

Ricerca di Sistema elettrico



LA3.16 – Scambio termico: sperimentazione scambio termico bifase su un prototipo a banco

Gianfranco Caruso, Fabio Riccardi



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA3.16_021

LA3.16 - SCAMBIO TERMICO: SPERIMENTAZIONE SCAMBIO TERMICO BIFASE SU UN PROTOTIPO A BANCO

Gianfranco Caruso, Fabio Riccardi Università Sapienza Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE)

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: LA3.16

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Prof. Gianfranco Caruso, *Università Sapienza Roma*

Mese inizio previsto: 1

Mese inizio effettivo: 1

Mese fine previsto: 18

Mese fine effettivo: 18

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Analisi dei dati sperimentali e la modellizzazione di un sistema di scambio termico bifase*"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Giuseppe Zummo

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Prof. Gianfranco Caruso

Indice

1	RISULTATI ATTESI	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	4
3	PRODOTTI ATTESI.....	5
4	PRODOTTI SVILUPPATI	6
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI	7
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	8
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	9
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	15
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	16
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE	17

1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente

1.1 Lista dei risultati attesi

- Inquadramento del problema del *Thermal Management* nel settore dell'elettronica di potenza (IGBT, SiC MOSFET, Diodi, Pacchi Batterie, Celle a Combustibile), con particolare riguardo al settore della mobilità elettrica;
- Studio dei sistemi di raffreddamento attualmente in uso, con valutazione dei punti di forza e delle criticità di ciascuno di essi;
- Descrizione dettagliata dell'impianto EMOTICONS e della campagna sperimentale su di esso eseguita;
- Presentazione di risultati sperimentali preliminari, relativi alle performance di scambio termico di un innovativo sistema di raffreddamento bi-fase in convezione forzata.

2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti

2.1 Lista dei risultati ottenuti

- Elaborazione di un rapporto contenente i risultati del lavoro di ricerca e corredato di immagini, grafici e tabelle;
- Descrizione introduttiva dei vari campi di applicazione, delle possibilità di utilizzo e delle prospettive vantaggiose derivanti dall'adozione dei sistemi di raffreddamento bi-fase in convezione forzata;
- Descrizione dei punti di forza e delle criticità dei sistemi di raffreddamento attualmente in uso, differenziandoli in base al tipo di fluido impiegato, al meccanismo di scambio termico a cui fanno ricorso, agli apparati tecnologici di cui hanno bisogno per funzionare e alle prestazioni che garantiscono, sia in termini fisici che in termini economici;
- Descrizione dell'apparato sperimentale denominato EMOTICONS che è stato utilizzato per studiare lo scambio termico in regime di ebollizione fluente all'interno di canali di piccole dimensioni, corredata di dettagli costruttivi, logiche di sicurezza impiegate e schema funzionale;
- Presentazione della campagna sperimentale, con descrizione degli evaporatori testati, dei range operativi scelti per le variabili principali (pressione, temperatura d'ingresso del circuito primario, temperatura di riferimento per il circuito secondario, potenza termica erogata e portate massiche impiegate durante i test);
- Presentazione in forma grafica dei risultati relativi allo scambio termico, in particolare del valore sperimentale del coefficiente di scambio, al variare del titolo termodinamico, della portata specifica e della pressione;

3 Prodotti attesi

Lista dei prodotti hardware/software eventualmente attesi per la LA

3.1 *Lista dei prodotti attesi*

- Dataset sperimentali, utili alla misura del coefficiente di scambio termico e rappresentativi dell'intero range operativo delle comuni apparecchiature dell'elettronica di potenza;
- Pubblicazione scientifica con i risultati ottenuti dalle analisi condotte;
- Metodologia affidabile e valida per la manipolazione dei dati sperimentali contenuti nel dataset e per l'estrapolazione del coefficiente di scambio termico (oltreché di tutte le grandezze sia fisiche che adimensionali necessarie alla caratterizzazione dello scambio termico);

