento, mentre il suo aumento ha effetti trascurabili. Si può dire quindi che in questo caso la distanza di 3 mm è un buon compromesso tra il rendimento del sistema di refrigerazione e la compattezza del pacco batterie.

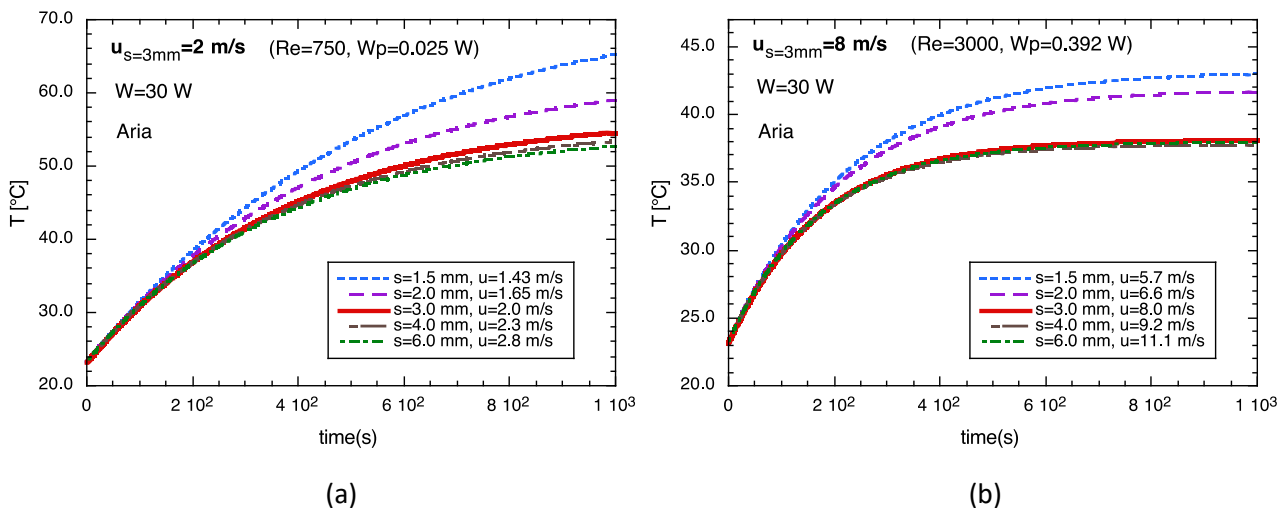


Figura 38 – Simulazione dei transitori con potenza 30 W e diverse distanze tra le celle, con velocità dell'aria tali da mantenere la stessa potenza di pompaggio del caso di riferimento $s=3$ mm

