RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

LA3.12 – Scambio Termico: Progettazione e dimensionamento di un sistema di raffreddamento bifase per una stazione di ricarica rapida

L. Saraceno, G. Zummo

RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA3.12_019

LA3.12 – SCAMBIO TERMICO: PROGETTAZIONE E DIMENSIONAMENTO DI UN SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO BIFASE PER UNA STAZIONE DI RICARICA RAPIDA

L. Saraceno, G. Zummo

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: *3.12*
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA
Responsabile Linea di Attività: Giuseppe Zummo ENEA
Mese inizio previsto: 1
Mese inizio effettivo: 1
Mese fine previsto: 18
Mese fine effettivo: 18

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 19
9 PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE 20
10 EVENTI DI DISSEMINAZIONE 21

1 Risultati attesi

1.1 Lista dei Risultati Attesi

- **Progettazione del sistema di raffreddamento bifase:** Progettazione di un sistema di controllo termico per l'elettronica di potenza e per le batterie nelle stazioni di ricarica con la tecnologia innovativa del raffreddamento bifase.
- **Integrazione con pompa di calore:** Il sistema di raffreddamento bifase verrà integrato con una pompa di calore di tipo termico innovativa per il recupero del calore di scarto e la produzione di potenza frigorifera.
- **Acquisto di materiali:** Effettuazione degli acquisti iniziali per i componenti necessari alla realizzazione del sistema di raffreddamento.
- **Realizzazione di un impianto di raffreddamento bifase sperimentale per test su IGBT:** progettazione e realizzazione di un impianto sperimentale per ottimizzare il raffreddamento con tecnologia two-phase cooling su IGBT commerciali.

2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti

2.1 Lista dei risultati ottenuti

1. Progettazione di un sistema di thermal management innovativo per inverter e batterie di un autobus elettrico di nuova generazione. Tale sistema integra due tecnologie innovative: il thermal management bifase e la pompa di calore ad adsorbimento. Il sistema consente di rioccupare parte del calore di scarto dell'inverter e di trasformarlo in potenza frigorifera per il controllo delle batterie durante la fase di ricarica.

2. Attività di procurement del materiale di consumo e della sensoristica. Inoltre,è stato selezionato ed acquisito il componente più critico rappresentato dalla pompa dio calore termica ad adsorbimento.

3. Progettazione e realizzazione di un impianto sperimentale per prove di scambio termico e di controllo su IGBT commerciali.

3 Prodotti attesi

3.1 Prodotti attesi

1. Impianto sperimentale per ottimizzare il raffreddamento con tecnologia two-phase cooling su IGBT commerciali.
2. Acquisto di una pompa di calore ad adsorbimento ad acqua e gel di silice.

4 Prodotti sviluppati

4.1 Elenco dei prodotti sviluppati

Progettazione e realizzazione di un impianto sperimentale per ottimizzare il raffreddamento con tecnologia two-phase cooling su IGBT commerciali.

Definizione e acquisto di una pompa di calore ad adsorbimento ad acqua e gel di silice.

Realizzazione di un impianto sperimentale per i test di raffreddamento bifase su componenti elettronici commerciali (IGBT).

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

5.1 Introduzione

Non sono stati riscontrati scostamenti dalle attività e dagli obiettivi previsti

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività di questa LA per il primo periodo, sono state dedicate alla progettazione di un avanzato sistema di gestione termica per stazioni di ricarica veloce di veicoli elettrici, all'acquisto del materiale necessario ed alla realizzazione di un impianto sperimentale per provare il sistema di raffreddamento bifase su IGBT commerciali.

L'attività di progettazione ha consentito di sviluppare un sistema di thermal management per inverter e batterie di un autobus elettrico di nuova generazione. Tale sistema integra due tecnologie: il thermal management bifase e la pompa di calore ad adsorbimento

L'attività di procurement ha consentito di acquistare parte del materiale di consumo e il componente più critico rappresentato dalla pompa dio calore termica ad adsorbimento.

Infine, è stato progettato e realizzato un impianto sperimentale per prove di scambio termico e di controllo su IGBT commerciali.

Le attività sono state condotte e portate a termine rispettando gli obbiettivi prefissati.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Introduzione

L'obiettivo di questa attività è sviluppare un sistema di gestione termica innovativo per una stazione di ricarica rapida dedicata ai veicoli elettrici. La gestione termica sarà basata sull'integrazione sinergica di un sistema di raffreddamento bifase con una pompa di calore termica, mirando a garantire efficienza ed efficacia nell'operatività del sistema nel suo complesso.

