



Ricerca di Sistema elettrico

Progettazione dell'impianto sperimentale di tipo two-phase pumped loop

A.Lattanzi, M. Morlacca, L. Saraceno, A. Scotini,
L. Simonetti, G. Zummo

Report RdS/PTR2019/029

Progettazione dell'impianto sperimentale di tipo two-phase pumped loop
Autori: A.Lattanzi*, M. Morlacca*, L. Saraceno*, A. Scotini*, L. Simonetti*, G. Zummo*
*ENEA
Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità
Obiettivo: Tecnologie
Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali
Work package: Mobilità
Linea di attività: Accumuli elettrochimici automotive: test di abuso elettrico e invecchiamento e sviluppo di sistemi per il controllo termico
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA
Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 STATO DELL'ARTE	6
3 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	9
3.1 REQUISITI DEL SISTEMA DI CONTROLLO TERMICO.....	9
3.2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE	10
3.3 ANALISI FEM DELL'EVAPORATORE	12
3.4 RISCALDATORE ELETTRICO	18
4 CONCLUSIONI.....	20
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	21

Sommario

Nel presente rapporto verrà affrontato il tema di un innovativo sistema di raffreddamento di tipo bifase che utilizza il calore latente di evaporazione e di condensazione quale meccanismo di trasferimento del calore per i componenti più critici dei veicoli elettrici: inverter, motore elettrico e batterie. Il sistema proposto prevede lo sviluppo di un circuito idraulico di tipo two-phase flow pumped loop in cui sono presenti un evaporatore ed un condensatore, oltre la pompa di circolazione ed un vaso di espansione. L'evaporatore e il condensatore utilizzeranno la tecnologia dei microcanali con coefficienti di scambio termico elevati. L'evaporatore consentirà di raffreddare il componente, inverter o le batterie, ed il condensatore consentirà di cedere il calore all'aria esterna. Lo scambiatore sarà sviluppato ottimizzando lo scambio termico in ebollizione agendo sulla geometria dei microcanali.

Le attività del primo anno prevedono un'analisi dello stato dell'arte sul raffreddamento dei veicoli elettrici e la progettazione di un impianto sperimentale per studiare il two-phase flow pumped loop per un veicolo elettrico. L'impianto sperimentale proposto ha come obiettivi lo studio in laboratorio della nuova tecnologia di controllo termico in diverse condizioni di portata, di temperatura e di pressione del fluido. I carichi termici tipici delle schede IGBT, presenti negli inverter, saranno simulate da riscaldatori elettrici fino a 3000W. Il fluido termovettore sarà un refrigerante con temperature di ebollizione intorno a 10 °C.

Il rapporto conterrà una descrizione dello stato dell'arte dei sistemi di controllo termico dei veicoli elettrici e le attività di progettazione dell'impianto sperimentale per le prove in laboratorio.

1 Introduzione

Una delle principali cause dei guasti nei sistemi elettronici è rappresentata dal calore e dalle conseguenti temperature elevate. Le alte temperature, generate da sistemi di raffreddamento inadeguati, provocano rotture premature nei componenti elettronici. L'industria elettronica sta vivendo da diversi anni una forte evoluzione che porta alla commercializzazione di componenti elettronici sempre più potenti e con una miniaturizzazione spinta. Tale evoluzione verso la miniaturizzazione crea problemi nel raffreddamento di densità di potenza termica sempre più elevate ($50 - 100 \text{ W/cm}^2$). Le soluzioni attualmente disponibili sul mercato non sono sufficienti a garantire un adeguato raffreddamento di tali densità di potenza termica. Questo lavoro si occupa dello studio di un innovativo sistema di raffreddamento con la tecnologia del two-phase cooling che consente lo smaltimento di elevate densità di potenza termica dai componenti elettronici più critici.

La caratteristica innovativa del sistema di controllo termico basato sul two-phase cooling (raffreddamento bifase) è rappresentata dall'utilizzo del trasferimento di calore tramite l'ebollizione in convezione forzata (flow boiling). Tale modalità di trasferimento del calore che utilizza il calore latente di vaporizzazione, è estremamente efficiente in termini di flusso termico che può essere trasferito da un componente elettronico al fluido di raffreddamento. In confronto ad un sistema classico di tipo liquid cooling, il sistema di controllo termico proposto è caratterizzato da coefficienti di calore più elevati e portate nettamente più basse, con evidenti riduzioni delle potenze di pompaggio. Per esempio, da un componente elettronico delle dimensioni di una CPU Intel i7 è possibile rimuovere $500 - 600 \text{ W}$ termici con una portata di soli 20 l/h , un valore di ben venti volte inferiore rispetto le portate tipiche dei sistemi di tipo liquid cooling.