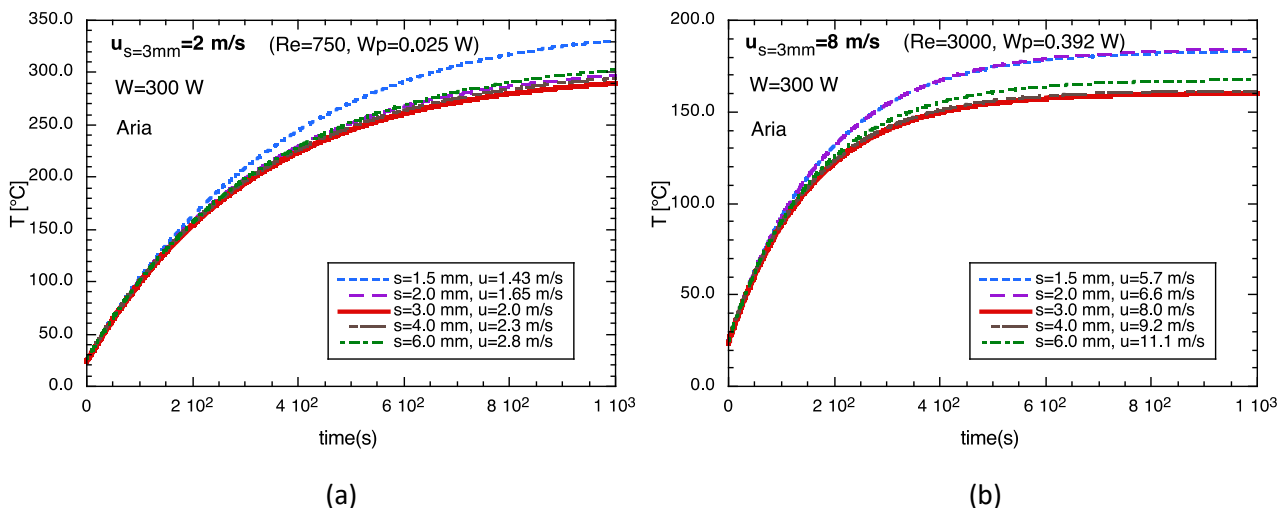


Figura 39 – Simulazione dei transitori con alta potenza (300 W) e diverse distanze tra le celle, con velocità dell'aria tali da mantenere la stessa potenza di pompaggio del caso di riferimento $s=3$ mm

In Figura 40 ed in Figura 41 lo stesso tipo di simulazione è stato fatto l'utilizzo del Galden. In questo caso l'effetto dell'aumento della distanza è maggiore, ma bisogna comunque considerare che le temperature restano molto più basse anche con $s=3$ mm e potenza 300 W e che in questo caso inoltre il programma prevede temperature sicuramente maggiori della realtà, come si era visto in precedenza.

Per quanto riguarda il Clearco, l'affidabilità del programma è ancora minore e quindi i risultati riportati in Figura 42 e Figura 43 devono essere considerati solo indicativi ma non quantitativamente realistici.

Dalle simulazioni precedenti l'indicazione principale ottenuta è che per le celle tipo EIG-C020, nel caso di raffreddamento per contatto diretto la distanza di 3 mm tra le celle è una soluzione molto buona con l'aria e comunque soddisfacente anche con i liquidi. Infatti la sua diminuzione comporta un sensibile peggioramento delle prestazioni termiche sia per riscaldamenti normali che per condizioni di abuso, mentre l'aumento porta miglioramenti piccoli o nulli a fronte di un maggior volume del pacco batterie e di un aumento anche della massa di refrigerante nel circuito di raffreddamento.

Come conclusione più generale inoltre si ha che il programma di simulazione sviluppato permette di valutare molto rapidamente l'effetto di variazioni geometriche o fisiche del pacco batterie e dei fluidi

utilizzati, ma almeno allo stato attuale l'affidabilità per liquidi viscosi è bassa e quindi si rende necessario un miglioramento del modello di convezione naturale e l'introduzione della convezione mista. Questi limiti rendono necessario eseguire qualche test di validazione con l'impianto sperimentale nel caso di differenze notevoli rispetto alla cella di riferimento utilizzata attualmente.