4 Prodotti sviluppati

4.1 *Lista dei prodotti sviluppati*

- Dataset con dati acquisiti in regime stazionario, in particolare relativi a:
 - Valori incrementali di potenza termica (in un range tra 0 e 830 W);
 - Valori incrementali di portata massica del refrigerante (23, 34, 44 kg/h);
 - Valori incrementali di pressione operativa (1.8 bar, 2 bar, 3 bar, 4 bar);
 - Diversi diametri idraulici dei mini-canali (1.15, 2.09 mm);
 - Diverse lunghezze riscaldate dei canali (50 mm e 100 mm);
- Script con linguaggio di programmazione Python per la lettura, la manipolazione numerica e la resa grafica dei dati sperimentali, nei quali sono implementate anche correlazioni per la predizione del coefficiente di scambio termico;
- Pubblicazione di un articolo scientifico per la conferenza UIT

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono stati riscontrati scostamenti dalle attività previste dal capitolato.

6 Sintesi delle attività svolte

È stata svolta un'attività di ricerca e di approfondimento del raffreddamento di apparecchiature ad elevato flusso termico per elettronica di potenza (PE) ed *High Performance Computing* (HPC), riportando per ciascuna tipologia di componente impiegato i limiti di temperatura raccomandati per un corretto funzionamento. Sono inoltre stati introdotti i sistemi di raffreddamento attualmente più diffusi e comunemente impiegati per rispondere alle esigenze del mercato, indicandone i principali punti di forza e criticità. Particolare interesse è stato profuso nella descrizione dei sistemi a due fasi, di cui vengono analizzate le varie configurazioni di funzionamento attualmente in adozione. E' stata effettuata la misura sperimentale del coefficiente di scambio termico in varie condizioni di pressione e portata massica circolante ed è stato investigato l'effetto della dimensione dei canali interni dell'evaporatore sull'efficienza dello scambio.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Introduzione

Recentemente si è assistito ad un crescente ricorso a dispositivi elettronici dalle elevate performance e di dimensioni via via più ridotte. Questo è vero sia nel campo dell'elettronica di potenza propriamente detta (inverter, DC/DC converter, raddrizzatori), quanto nel campo dell'*High Performance Computing* (HPC). Nel primo caso la spinta all'utilizzo delle fonti di energia rinnovabile ha portato all'adozione di apparecchiature che generano correnti continue, come i pannelli fotovoltaici e le batterie di accumulo, che necessitano quindi di un inverter per poter rendere utilizzabile l'energia prodotta e/o immagazzinata. Sempre in questo ambito, visti i recenti provvedimenti presi dall'Unione Europea per il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050, è stata fortemente incoraggiata l'elettrificazione dei trasporti, con un conseguente maggior impiego di motori elettrici. Tali motori, per funzionare in maniera corretta e con buoni rendimenti, necessitano di un convertitore dedicato che sia in grado di manipolare una discreta potenza elettrica (si parla normalmente di correnti nominali superiori ai 200 A). Devono inoltre essere affidabili, durevoli, sicuri e compatti. Tutto ciò comporta inevitabilmente forti sollecitazioni dei dispositivi a semiconduttore presenti al loro interno (come gli IGBT oppure i SiC MOSFET), i quali non dovrebbero superare una temperatura interna di 125-150 °C. È documentato infatti che oltre tale temperatura l'affidabilità dello *switch* diminuisce fortemente insieme alla sua vita utile. Inoltre, le interconnessioni elettriche tra le varie parti attive, chiamate *bond wires* sono soggette a distacchi dovuti alla dilatazione termica differenziale dei vari materiali interfacciati nel punto di saldatura.