Il sistema di raffreddamento bifase sarà responsabile del controllo termico dell'elettronica di potenza dell'inverter. Questo approccio versatile e integrato consentirà di mantenere le temperature operative dei componenti elettronici entro limiti sicuri, ottimizzando così le prestazioni e la durata dei dispositivi.

Per quanto riguarda il recupero energetico, il calore residuo generato dai sistemi elettrici, che di solito è a bassa temperatura, verrà catturato e sfruttato da una pompa di calore termica. Questa pompa di calore, basata su tecnologie di adsorbimento che coinvolgono l'acqua e il gel di silice, avrà il compito di convertire il calore in potenza frigorifera utilizzabile. La potenza frigorifera così prodotta sarà impiegata in modo efficiente per il raffreddamento delle batterie dei veicoli durante la ricarica veloce, contribuendo così a mantenere ottimali le condizioni operative delle batterie stesse e migliorando la loro durata nel tempo.

Questa soluzione integrata rappresenta un passo significativo verso la creazione di stazioni di ricarica di veicoli elettrici più avanzate, efficienti ed eco-sostenibili, sfruttando al massimo le risorse energetiche disponibili e riducendo l'impatto ambientale complessivo del sistema. La combinazione di tecniche di raffreddamento innovative e strategie di recupero energetico aprirà la strada a nuovi standard di sostenibilità nel settore della mobilità elettrica.

Inoltre, è stata realizzato un impianto sperimentale di laboratorio per provare il sistema di raffreddamento bifase sugli IGBT (compoenti cruciali per gli inverter). Questo consente di verificare quali sono i parametri ottimali del sistema bifase sui vari modelli di IGBT che verranno impiegati nella stazione di ricarica.

7.2 Requisiti del sistema di controllo termico integrato

Il sistema di controllo termico integrato sarà utilizzato per raffreddare l'inverter della stazione di ricarica e le batterie di un autobus elettrico, sostituendo il sistema di raffreddamento originale ad aria.
La potenza termica massima da smaltire del sistema è pari a 5 KW Watt, mentre l'intervallo di temperature di esercizio dell'elettronica di potenza (IGBT) va da 15°C a 100°C. Per le batterie si prevede un intervallo di temperature da 20°C a 40°C. La temperatura dell'ambiente in cui verrà dissipato il calore di scarto dai componenti elettronici varierà tra 10°C e 40°C.
La Tabella 1 indica il sommario dei requisiti del sistema integrato.

Grandezza	Valore minimo	Valore massimo
Potenza termica	0	5 KW
Temperatura di esercizio dell'IGBT	20 °C	100 °C
Temperatura di esercizio delle batterie	20 °C	40 °C
Temperature ambientale	10 °C	40 °C

Tabella 1 – Requisiti per il sistema di controllo termico integrato

Materiali
Il fluido termovettore per il sistema di raffreddamento bifase verrà selezionato da alcuni refrigeranti con caratteristiche idonee per l'utilizzo previsto. 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.
I circuiti idraulici saranno realizzati con raccordi di tipo push-in e tubazioni in materiale plastico compatibili con i fluidi scelti. L'utilizzo delle tubazioni in materiale plastico e i raccordi di tipo push-in renderanno la posa in opera dei circuiti idraulici agevole e compatibile con la necessità di modifiche in corso d'opera. Si prevede che a valle dei primi test, ci possa essere l'esigenza di modifiche di alcuni componenti per adattarsi meglio al funzionamento del sistema.
Infine, si prevedono test di compatibilità chimica tra i fluidi e i materiali. Comunque, i materiali saranno verificati a 7 bar e temperature di 100°C.

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 degli IGBT dell'inverter è fissata a 100°C all'interfaccia tra le superfici dell'evaporatore e dell'IGBT stesso. Qualora la temperatura dell'evaporatore raggiunga questo limite, il sistema automatico di controllo spegnerà l'inverter. Sono previsti degli allarmi a livelli di temperatura prossimi alla temperatura massima, per consentire all'operatore di intervenire senza dover spegnere tutto il sistema di ricarica.

Sistema di sicurezza per la pressione massima
La pressione del sistema di raffreddamento bifase sarà verificata dal sistema automatico di controllo. Nel caso in cui la pressione raggiunga un valore di allarme, il sistema di controllo farà spegnere l'inverter per eliminare la generazione di vapore e consentire alla pressione di scendere a valori ammissibili. Oltre al sistema automatico di controllo, sarà installata nel circuito idraulico una valvola di sicurezza per evitare qualsiasi problema di sovrapressione.