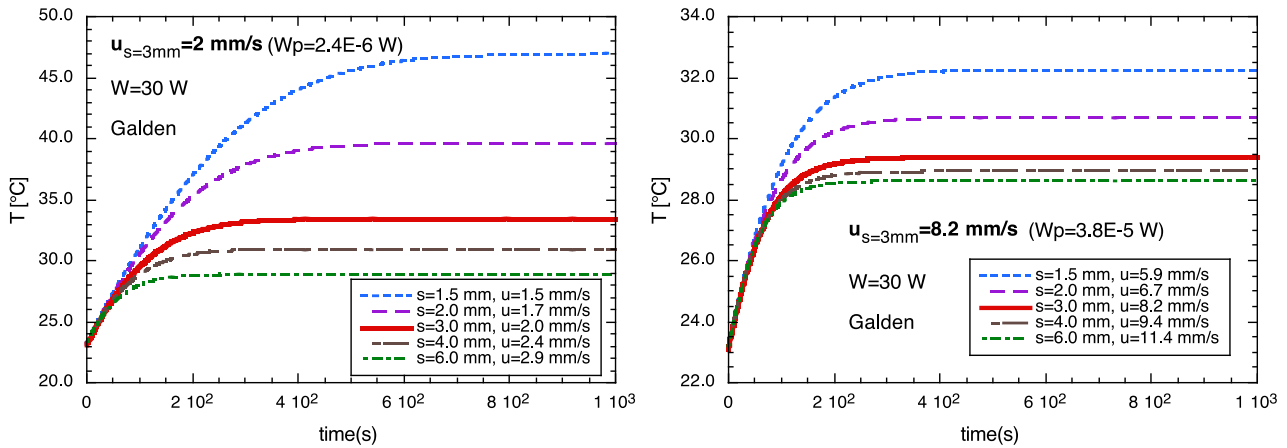


Figura 40 – Simulazione dei transitori con potenza 30 W e diverse distanze tra le celle, con velocità del Galden tali da mantenere la stessa potenza di pompaggio del caso di riferimento $s=3 \text{ mm}$

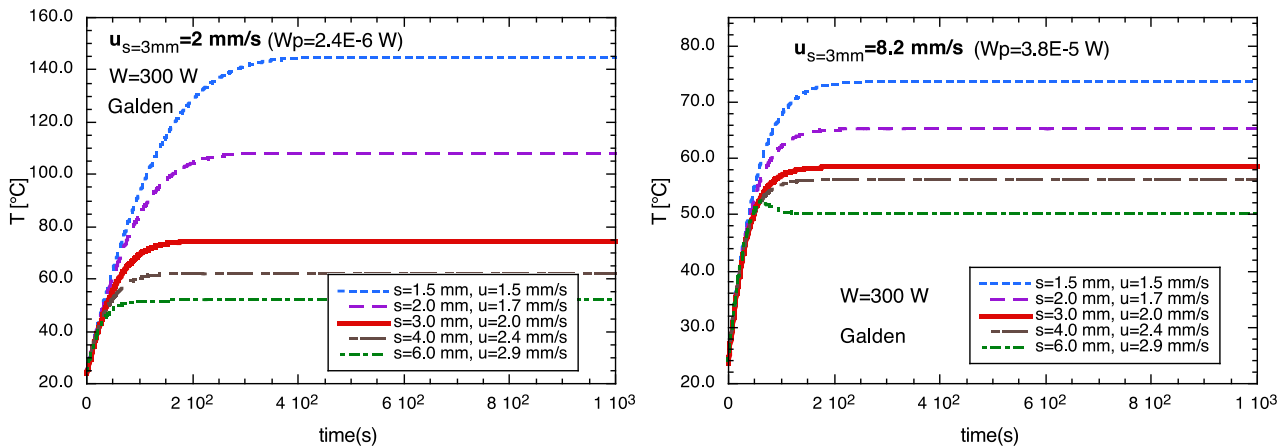


Figura 41 – Simulazione dei transitori con alta potenza (300 W) e diverse distanze tra le celle, con velocità del Galden tali da mantenere la stessa potenza di pompaggio del caso di riferimento $s=3 \text{ mm}$