Dispositivi chiave per il funzionamento delle apparecchiature elettriche non connesse alla rete sono infine le batterie. Anch'esse manifestano criticità se esercitate in un range di temperatura non ottimale. Ciascun tipo di batteria ha infatti un proprio intervallo di funzionamento raccomandato (15-35°C per le batterie al Litio, 20-45 °C per quelle al Piombo e acido). Temperature troppo basse portano infatti alla formazione di cristalli di dimensioni troppo grandi che riducono la capacità di accettazione della carica da parte della batteria, mentre temperature troppo alte (oltre i 50°C) riducono la vita utile della batteria e incrementano il fenomeno di autoscarica. Per i pacchi batterie di grandi dimensioni occorre inoltre mantenere una buona uniformità termica (ΔT minori di 5 °C), per evitare sbilanciamenti del carico elettrico erogato.

Nel campo dell'HPC, invece, il collo di bottiglia dal punto vista termico è rappresentato dai processori di nuova generazione (CPU e GPU), che, avendo potenze nominali attualmente intorno a 450-700 W ma dimensioni molto ridotte, generano flussi termici dell'ordine anche dei 100 W/cm² o ancora superiori.

7.2 Classificazione dei sistemi di raffreddamento attualmente in uso

È possibile effettuare una classificazione dei vari sistemi di raffreddamento impiegati, sulla base di tre principali criteri:

1. Il meccanismo di dissipazione del calore (conduzione, convezione, irraggiamento);
2. Lo stato fisico del fluido termovettore impiegato (sistemi mono-fase ad aria o a liquido e sistemi bi-fase);
3. La spontaneità o meno del fenomeno di dissipazione del calore (sistemi attivi o passivi);

7.2.1 Sistemi mono-fase ad aria e a liquido

I sistemi di raffreddamento mono-fase sono quelli maggiormente impiegati nella pratica industriale per la loro semplicità di funzionamento e per il loro minore costo di installazione. Si basano sull'assorbimento del calore da parte di un fluido in movimento, il cui meccanismo di scambio termico è la convezione (forzata per i sistemi attivi e naturale per quelli passivi). Essi possono essere ulteriormente classificati in base al fluido che utilizzano.

- **Sistemi ad aria**

Sono sicuramente i più diffusi, perché sono in assoluto i più semplici. L'aria è infatti un fluido universalmente reperibile e compatibile con gran parte dei materiali impiegati dall'uomo; ha una buona rigidità dielettrica e può quindi essere usata per raffreddare anche parti in tensione. I principali

svantaggi dell'aria come fluido termovettore sono dovuti alla sua bassa densità ed al suo basso calore specifico che aumentano le portate volumetriche necessarie. A ciò si aggiunge la ridotta conducibilità termica, tipica degli aeriformi, che implica la necessità di incrementare la velocità del flusso per aumentare lo scambio termico tra il fluido e la superficie.

I sistemi di raffreddamento ad aria vengono normalmente dotati di dissipatori di calore metallici di grandi dimensioni per aumentare la superficie di scambio termico.

Questi dissipatori (*heatsink*) sono di norma alettati con alette rettangolari allungate oppure con matrici di pioli colonnari detti *pin*. Per i sistemi ad aria passivi, tali alettature hanno un orientamento verticale molto esteso per assecondare la circolazione indotta dal gradiente di densità causato dall'aumento di temperatura.

In assenza di gravità, con un'orientazione incompatibile con la spinta di galleggiamento o, infine, in caso di flusso termico eccessivo, non è più adottabile un sistema passivo, ma si ricorre alla movimentazione forzata dell'aria per mezzo di ventole e/o compressori.