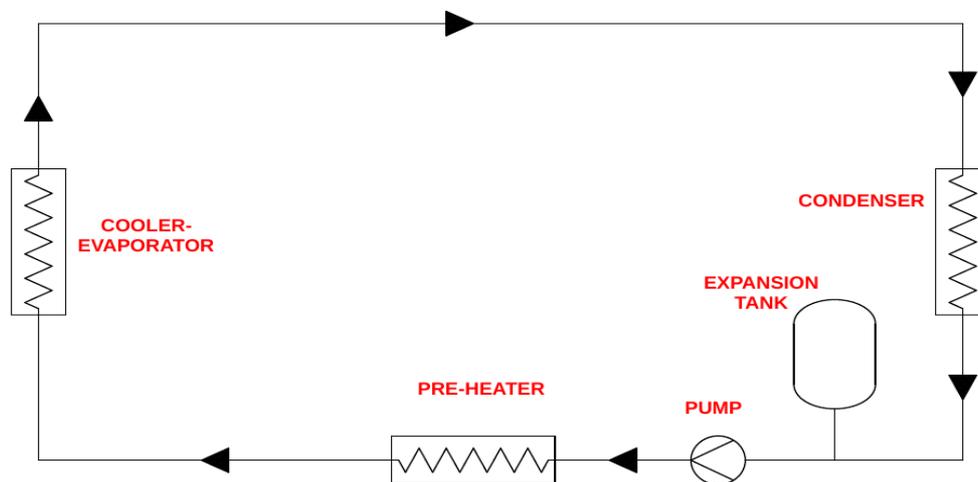


Figura 1 - Schema di un tipico circuito idraulico di un sistema di raffreddamento bifase

Durante il primo anno del progetto di ricerca è stata condotta la progettazione dell'impianto sperimentale per provare questa nuova tecnologia in laboratorio. Gli obiettivi dell'impianto sperimentale riguardano la sperimentazione in diverse condizioni del sistema di raffreddamento bifase tramite un riscaldatore elettrico. Il riscaldatore simula una tipica IGBT di un inverter per veicoli elettrici.

2 Stato dell'Arte

L'evoluzione dei sistemi elettronici è caratterizzata da un continuo aumento della potenza e delle frequenze di lavoro ed una miniaturizzazione dei componenti elettronici. La conseguenza è un costante aumento della densità di potenza termica che pone sfide molto complesse per il controllo termico dei sistemi elettronici.

Gordon Moore in un articolo famoso del 1965 [1] illustrava come nel periodo 1959-1965 il numero dei transistor in un chip elettronico fosse raddoppiato ogni anno. Le osservazioni empiriche di Moore sono divenute col tempo una legge, la legge di Moore.

L'ipotesi iniziale, formulata da Moore, indicava che il numero di transistor nei microprocessori sarebbe raddoppiato ogni 12 mesi circa. Questo incremento in realtà si modificò nel corso degli anni ed i tempi si allungarono a 24 mesi. La legge nel corso del tempo venne riformulata elaborata nella sua forma definitiva, ovvero che il numero di transistori nei processori raddoppia ogni 18 mesi.

La conseguenza di questo trend è che i componenti elettronici sono soggetti ad un aumento della densità di potenza termica da dissipare adeguatamente per mantenere la temperatura di esercizio del componente stesso a valori accettabili.

Questa problematica negli ultimi anni è diventata un elemento critico per lo sviluppo dei nuovi sistemi elettronici ad alta potenza. In particolare, per il settore dei veicoli elettrici il controllo termico dell'inverter, del motore elettrico e delle batterie è un fattore limitante dello sviluppo. Tra questi, l'inverter, costituito da uno o più moduli IGBT, è il componente più critico da raffreddare. Le due configurazioni utilizzate per raffreddare i moduli IGBT sono riportate nelle figure 2 e 3. La figura 2 mostra un modulo IGBT raffreddato a liquido tramite uno scambiatore di calore con condotto tubolare, mentre la Figura 3 mostra lo schema di un generico componente elettronico raffreddato con uno scambiatore di calore a microcanali paralleli. I microscambiatori a microcanali sono i sistemi più efficienti di raffreddamento.

Nei moduli IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) degli inverter presenti a bordo dei veicoli e nelle centraline di ricarica delle batterie, si possono raggiungere densità di potenza termica fino a 1 – 1.5 MW/m². Sotto la spinta del mercato dei veicoli elettrici, tale valore tenderà ad aumentare nei prossimi anni, fino a 5 MW/m² [2]. Inoltre, i moduli IGBT sono caratterizzati da una distribuzione non uniforme della temperatura con regioni con elevate concentrazioni di flusso termico con conseguente presenza di regioni a temperature diverse estremamente difficili da raffreddare con i sistemi attualmente disponibili sul mercato. Da questa situazione nasce l'esigenza di sviluppare nuovi sistemi di thermal management che consentano di raffreddare efficacemente densità di potenze molto elevate.

Tra i sistemi di controllo termico per elettronica di potenza, il più utilizzato attualmente disponibile sul mercato è il sistema basato sulla convezione forzata di liquido senza cambiamento di fase. Di seguito si farà un'analisi comparativa tra le caratteristiche dei sistemi a convezione forzata (mechanical pumped loop) e quelli a convezione forzata con cambiamento di fase (two-phase mechanical pumped loop).

I circuiti idraulici di riferimento per i due sistemi sono riportati nelle Figure 1 (sistema con cambiamento di fase) e 4 (sistema senza cambiamento di fase).

Entrambi i sistemi utilizzano una pompa per pompare il fluido allo stato liquido dal serbatoio allo scambiatore di calore. Nel sistema a convezione forzata, il fluido riceve il calore dal componente da raffreddare tramite il calore sensibile nello scambiatore di calore a microcanali. Successivamente il calore viene dissipato nel radiatore nell'ambiente o in un circuito secondario. Nel sistema con cambiamento di fase, fluido evapora nello scambiatore di calore a microcanali e successivamente viene condensato nel condensatore.