7.3 Progettazione del sistema integrato per la gestione termica delle batterie

Questa sezione descrive l'attività di progettazione del sistema integrato di controllo termico della stazione di ricarica e del pacco batterie del bus elettrico. Il progetto è stato sviluppato sulla base dei requisiti definiti nella sezione precedente.
La stazione di ricarica e l'autobus di riferimento sono quelli realizzata presso l'Area Capanna del Centro Ricerche ENEA della Casaccia. Le figure 1 e 2 mostrano il piazzale nell'Area capanna con l'ubicazione del bus elettrico e del container contenente la stazione di ricarica.

La figura 3 mostra l'inverter per la ricarica delle batterie del bus elettrico. Nell'immagine, vengono evidenziati i due moduli IGBT da raffreddare con il sistema bifase.

Figura 1 – Immagine del piazzale presso l'Area Capanna dell'ENEA con l'ubicazione dell'autobus elettrico e del container contente la stazione di ricarica

Figura 2 –Autobus elettrico per i test di ricarica delle batteria

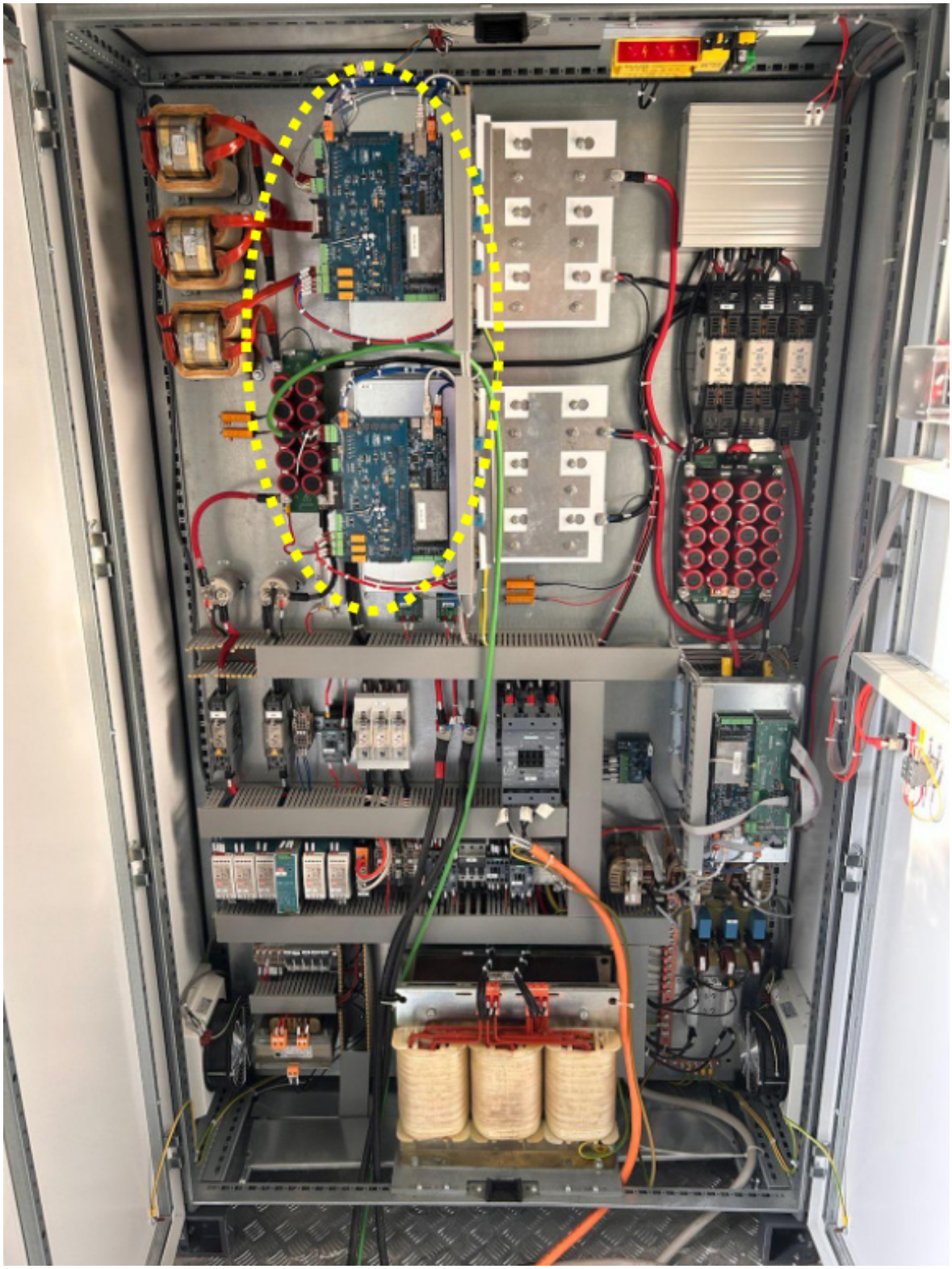

Figura 3 – Dettaglio dell'inverter della stazione di ricarica

Il sistema integrato di controllo termico e di recupero del calore di scarto è stato progettato per raffreddare l'inverter (Figura 3) e le batterie dell'autobus elettrico. Il sistema, inoltre verrà integrato con la pompa di calore termica descritta nella sezione seguente.