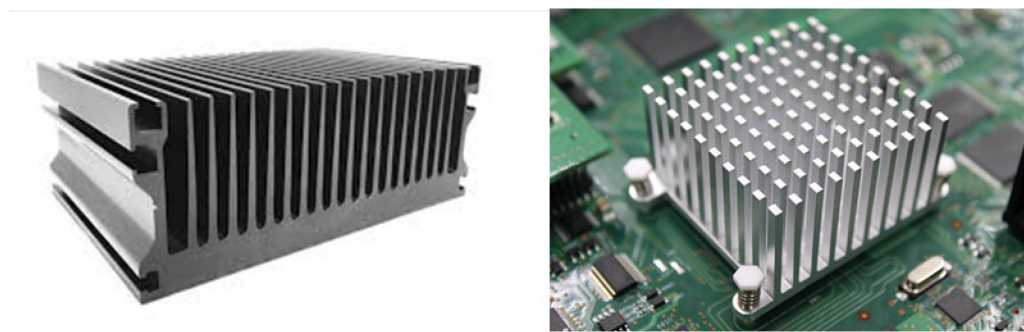


Figura 1: esempio di dissipatori per convezione naturale

- **Sistemi a liquido**

I sistemi a liquido sono impiegati laddove l'aria non è sufficiente ad assolvere al controllo termico dei componenti. I liquidi sono infatti più densi ed hanno un calore specifico da due a quattro volte maggiore di quello dell'aria, assorbendo più energia a parità di ΔT . Si utilizzano tipicamente per questo scopo miscele di acqua e glicole oppure oli dielettrici, a seconda che siano o meno in contatto con le parti attive. Proprio in base a ciò, i sistemi di *liquid cooling* si possono classificare in:

- Sistemi a contatto diretto: richiedono l'uso di fluidi con elevata rigidità dielettrica, in quanto possono entrare in contatto con le parti in tensione o con i componenti elettronici stessi. Tali fluidi sono normalmente costosi e potenzialmente pericolosi sia per l'uomo che per l'ambiente.
- Sistemi integrati: sono sistemi che richiedono una progettazione *ad hoc* dei componenti, predisponendo nel loro design industriale spazi destinati al passaggio dei refrigeranti. In questo caso, non essendoci un contatto diretto tra il fluido e le parti attive, si possono impiegare fluidi più comuni come miscele di acqua e glicole o acqua ed alcol ed è inoltre possibile evitare tutte le resistenze termiche di interfaccia costituite dai cosiddetti TIM (*Thermal Interface Materials*).
- Sistemi a contatto indiretto: sono quei sistemi in cui i dissipatori vengono montati esternamente ai componenti riscaldati ed in cui il contatto termico è effettuato mediante sottili strati di paste siliconiche ad alta conducibilità termica, oppure tramite i cosiddetti *thermal pads* che fungono da interfaccia (TIM).

7.2.2 Sistemi bi-fase evaporativi e bollenti

I sistemi bi-fase sono quelli in cui lo scambio termico avviene grazie alla coesistenza due fasi di una stessa sostanza. I più adottati per il raffreddamento dei dispositivi elettronici sono i sistemi liquido-vapore, i quali possono a loro volta distinguersi in sistemi evaporativi e sistemi bollenti. I primi sono quelli in cui la transizione di fase avviene per evaporazione superficiale di un sottile film liquido, spesso adsorbito all'interno di un substrato poroso/fibroso con elevata superficie specifica. I secondi sono invece quelli in cui

l'evaporazione è localizzata all'interno di micro-cavità superficiali del materiale, da cui poi il vapore fuoriesce sotto forma di bolle. I principali sistemi adottati in campo elettronico sono del secondo tipo.

- **Heat pipes e vapour chambers**

Sono sistemi di tipo passivo in quanto non necessitano di una pompa per funzionare. Sono costituiti da un involucro esterno metallico (generalmente di rame o alluminio) di forma tubolare (*heat pipes*) e scatolare (*vapour chambers*) al cui interno è contenuto del refrigerante a bassa pressione, che evapora in contatto con la parte riscaldata dell'involucro e ricondensa nell'estremità fredda dello stesso. Esso poi torna in forma liquida nel punto di evaporazione grazie all'azione capillare di uno strato di materiale poroso (schiume metalliche con porosità interconnessa) chiamato *wick*. Mentre gli *heat pipes* hanno un'estensione prettamente monodimensionale, le *vapour chambers* si estendono planarmente e coprono una maggiore superficie.