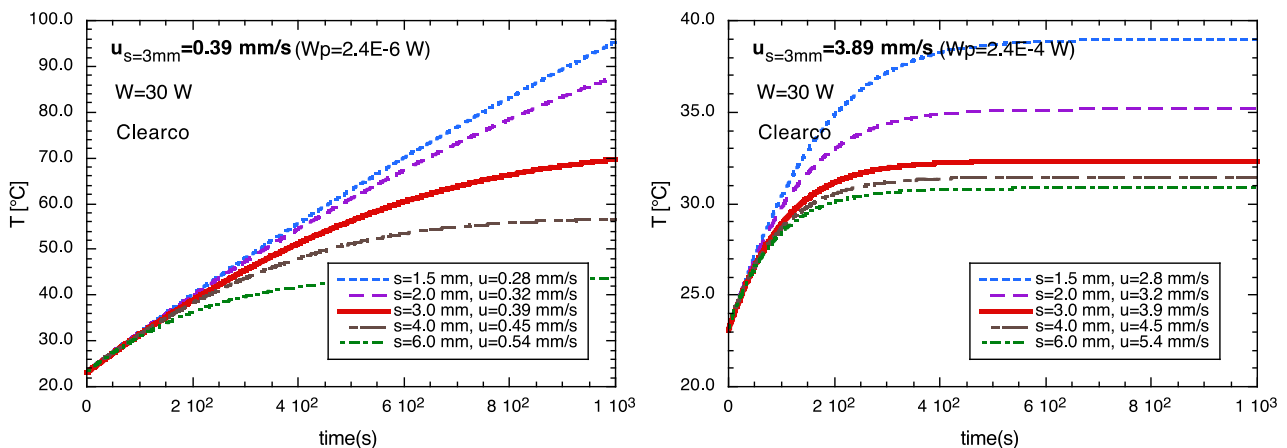


Figura 42 – Simulazione dei transistori con alta potenza (30 W) e diverse distanze tra le celle, con velocità del Clearco tali da mantenere la stessa potenza di pompaggio del caso di riferimento $s=3$ mm

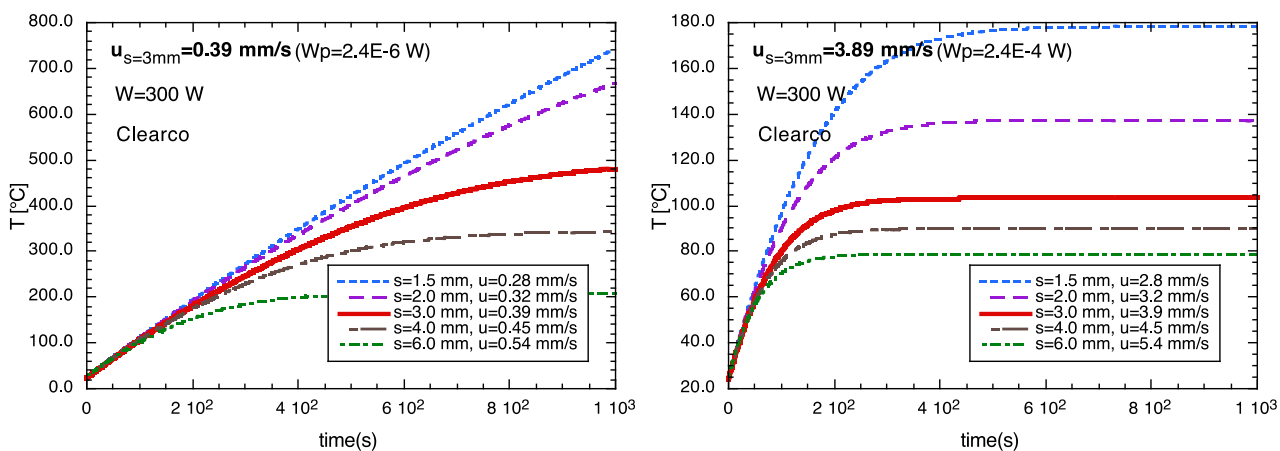


Figura 43 – Simulazione dei transistori con alta potenza (300 W) e diverse distanze tra le celle, con velocità del Clearco tali da mantenere la stessa potenza di pompaggio del caso di riferimento $s=3$ mm

3 Conclusioni

Utilizzando l'impianto sperimentale per l'emulazione del comportamento termico di batterie al Litio, sono state eseguite 60 prove di riscaldamento di celle pouch equivalenti a celle Li-Ion di tipo EIG-CO20. Metà delle prove sono state con le celle riscaldate da una potenza di 19 o 30 W, pari a quella dispersa da quelle vere in condizioni di scarica vicine al limite suggerito dal produttore (4C o 5C). Nelle altre 30 prove ad una delle celle è stata fornita una potenza molto maggiore, tra 100 e 500 W (nella maggior parte dei casi 300 W), per simulare le condizioni di abuso che possono evolvere nel "thermal runaway" se non mitigate rapidamente.