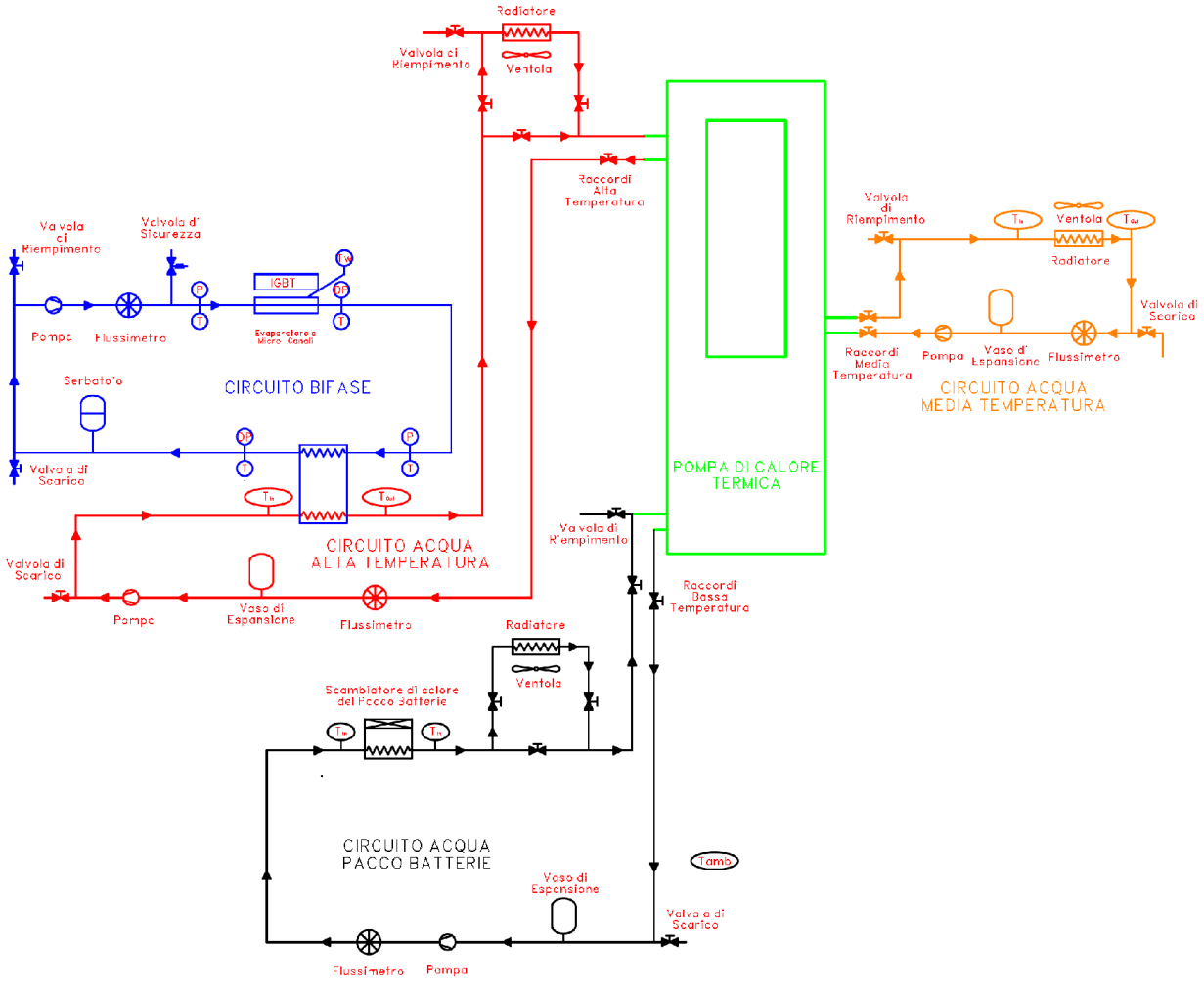

Figura 4 – Schema del sistema integrato di controllo termico e di recupero del calore della stazione di ricarica

La Figura 4 mostra lo schema del sistema integrato di thermal management e recupero energetico della stazione di ricarica. Il sistema è costituito da 4 circuiti idraulici ed una unità di refrigerazione ad adsorbimento. Sono presenti 4 circuiti idraulici indipendenti, la macchina termica e l'inverter da raffreddare. Il calore generato dall'elettronica di potenza dell'inverter viene rimosso attraverso il circuito bifase e trasferito dall'evaporatore a micro-canali al condensatore a piastre. Il circuito ad acqua ad alta temperatura ha il compito di trasferire il calore dal condensatore a piastre alla sezione ad alta temperatura della pompa di calore termica. Si prevede che la temperatura di ingresso dell'acqua sia