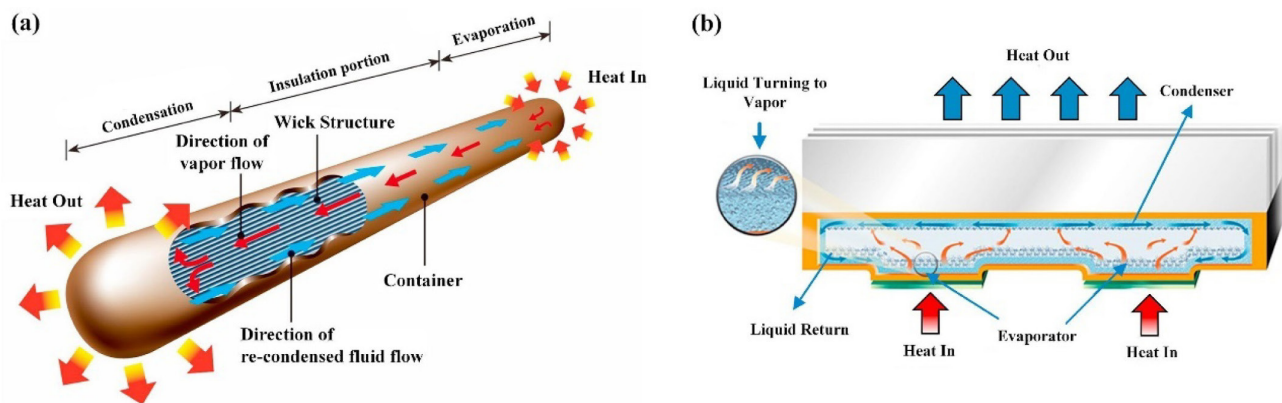


Figura 2: struttura di un *heat pipe* (a) e di una *vapour chamber* (b)

- **Sistemi bollenti a immersione**

Sono sistemi in cui tutte le parti attive vengono immerse verticalmente all'interno di vasche riempite di refrigerante liquido. Esso bolle in contatto con le superfici più calde innescando la circolazione spontanea del vapore, che risale. Nella parte alta dei tubi alettati raffreddati ad acqua effettuano la condensazione del vapore, che autonomamente discende per effetto della gravità. Sono molto semplici nel funzionamento, ma alquanto costosi e richiedono una adeguata procedura di parzializzazione e scarico dell'impianto in caso di manutenzione dei dispositivi elettronici.

- **Sistemi bollenti in convezione forzata**

Questo sistema utilizza una pompa di circolazione per movimentare il fluido attraverso l'evaporatore ed il condensatore. La possibilità di variare la portata circolante, adattandola al carico termico istantaneo è indispensabile per evitare la crisi termica all'interno dei canali del dissipatore metallico. Le portate massiche impiegate sono comunque molto inferiori di quelle di un sistema a liquido di equivalente prestazione, con conseguente diminuzione dell'energia di pompaggio.

7.3 L'impianto sperimentale EMOTICONS

Un impianto sperimentale appositamente progettato e costruito dai ricercatori dell'ENEA è quello descritto in questo paragrafo e denominato EMOTICONS, sigla che sta per Electric MOBility Thermal Innovative CONTROL System.

L'intero sistema sperimentale è costituito principalmente da due circuiti: un circuito primario riempito con il refrigerante e un circuito secondario per l'acqua di raffreddamento. È presente anche un terzo circuito, con un *dry cooler* ad aria forzata per dissipare il calore in eccesso.

7.3.1 Descrizione funzionale del circuito

Il refrigerante liquido, prelevato da un serbatoio di accumulo, viene fatto circolare per mezzo di una pompa volumetrica a ingranaggi. Il serbatoio di raccolta è posto nella parte superiore del circuito, per garantire un adeguato battente idrostatico di aspirazione ed evitare così la cavitazione della pompa. La pressione all'interno del serbatoio è regolata da un'elettrovalvola che inietta ed espelle N_2 . Un flussimetro ad effetto Coriolis posto all'ingresso dell'evaporatore a multicanale misura la portata del liquido.