Le prove sono state ripetute utilizzando il raffreddamento per contatto diretto con diverse velocità dei fluidi, confrontando le prestazioni di tre fluidi: l'aria, un liquido a bassa viscosità (il PFPE "Galden-HT135") e un olio silconico ("Clearco PSF-50cSt"). Ne è risultato che per le basse potenze tutti i fluidi riescono a mantenere le celle a temperature accettabili, ma con l'aria non si deve scendere troppo con la velocità mentre i due liquidi riescono a raffreddare anche a velocità nulla per sola convezione naturale. Per le condizioni di abuso invece il raffreddamento con aria si è dimostrato inadeguato anche ad alta velocità, mentre con i liquidi l'aumento della temperatura della cella è molto inferiore. In particolare l'olio riesce a mantenere la temperatura sotto i 90°C solo con velocità più alte mentre con il Galden si rimane in condizioni di sicurezza anche a bassissime velocità.

Con i dati precedenti è stato poi validato un programma di simulazione molto semplificato che permette in tempi rapidi di valutare l'influenza di variazioni di vari parametri. Come prima prova si sono valutate le differenze delle prestazioni con la geometria del pacco batterie, variando la larghezza del canale tra le celle e verificando che in molti casi si può raggiungere in questo modo una ottimizzazione tra la compattezza del pacco, che richiede celle più vicine, e il raffreddamento, di solito migliorabile allargando i canali.

4 Appendice 1 - Schede dei due liquidi

Caratteristiche del Galden HT135:



Home > Markets & Products > Featured Products

Galden® PFPE

Perfluoropolyether Fluorinated Fluids

Galden® PFPE is a line of high-performance, inert, fluorinated fluids used as heat transfer and for various high-tech applications in the Electrical & Electronics and Semiconductors markets.

Key Features

- High thermal stability
- Wide operating temperature range
- Good dielectric properties
- Excellent chemical inertness
- Good compatibility with metals, plastics and elastomers
- No flash or fire point, no auto-ignition point
- Safety (FM approved 6930 standard)

[Learn more about Galden® PFPE Markets and Applications](#)

Galden®
PFPE
perfluoropolyether

High Boiler Grades

Galden® High Boilers (HBs) is the family of heat transfer synthetic fluids engineered for high temperature applications which feature:

- The highest boiling points among fluorinated heat transfer fluids
- Very low vapor pressure and evaporation tendency
- Outstanding non-flammability
- Excellent chemical inertness
- Safety (FM approved 6930 standard)

Galden® HBs are the best candidates for use at temperatures above 150° C to 270° C without pressure build-up and absolutely no fire hazard.

Among the advantages of a sound safety profile for high temperature applications is a positive impact on the Cost of Ownership.

Typical applications for Galden® HBs

- Heat transfer management in the photovoltaic cell manufacturing process
- Heat vector in the solar thermal industry
- Heating fluid
- Metallurgy
- Energy sector

Factory Mutual Approved

Galden® HBs are Factory Mutual approved according to the FM 6930 standard and are available in industrial quantities.