nell'intervallo da 55°C a 70°C. Il circuito di acqua a media temperatura ha lo scopo di disperdere nell'ambiente il calore che non viene utilizzato dal chiller. Si ricorda che nelle migliori condizioni la pompa di calore termica ha un COP intorno a 0.5, per cui l'energia termica trasformata in frigorie è circa il 50%.
Il circuito a bassa temperatura ha la funzione di raffreddare le batterie del bus durante la ricarica veloce. Per questo circuito si stima che l'intervallo di temperatura sia tra 18 °C e 28 °C. Tale temperatura è sufficiente per mantenere il pacco batteria ad una adeguata temperature durante il ciclo di ricarica.

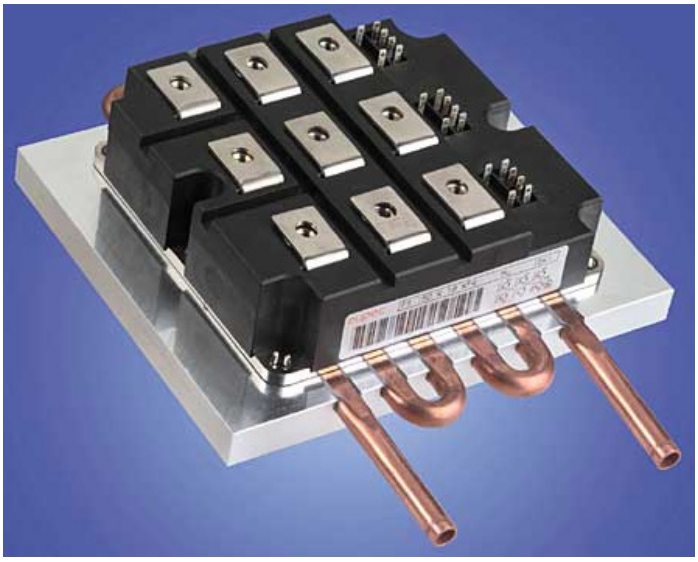

Figura 5 - Modulo IGBT raffreddato con una cold plate a liquido

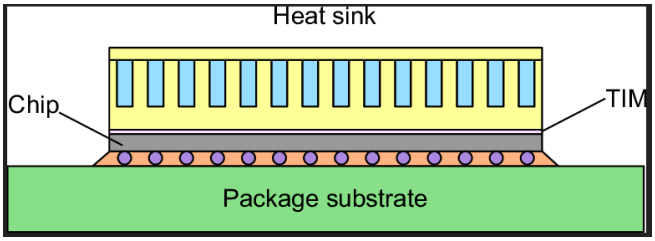

Figura 6 – Tipico assemblaggio di uno scambiatore di calore a microcanali e di un componente elettronico