Due termocoppie di tipo K posizionate all'ingresso e all'uscita dell'evaporatore misurano le temperature del fluido. Un sensore di pressione assoluta è posto all'ingresso dell'evaporatore, mentre il ΔP attraverso la sezione di prova è rilevato con un sensore di pressione differenziale. Le temperature della base dell'evaporatore sono misurate per mezzo di termocoppie calibrate (sempre di tipo K) inserite all'interno dello spessore della base metallica. La potenza termica in ingresso è fornita da tre riscaldatori a cartuccia, da 400W ciascuno, collocati all'interno di un cubo di alluminio, il quale simula la superficie del chip da raffreddare. La temperatura di questa interfaccia viene misurata da una termocoppia dedicata, inserita all'interno di un foro ricavato sulla parte superiore del blocco di alluminio.

Il fluido entra nell'evaporatore a multicanale dove in parte vaporizza, poi fluisce nel condensatore dove torna completamente liquido grazie all'acqua del secondario. In seguito, esso torna nel serbatoio di accumulo per ricominciare il ciclo. È disponibile, infine, un terzo circuito, raffreddato da un dry cooler ad aria, per evitare il surriscaldamento del circuito secondario.

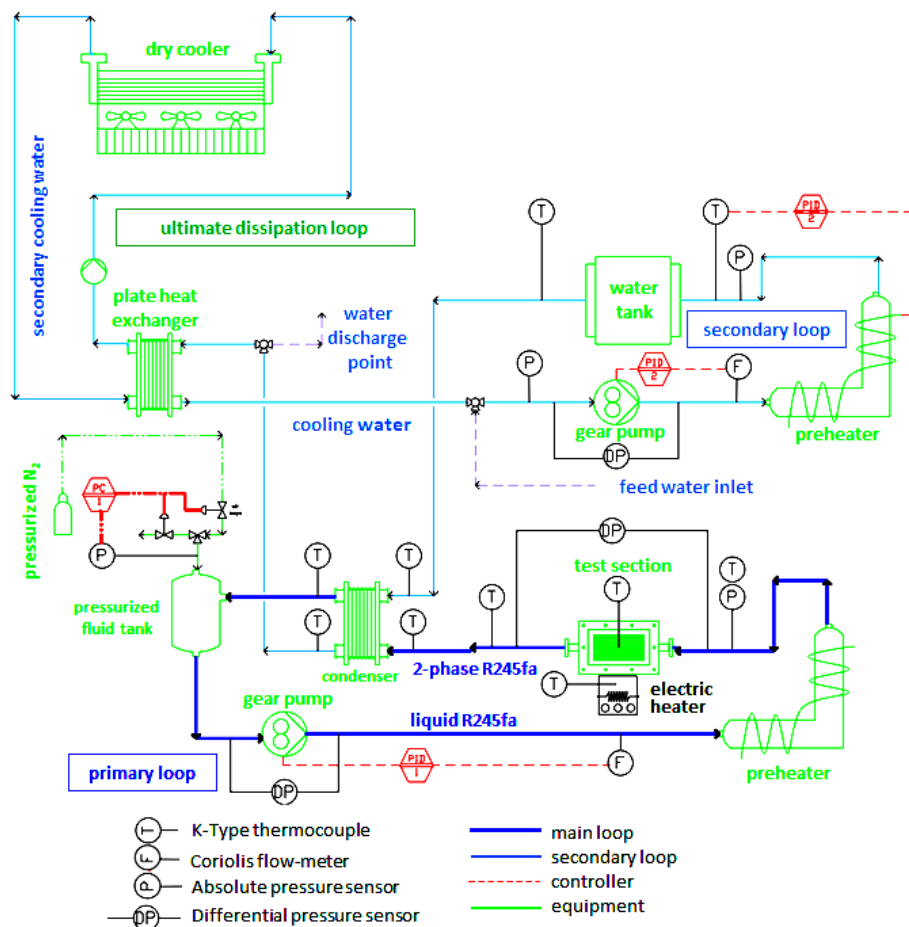


Figura 3: schema funzionale dell'impianto sperimentale EMOTICONS

La sezione di prova è costituita dall'evaporatore a multicanale in alluminio (superiormente sigillato da una lastra di polycarbonato), dal riscaldatore di alluminio, dai manicotti strumentati per l'ingresso e l'uscita del fluido e dalle termocoppie necessarie per la rilevazione della temperatura di parete. L'intera parte riscaldata è isolata con mattoni refrattari di vermiculite a bassa conducibilità termica ($\sim 0,10 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$), per ridurre al minimo le dispersioni di calore verso l'ambiente esterno. In Figura 5 sono mostrati i componenti principali della sezione di prova.

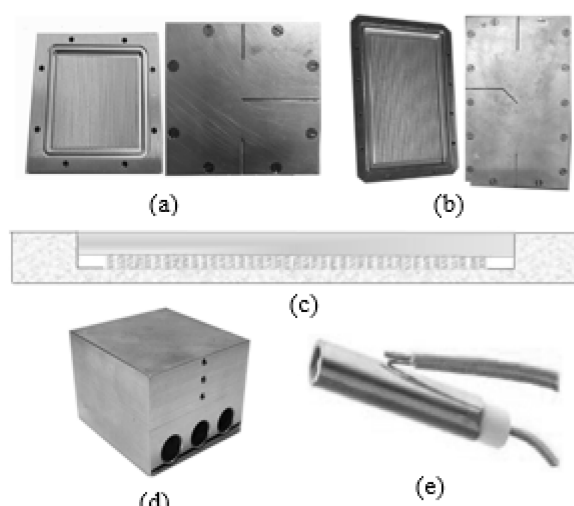