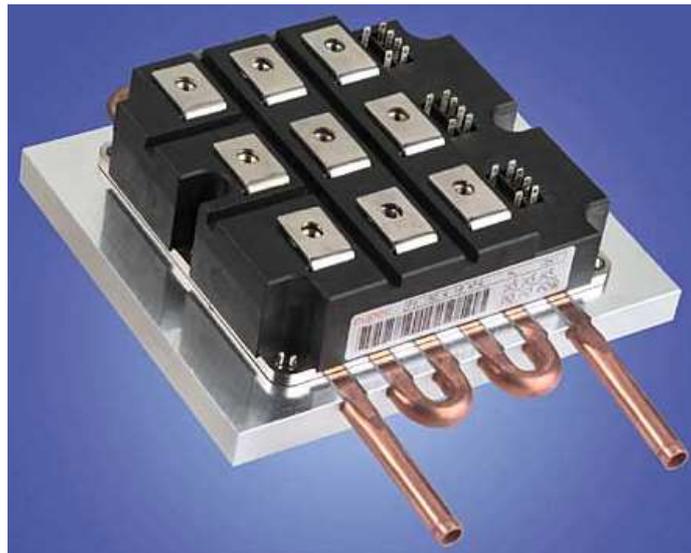


Figura 2 - Esempio di modulo IGBT raffreddato a liquido

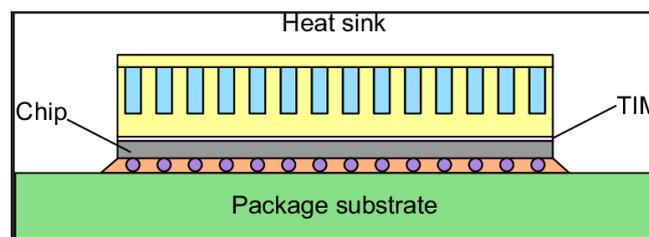


Figura 3 - Schema di assemblaggio di uno scambiatore di calore a microcanali e di un componente elettronico

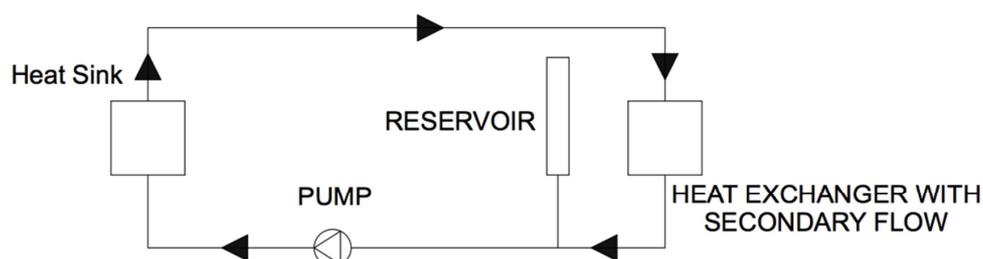


Figura 4 - Schema del circuito idraulico di un sistema di raffreddamento a convezione forzata (mechanical pumped loop)

La differenza principale dei due sistemi è sintetizzata nel bilancio energetico nelle due equazioni seguenti, equazione 1 per il sistema mechanical pumped loop, l'equazione 2 per il two-phase mechanical pumped loop:

Equazione 1

$$Q_{in} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$Q_{in} = \dot{m} \cdot h_{lv} \cdot \Delta x$$

Equazione 2

Per tali equazioni, c_p rappresenta il calore specifico del fluido, \dot{m} rappresenta la portata massica e ΔT la differenza tra le temperature di uscita e di ingresso dello scambiatore di calore, h_{lv} è il calore latente di vaporizzazione, Δx la variazione del titolo termodinamico (la frazione di vapore nel fluido bifase).

Nei sistemi a convezione forzata monofase (equazione 1), il calore specifico dipende al fluido usato, per l'acqua il c_p è pari a 4.187 kJ/kg-K, mentre il ΔT dovrebbe essere contenuto per ridurre i gradienti di temperatura sulla superficie del componente elettronico.

Nei sistemi bifase (equazione 2), il calore trasferito al fluido dipende dalla portata (\dot{m}), dal calore latente di evaporazione, h_{lv} , e dalla variazione della frazione di vapore. Sempre con riferimento all'acqua, il valore di h_{lv} pari a 2257 KJ/kg, è notevolmente maggiore rispetto il valore di c_p . Pertanto, dalle due equazioni si può concludere che i sistemi bifase sono caratterizzati da un elevato potenziale di raffreddamento anche con portate di fluido relativamente ridotte. Questo comporta una riduzione della potenza elettrica di pompaggio rispetto i sistemi monofase, per i quali il raffreddamento di elevati valori di potenza termica possono essere ottenuti solo a fronte di portate elevate.

Si può, quindi concludere che i sistemi bifase, rispetto i sistemi monofase, sono caratterizzati da una potenziale elevata capacità di raffreddamento con potenze elettriche di pompaggio ridotte. Per le applicazioni sui veicoli elettrici, il sistema bifase, grazie a queste caratteristiche, rappresenta una valida alternativa al sistema di raffreddamento a liquido monofase.