Typical Properties

Property	Units	Galden® HT135	Galden® HT170	Galden® HT200
Boiling point	°C	135	170	200
Pour point	°C	-100	-97	-85
Density @ 25°C	g/cm ³	1.72	1.77	1.79
Kinematic viscosity @ 25°C	cSt	1.0	1.8	2.4
Kinematic viscosity @ 0°C	cSt	1.69	3.41	4.97
Kinematic viscosity @ -20°C	cSt	2.92	7.11	11.65
Kinematic viscosity @ -40°C	cSt	6.32	21.14	-
Surface tension @ 25°C	dynes/cm	17	18	19
Vapor pressure @ 25°C	torr	5.8	0.8	0.2
Specific heat @ 25°C	cal/g°C	0.23	0.23	0.23
Thermal conductivity @ 25°C	W/m°C	0.065	0.065	0.065
Heat of vaporization @ boiling point	cal/g	16	16	15
Dielectric strength @ 25°C	KV (2.54mm gap)	40	40	40
Dissipation factor @ 25°C (1 kHz)		2*10 ⁻⁴	2*10 ⁻⁴	2*10 ⁻⁴
Dielectric constant @ 25°C (1 kHz)		1.90	1.90	1.94
Volume resistivity	Ω.cm	5*10 ¹⁵	5*10 ¹⁵	5*10 ¹⁵
Solubility of water	ppm (wt)	14	14	14
Solubility of air	cm ³ gas/ 100 cm ³ liquid	26	26	26
Refractive index @ 25°C		1.280	1.280	1.281
Coefficient of expansion	cm ³ /cm ³ °C	0.0011	0.0011	0.0011
Average molecular weight		610	760	870

Caratteristiche del Clearco PSF-50



PSF-50cSt Silicone Heat Transfer Fluid

Operating Temperature Range: -40°C to 170°C (open system) / -40C to 230°C (closed system)



PSF-5cSt Silicone Heat Transfer Fluid offers high thermal stability for open/closed system baths and heat transfer applications.

PSF-50cSt Silicone Heat Transfer Fluid is a 100% linear Polydimethylsiloxane / PDMS Silicone with a viscosity of 100cSt @ 25°C. It is formulated for use as a cold and heat transfer medium in a wide range of applications. PSF-50cSt Silicone Heat Transfer Fluid has an operating service temperature range of -40°C to 230°C (closed system*).

PSF-50cSt Silicone Heat Transfer Fluid is characterized by its low pour point, wide service temperature range, high flash point, low viscosity change at temperature (low V.T.C.), high dielectric strength, inertness to virtually all components and hydrophobic nature (insoluble in water).

PSF-50cSt Silicone Heat Transfer Fluid has a Thermal Conductivity value of 0.00036 g cal/cm*sec* °C . Its specific heat value is 1.5 (J/g °C).

PSF-50cSt has a low viscosity-temperature coefficient or V.T.C. (viscosity @99°C ÷viscosity @ 38°C). Thus, it will not exhibit a wide viscosity increase at lower temperatures. For example, at -40°C, its viscosity increases to approx. 320cSt. This is critical for baths that have pumping systems that cannot operate with higher viscosity fluids. However, if lower viscosities are required at low temps, we provide a line of low temperature fluids.

Applications include: heat transfer systems, closed system baths, constant temperature baths, circulating baths, low temperature refrigerated baths, closed loop baths, heat transfer baths

*Closed system baths are systems from which air has been excluded

Specifications

Chemical Name	Polydimethylsiloxane / PDMS Silicone Oil
CAS #	63148-62-9
Appearance	Clear, colorless & odorless liquid
Minimum Order	1-gallon (3.785 liters)

Features

- 100% PDMS silicone fluid
- Wide service temperature range
- Hydrophobic: insoluble with water
- Compatible with virtually all o-rings, gaskets, hoses, valves and seals*
* not recommended for silicone rubber...may cause swelling

Typical Product Data

Specific Gravity	Refractive Index	Pour Point	Flash Point	Surface Tension dynes cm @ 25°C
0.960	1.4015	-55°C	285°C	20.8

Viscosity to Temp info

Viscosity-Temperature Coefficient.....	0.59
Viscosity @ temperature	
@ 170°C.....	9cSt
@ 100°C.....	17cSt
@ 25°C.....	50cSt
@ 0°C.....	80cSt
@ -40°C.....	240cSt

Thermal Properties

Thermal Conductivity @ 25°C g cal/cm*sec* °C	Thermal Expansion cc/cc °C	Specific Heat @ 25°C J/g °C
0.00036	0.00106	1.5