Figura 4: evaporatori da 50x50mm (a) e da 50x100mm (b), con sezione trasversale (c) blocco riscaldatore (d) ; riscaldatori a cartuccia (e)

7.3.2 Metodo

L'acquisizione di tutte le variabili misurate avviene grazie ad un programma di acquisizione, all'interno del quale sono preventivamente impostate anche le soglie di sicurezza per la pressione massima di esercizio, la portata minima e le temperature massime di parete. Al di sopra di questi valori di soglia viene interrotta l'alimentazione. Lo stesso programma permette anche di controllare la portata, la pressione e la potenza durante l'esecuzione dei test. Le grandezze misurate vengono acquisite a una frequenza di 1000 Hz ed mediate ogni secondo. La memorizzazione dei dati avviene solo quando le temperature superficiali si sono stabilizzate, ovvero durante un regime di tipo stazionario.

7.3.3 Test Matrix

La campagna sperimentale è pensata per riprodurre le diverse condizioni che si possono verificare durante l'utilizzo di un inverter per auto elettriche. I flussi termici analizzati (riferiti alla sola area di base dello scambiatore a multicanale) spaziano in un range tra 30 e 330 kW/m^2 . I valori di pressione, portata e potenza esaminati durante la campagna sperimentale sono riassunti nella seguente tabella

Pressione	Flussi di massa	Potenza Termica
<i>bar</i>	<i>kg/m² s</i>	<i>W</i>
1,8	32	da 150 W a 1200 W incrementi di 150W
	64	
	97	
	128	
2	64	da 100 W a 800 W incrementi di 100W
	94	
	122	

3	64	da 100 W a 800 W incrementi di 100W
	94	
	122	
4	64	da 100 W a 800 W incrementi di 100W
	94	
	122	

7.3.4 Risultati

I risultati dimostrano che il coefficiente di scambio termico h aumenta all'aumentare della pressione (Figura 6) e del flusso di massa, a parità di flusso termico (Figura 7). Per un titolo termodinamico basso il valore di h è proporzionale al solo flusso termico, come nel caso documentato del *pool boiling*. Si evince inoltre che negli evaporatori con canali più larghi il coefficiente di scambio sperimentale è maggiore che nel caso dei canali con diametri idraulici minori.