3 Descrizione delle attività svolte e risultati

3.1 *Requisiti del sistema di controllo termico*

Il sistema di controllo termico ha lo scopo di simulare il sistema di raffreddamento di una tipica auto elettrica. In particolare, si prevede che il sistema sarà utilizzato per raffreddare l'inverter e il motore elettrico, sostituendo il sistema di raffreddamento a liquido attualmente utilizzato.

La potenza termica massima da smaltire del sistema è pari a 3000 Watt, mentre l'intervallo di temperature di esercizio dell'elettronica va da 15°C a 100°C.

La potenza termica totale comprende il raffreddamento sia dell'inverter che del motore elettrico. In tal modo, il sistema two-phase cooling sostituirà completamente il circuito di raffreddamento ad acqua.

La temperatura dell'ambiente in cui verrà dissipato il calore prodotto dai componenti elettronici ed elettrici varierà tra 0°C e 50°C.

Il sistema di raffreddamento di tipo two-phase cooling è stato progettato sulla base dei requisiti sopra definiti.

Grandezza	Valore minimo	Valore massimo
Potenza termica	0	3000 W
Temperatura ambiente	0°C	50°C
Temperatura massima del componente elettronico	15°C	100°C

Tabella 1 – Requisiti per il sistema di controllo termico dell'elettronica di bordo del veicolo elettrico

Materiali

Il fluido termovettore per il sistema di raffreddamento bifase verrà selezionato da un gruppo di refrigeranti con caratteristiche simili. Verranno effettuati dei test preliminari per identificare il fluido migliore in rapporto alle condizioni operative e di capacità di smaltimento della potenza termica. Infine, verranno tenuti in considerazione gli aspetti ambientali e di sicurezza.

Il circuito idraulico verrà realizzato con raccorderia e tubazioni in materiale plastico. Le tubazioni saranno flessibili per facilitare la posa in opera del circuito idraulico.

I materiali scelti saranno compatibili con i fluidi che verranno utilizzati. Sono previsti test di compatibilità chimica tra i fluidi e i materiali. Comunque, i materiali saranno verificati a 7 bar e temperature di 65°C.

Generazione della potenza termica

Nel circuito di prova, la potenza termica sviluppata dall'inverter verrà simulata tramite un riscaldatore elettrico. La geometria del riscaldatore sarà definita in base alla geometria della superficie dell'inverter su cui verrà posizionata la cold plate (lo scambiatore di calore).

Sicurezza del sistema

Il circuito idraulico verrà realizzato con diversi sistemi di sicurezza per il controllo delle temperature e delle pressioni massime raggiunte nei punti più critici.

Sicurezza termica

La massima temperatura del simulatore dell'inverter è fissata a 120°C all'interfaccia tra le superfici dell'evaporatore (cold plate) e del blocco del simulatore. Qualora la temperatura della superficie del blocco del simulatore raggiunga questo limite, il sistema automatico di controllo farà scattare il relays dell'alimentatore elettrico del riscaldatore.

Sistema di sicurezza per la pressione massima

La pressione del sistema sarà verificata dal sistema automatico di controllo basato su Labview. Nel caso in cui la pressione raggiunga un valore di allarme, il sistema di controllo farà scattare il relays dell'alimentatore per eliminare la generazione di vapore. Oltre al sistema automatico di controllo, sarà installata nel circuito idraulico una valvola di sicurezza per evitare qualsiasi problema di sovrappressione.

3.2 Descrizione dell'impianto sperimentale

L'apparato sperimentale, riportato in Figura 2, è costituito dai seguenti componenti: pompa, misuratore di portata, valvola di sicurezza, scambiatore di calore a multi-mini canali (Multi Channel Micro Heat Exchanger, MCMHE, nella figura), un condensatore ed un serbatoio che ha la funzione di vaso di espansione. La pompa è una pompa ad ingranaggi che consente di sviluppare portate nell'intervallo da 0 a 1.8 l/m con prevalenze fino a 5 bar. Il misuratore di portata è un sensore a turbina con portate fino a 10 l/m. Lo scambiatore di calore è costituito da un evaporatore con un certo numero di canali paralleli, lungo i quali il fluido evapora. Il condensatore è costituito da microcanali raffreddati ad aria. Il condensatore viene raffreddato da un flusso d'aria garantito da 4 o 6 ventole.