Dielectric Properties

Dielectric Strength	400 volts/mil
Dielectric breakdown strength (2.5mm).....	≥50 kV
Dielectric Constant (50Hz).....	2.75 @ 25°C
Dielectric Constant (100Hz).....	2.71 @ 25°C
Dielectric Constant (100Hz).....	2.35 @ 150°C
Dissipation Factor (100Hz)	
@ 25C.....	0.0002
@ 150C.....	0.00016
Volume Resistance (ohm-cm)	
@ 25°C.....	1.0 x 10 ¹⁵
@150°C	5.0 x 10 ¹³

Packaging

1-gallon.....	3.6kg / 8lbs net wt.
5-gallon pail.....	18kg / 40lbs net wt.
55-gallon drum.....	200kg / 440lbs net wt.
F.O.B. Phila, PA U.S.A.	

For More Info, Contact:
Clearco Products Co., Inc.

15 York Road
Willow Grove, PA 19090
U.S.A.

Tel: (215) 366-7860
Fax: (215) 366-7862
Email: info@clearcoproducts.com
Web: www.clearcoproducts.com

5 Riferimenti bibliografici

1. F. D'Annibale, A. Lattanzi, M. Morlacca, A. Scotini, L. Simonetti, Progettazione, realizzazione e test di un dispositivo sperimentale per la simulazione del comportamento termico di celle al litio, ENEA, Report RdS/PAR2016/XXX, settembre 2017
2. F. D'Annibale, F. Vellucci, "Analisi termografica su celle litio-ione sottoposte ad esperienze di second life", report RdS/PAR2013/191, www.enea.it
3. F. D'Annibale, F. Vellucci, Prosecuzione di analisi termografiche su celle litio-ione sottoposte ad esperienze di "second life", ENEA - Report RdS/PAR2014/178, settembre 2015
4. 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", report RdS/PAR2016 - obiettivo c.3.1
5. P. Toninelli, A. Tolotto, D. Del Col, S. Dugaria, L. Moro, Modellazione di collettori solari termici a circolazione naturale con e senza vapor chamber e confronto tra risultati sperimentali ed output del modello, Università degli Studi di Padova, Report RdS/PAR2013/159, settembre 2014
6. I. Dincer and M.A. Rosen, Thermal energy storage : systems and applications – 2nd ed., John Wiley and Sons Ltd., 2011
7. J.H. Lienhard IV and J.H. Lienhard V, A heat transfer textbook - 3rd ed. — Cambridge, MA, Phlogiston Press, 2008
8. G.P. Celata, F. D'Annibale, A. Chiaradia, M. Cumo, "Upflow turbulent mixed convection heat transfer in vertical pipes", Int. J. Heat Mass Transfer, 41(24) (1998), 4037 – 4054.

6 Abbreviazioni ed acronimi

A	Area [m ²]
BMS	Battery Management System
c _p	calore specifico [J/kg K]
D	Diametro [m]
f	Fattore di attrito di Fanning
G	portata specifica [kg/m ² s]
H	altezza della cella [m]
I	corrente [A]
k	conducibilità termica [W/m K]
L	Lunghezza [m]
P	pressione [Pa]
Q	portata volumetrica Q=A u [m ³ /s]
s	spessore del canale (spazio tra le celle) [m]
S	superficie [m ²]
T	temperatura [°C]
t	tempo [s]
u	velocità [m/s]
V	volume [m ³]
W	potenza [W]
W _p	potenza di pompaggio [W]

Simboli greci

Γ	portata [kg/s]
ΔP	perdita di carico [Pa]
Δt	step temporale [s]
μ	viscosità dinamica [kg/m-s]
ρ	densità [kg/m ³]

Pedici

attr	attrito
b	batteria
base	base del canale tra due celle
can	riferito al canale tra due celle
gall	galleggiamento
i	ingresso
max	massimo
med	valore medio
norm	riferito alle celle “normali”
TR	Thermal Runaway, riferito alla cella per alte temperature
u	uscita