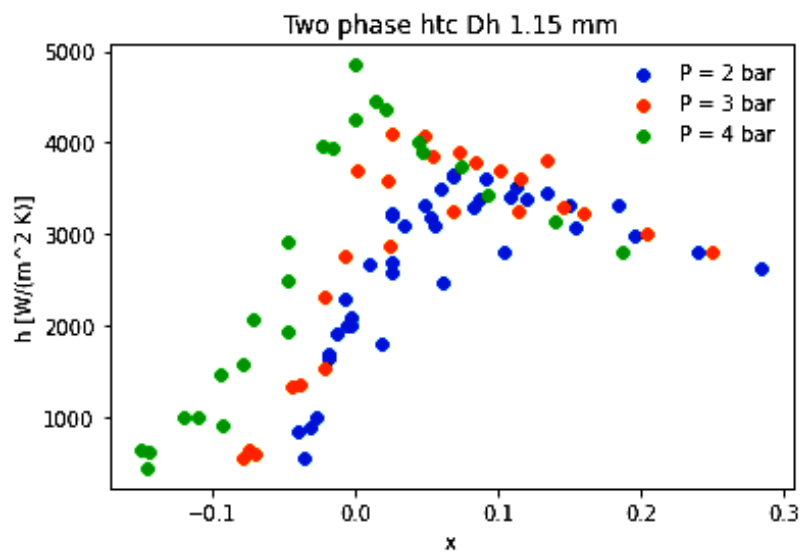


Figura 5: andamento del coefficiente di scambio termico rispetto al titolo termodinamico, per varie pressioni di saturazione.

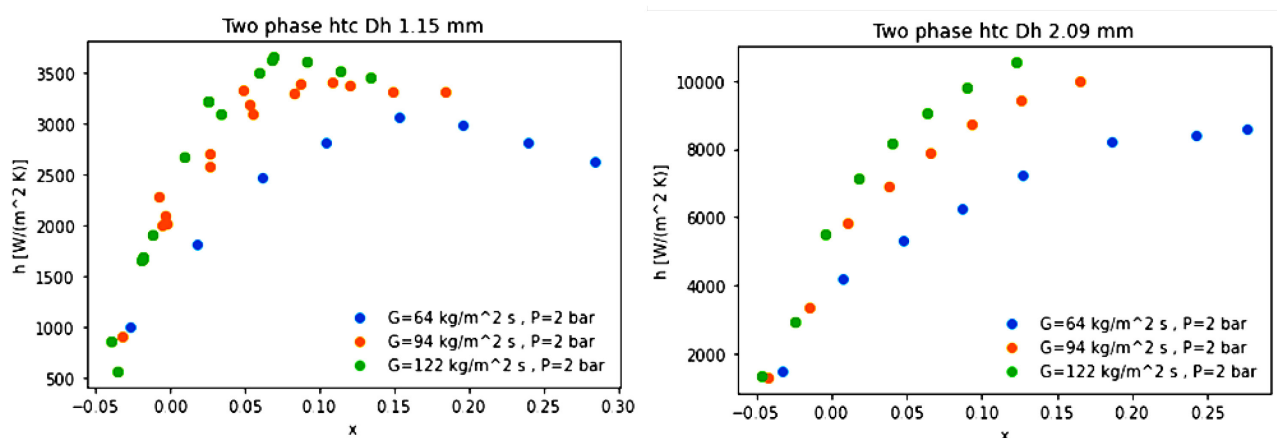


Figura 6: confronto tra del coefficiente di scambio termico tra canali di diversa larghezza, per una pressione di 2 bar e per diverse portate specifiche;

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

9 Pubblicazioni scientifiche

Dai risultati sperimentali è stata tratta una pubblicazione per la rivista scientifica IOP[1]

- [1] F. Riccardi, G. Zummo, L. Saraceno, L. Gugliermetti, e G. Caruso, «Experimental analysis of flow boiling heat transfer in multi-microchannel evaporators», *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2685, fasc. 1, p. 012069, gen. 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2685/1/012069.

10 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione eventualmente scaturiti dall'attività svolta