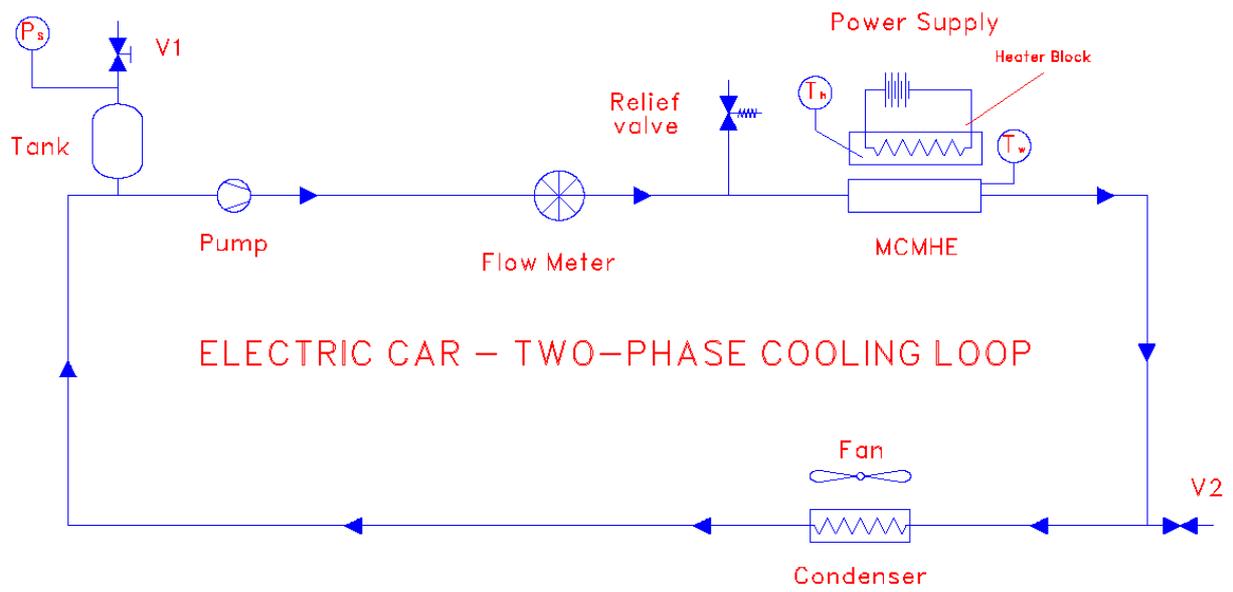


Figura 2 - Schema del circuito sperimentale

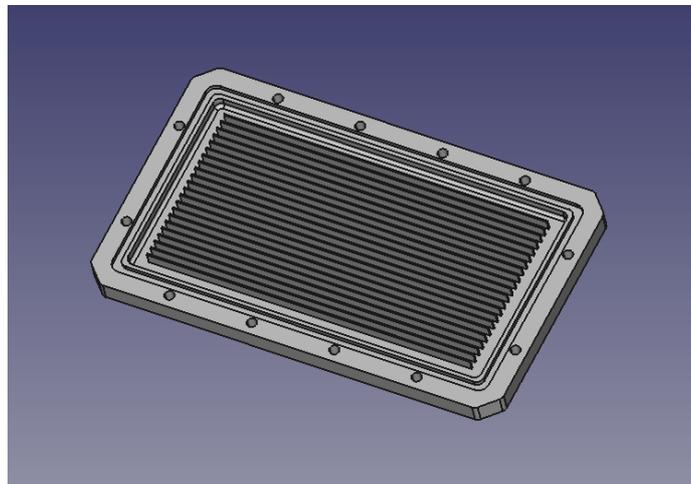


Figura 3 - Modello 3D dell'evaporatore multicanale

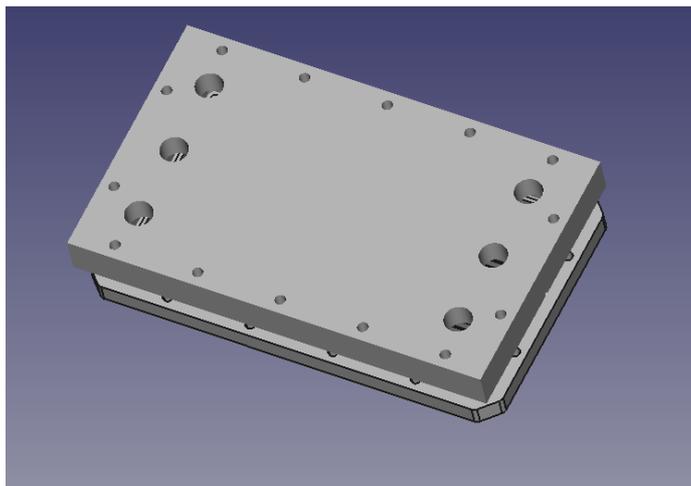


Figura 4 - Modello 3D dello scambiatore di calore multicanale

Le prove di scambio termico con il fluido refrigerante verranno effettuate nell'evaporatore dello scambiatore di calore per i test in ebollizione (flow boiling) riportato nella Figura 3. L'evaporatore sarà di tipo multicanale con una geometria simile a quella rappresentata nel modello 3D della figura 3. La figura mostra l'interno dello scambiatore di calore multicanale, la cui superficie di scambio termico è costituita da canali rettangolari separati da alette di piccolo spessore. Questo tipo di scambiatore di calore consente superfici di scambio termico molto elevate in rapporto al volume complessivo dello scambiatore.

La Figura 4 mostra il modello 3D esploso dello scambiatore di calore costituito dall'evaporatore e dalla piastra di chiusura. Tale piastra sarà realizzata in materiale trasparente per permettere la visualizzazione dei fenomeni di ebollizione all'interno dei canali dell'evaporatore. Tale soluzione consentirà di studiare l'evoluzione dei flow pattern lungo i canali dell'evaporatore.

3.3 *Analisi FEM dell'evaporatore*

L'evaporatore è stato analizzato agli elementi finiti per verificare la resistenza meccanica della struttura soggetta ad una pressione interna. Gli obiettivi dell'analisi sono due: trovare lo spessore minimo del fondo dell'evaporatore per ridurre al minimo la resistenza termica del materiale e la disposizione migliore dei fori di fissaggio.

Per l'analisi si è fatto riferimento alla configurazione riportata nella figura 5.

Per la disposizione migliore dei fori di fissaggio si sono confrontate due configurazioni: a 4 fori, posti ai vertici della piastrina, e a 8 fori (Figura 5).

La configurazione a 4 fori consente di massimizzare l'area dove è presente l'alettatura, mentre la configurazione a 8 viti massimizza la resistenza meccanica a fronte di una riduzione della superficie alettata. La configurazione con la superficie alettata maggiore, consente di avere migliori capacità di trasferimento del calore attraverso la superficie di contatto con il componente da raffreddare.

L'analisi è tesa a verificare le caratteristiche dello stato di tensione e di deformazione delle due configurazioni dell'evaporatore e di scegliere la configurazione migliore per ridurre le deformazioni nell'area ove è presente l'o-ring e sulla superficie inferiore. Tali requisiti sono essenziali per eliminare il rischio di perdite di fluido dalla guarnizione e per ridurre al minimo la deformazione della superficie di contatto con il componente elettronico da raffreddare.

Le discretizzazioni dei due modelli a 4 e a 8 viti sono riportate nelle Figure 6 e 7.

I risultati delle analisi agli elementi finiti sono riportati nelle figure 8 - 13.

Il carico applicato è pari ad una pressione interna di 5 bar.

La configurazione a quattro fori tende a comportarsi come una piastra vincolata ai quattro angoli. La tensione (Figura 8, tensione di Von Mises) maggiore è localizzata nell'area centrale (in rosso) e nella zona dei 4 fori (Figura 9).

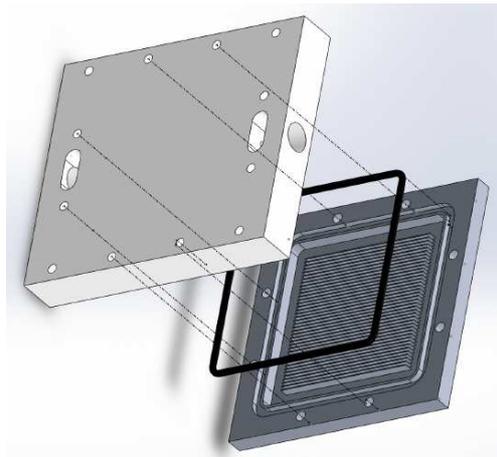


Figura 5 - Modello 3D dello scambiatore di calore multicanale con la guarnizione di tenuta

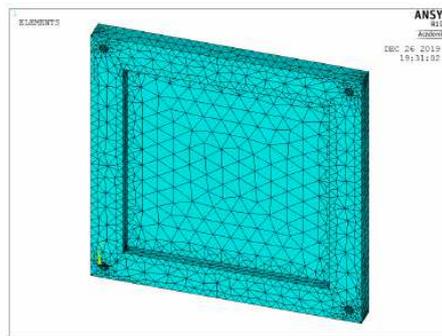


Figura 6 - Discretizzazione dell'evaporatore a 4 viti

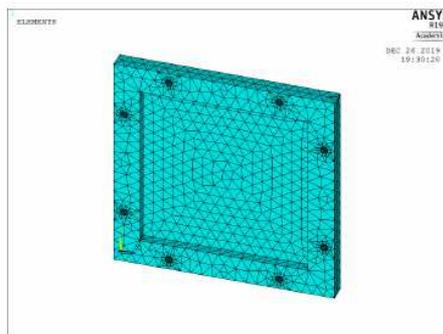


Figura 7 - Discretizzazione dell'evaporatore a 8 viti

La configurazione con 8 fori, i cui risultati sono riportati nelle Figure 10 e 11, si comporta come una piastra che è vincolata lungo i quattro bordi. Pertanto, la zona centrale risulta essere sottoposta ad una tensione minore rispetto la configurazione a 4 fori. Anche le aree intorno i fori risultano essere sollecitate in misura minore rispetto la configurazione a 4 fori.

L'analisi delle deformazioni dell'evaporatore è riportata nelle Figure 12 e 13, per la configurazione a 4 fori ed 8 fori, rispettivamente.

La deformazione massima per la configurazione a 4 fori si verifica nella zona centrale con uno spostamento di 0.41mm (Figura 12). La configurazione a 8 fori mostra uno spostamento massimo nella direzione z (normale al piano dell'evaporatore) pari a 0.16mm.

L'area della sede dell'o-ring, sul bordo dell'evaporatore, si deforma sensibilmente per la soluzione a 4 fori, mentre per la configurazione ad 8 fori la deformazione è insignificante.

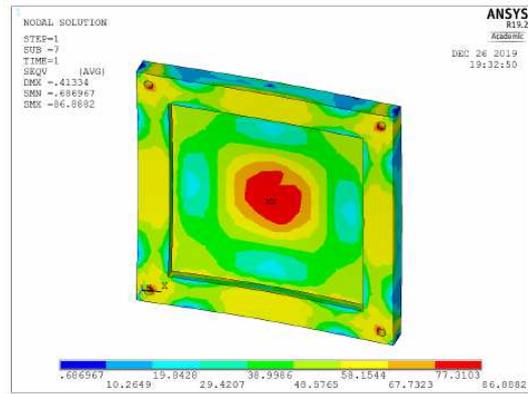


Figura 8 - Evaporatore a 4 viti, distribuzione delle tensioni

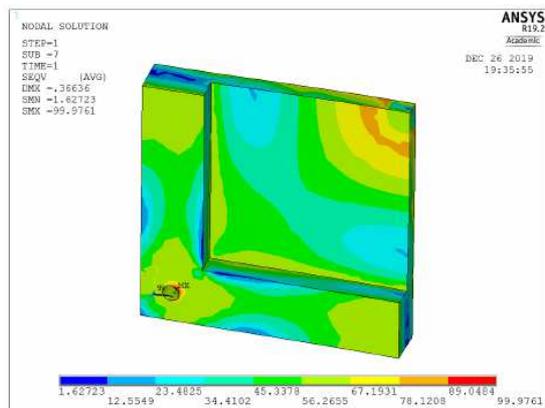


Figura 9 - Evaporatore a 4 viti, distribuzione delle tensioni nell'angolo della vite

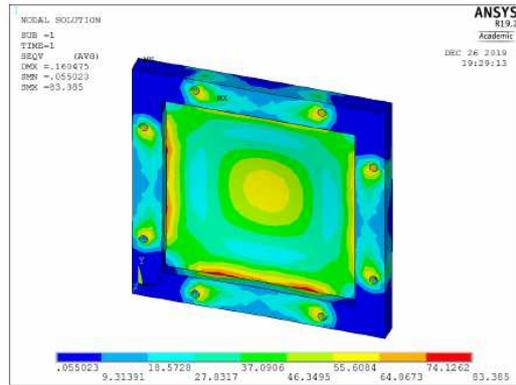


Figura 10 - Evaporatore a 8 viti, distribuzione delle tensioni

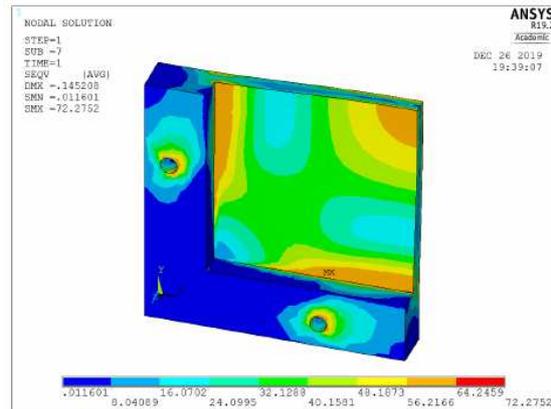


Figura 11 - Evaporatore a 8 viti, distribuzione delle tensioni nell'angolo

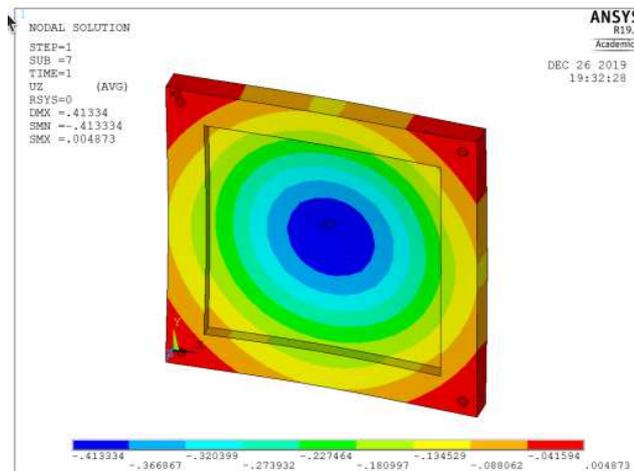


Figura 12 - Evaporatore a 4 viti, deformazioni normali

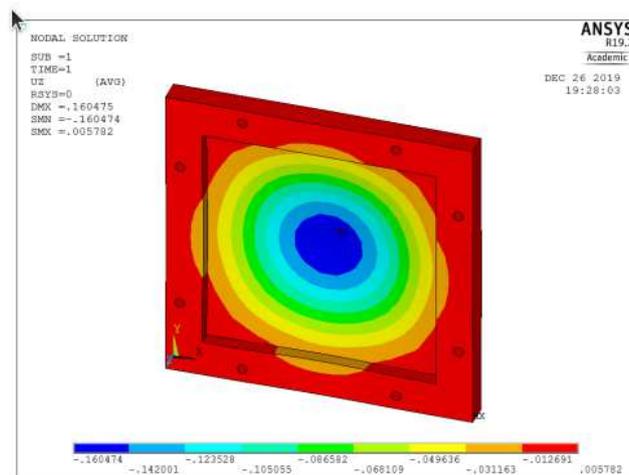


Figura 13 - Evaporatore a 8 viti, deformazioni normali

Dalle analisi effettuate si evince che la configurazione a 8 fori risulta avere uno stato di tensione minore rispetto la soluzione a 4 fori garantendo lo spessore minimo sul fondo della piastra dell'evaporatore. Anche l'analisi delle deformazioni mostra che la soluzione ad 8 fori risulta subire minori spostamenti sotto carico, garantendo la totale assenza di deformazioni nella sede dell'o-ring ed una ridotta deformazione nella superficie di contatto con il componente da raffreddare.

3.4 Riscaldatore elettrico

Il riscaldatore elettrico dell'impianto ha richiesto uno sviluppo ad hoc.

Il riscaldatore elettrico è costituito da un blocco di alluminio, rappresentato nella Figura 14, con tre fori in prossimità della superficie inferiore. Tali fori ospiteranno tre elementi riscaldanti elettrici a cartuccia. Gli elementi riscaldanti a cartuccia garantiranno la generazione della potenza termica necessaria per simulare i carichi termici rappresentati dai componenti elettronici da raffreddare.

La potenza generata dai riscaldatori a cartuccia in un singolo blocco è pari a 1000 W.

Per i test è previsto l'utilizzo di evaporatori di diversa lunghezza per verificare l'effetto della lunghezza della superficie alettata sullo scambio termico bifase. Pertanto, per il riscaldamento degli evaporatori di lunghezze diverse, si utilizzeranno diversi blocchi affiancati fino a raggiungere la lunghezza riscaldata desiderata. La Figura 15 mostra la configurazione con 3 blocchi riscaldanti per una lunghezza riscaldata di 180 mm.

Tale configurazione consentirà di generare una potenza termica massima di 3000W.

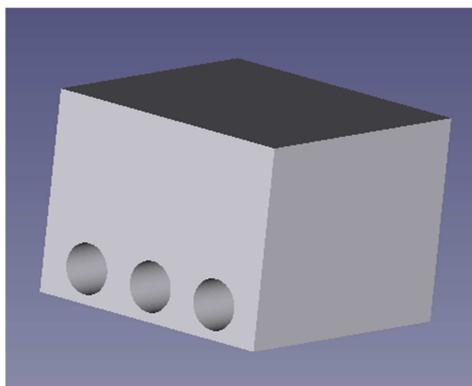


Figura 14 - Modello 3D del blocco riscaldatore

La Figura 16 mostra la sezione del sistema evaporatore-riscaldatore elettrico assemblati. Si possono osservare i fori nel blocco riscaldante per il posizionamento di tre termocoppie per la misura della temperatura di parete a diverse distanze dalla superfici di accoppiamento tra l'evaporatore e il blocco di alluminio. La misura delle temperature consentirà di calcolare il flusso termico trasferito al fluido.

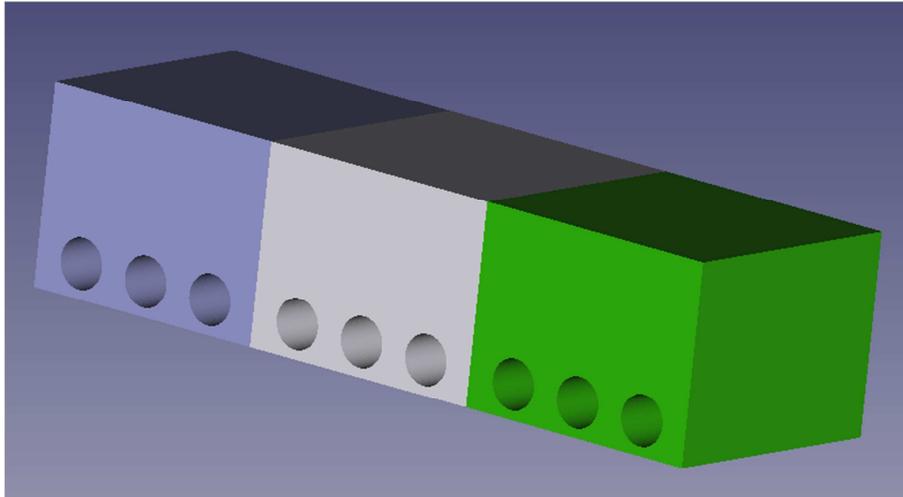


Figura 15 - Modello 3D della combinazione con 3 riscaldatori

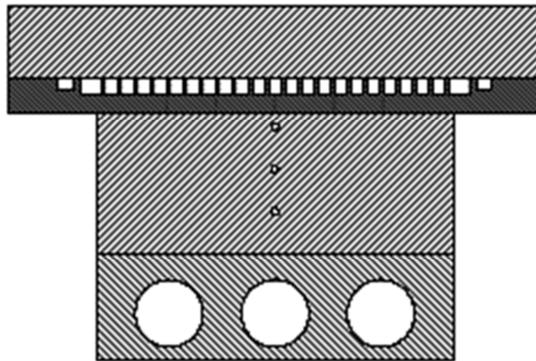


Figura 16 - Sezione del sistema evaporatore-riscaldatore elettrico

4 Conclusioni

Nel presente rapporto si è descritto un sistema di raffreddamento bifase basato sulla tecnologia del two-phase mechanically pumped loop per il raffreddamento dell'elettronica di potenza presente nei veicoli elettrici. Si sono evidenziati i motivi della scelta di questo sistema di raffreddamento e le differenze con un sistema a liquido in convezione forzata.

Si sono riportati i risultati dell'attività di progettazione del circuito idraulico e dei due componenti, l'evaporatore e il riscaldatore, che hanno richiesto uno sviluppo ad hoc.

L'evaporatore è stato analizzato agli elementi finiti per identificare la migliore configurazione in rapporto alle specifiche di progetto.

5 Riferimenti bibliografici

1. Moore, Gordon E. (1965-04-19). "Cramming more components onto integrated circuits". Intel.com.
2. Wang, P., McCluskey, P., and Bar-Cohen, A. (March 28, 2013). "Two-Phase Liquid Cooling for Thermal Management of IGBT Power Electronic Module." ASME. J.Electron. Packag. June 2013