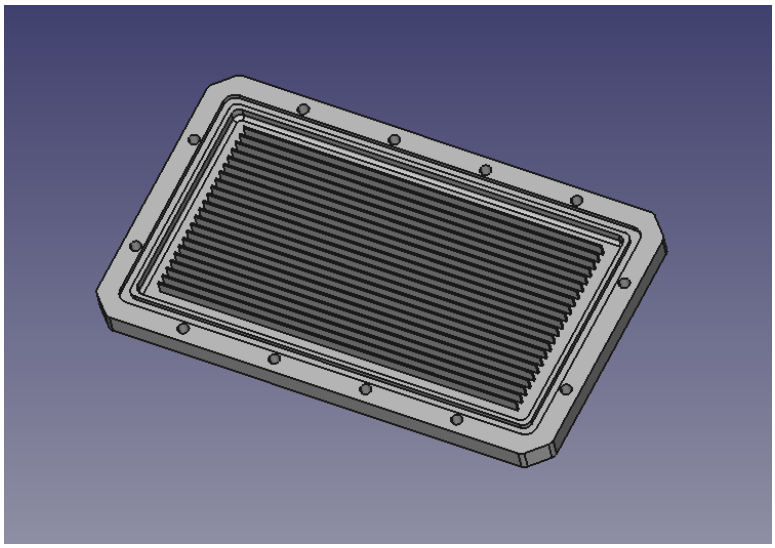

Figura 7 - Modello 3D dell'evaporatore multicanale

Il cuore del circuito di raffreddamento bifase è rappresentato dall'evaporatore caratterizzato dalla presenza di microcanali paralleli che raffredda un IGBT (Figura 5). La Figura 6 mostra un tipico assemblaggio di un IGBT ed una cold plate (evaporatore per la tecnologia two-phase cooling). Lo strato denominato TIM (Thermal Interface Material) è realizzato da un materiale con conducibilità termica elevata ed isolante elettrico caratterizzato da uno spessore dell'ordine dei 100 micrometri. La Figura 7 mostra la superficie interna di un evaporatore. Il trasferimento di calore avviene per evaporazione attraverso la superficie dei micro-canali

interni in cui scorre il fluido refrigerante. I micro-canali sono costituiti da canali rettangolari separati da alette di piccolo spessore. Questo tipo di scambiatori di calore possono avere superfici di scambio termico molto elevate in rapporto al volume complessivo dello scambiatore.

7.4 Unità di refrigerazione ad adsorbimento

L'unità di refrigerazione dell'acqua ad adsorbimento è una macchina in grado di produrre acqua refrigerata utilizzando come fonte termica in ingresso acqua con temperature comprese tra i 50° e i 95°C. Questo tipo di macchina è statica ed ecologica. I principali vantaggi offerti da questi sistemi di refrigerazione sono: un notevole risparmio nel consumo di energia elettrica, superiore al 90% se confrontato a equivalenti gruppi frigoriferi a compressione di vapore, un progetto costruttivo semplice, affidabile e flessibile nel funzionamento, un'elevata efficienza energetica e adeguamento ai carichi termici assicurati dal dispositivo di controllo e di gestione variabile dei flussi.

Il gel di silice in cristalli, contenuto nei pacchi di scambio, ha una capacità adsorbente e desorbente considerata come illimitata, senza alcun apparente decadimento di efficacia, non essendo sottoposto ad alcun processo meccanico.
Le camere di scambio sono sottoposte a vuoto e al loro interno contengono, come refrigerante, unicamente acqua pura.

La Figura 8 mostra un'immagine della pompa di calore termica della ditta Sorption Technologies SRL.
La Figura 9 mostra l'immagine della parte posteriore del rack della pompa di calore con le uscite a diverse temperature (alta, media e bassa) per i collegamenti i circuiti idraulici descritti nella sezione precedente.

Figura 8 – Pompa di calore ad adsorbimento della Sorption Technologies

Figura 9 – Pompa di calore ad adsorbimento della Sorption Technologies

7.5 Impianto sperimentale per prove di raffreddamento bifase su IGBT

L' impianto sperimentale di laboratorio per provare il sistema di raffreddamento bifase sugli IGBT nasce dall'esigenza di verificare se l'evaporatore disegnato per un IGBT è idoneo a raffreddare tale componente in modo efficace. In aggiunta si possono ottimizzare i parametri di funzionamento per il sistema di raffreddamento bifase su un modello di IGBT in termini di portata di fluido, pressione di lavoro, temperatura di ingresso nell'evaporatore. Con questi risultati sarà possibile progettare in modo efficace l'evaporatore per un IGBT prima del montaggio definitivo nell'inverter della stazione di ricarica evitando possibili malfunzionamenti.

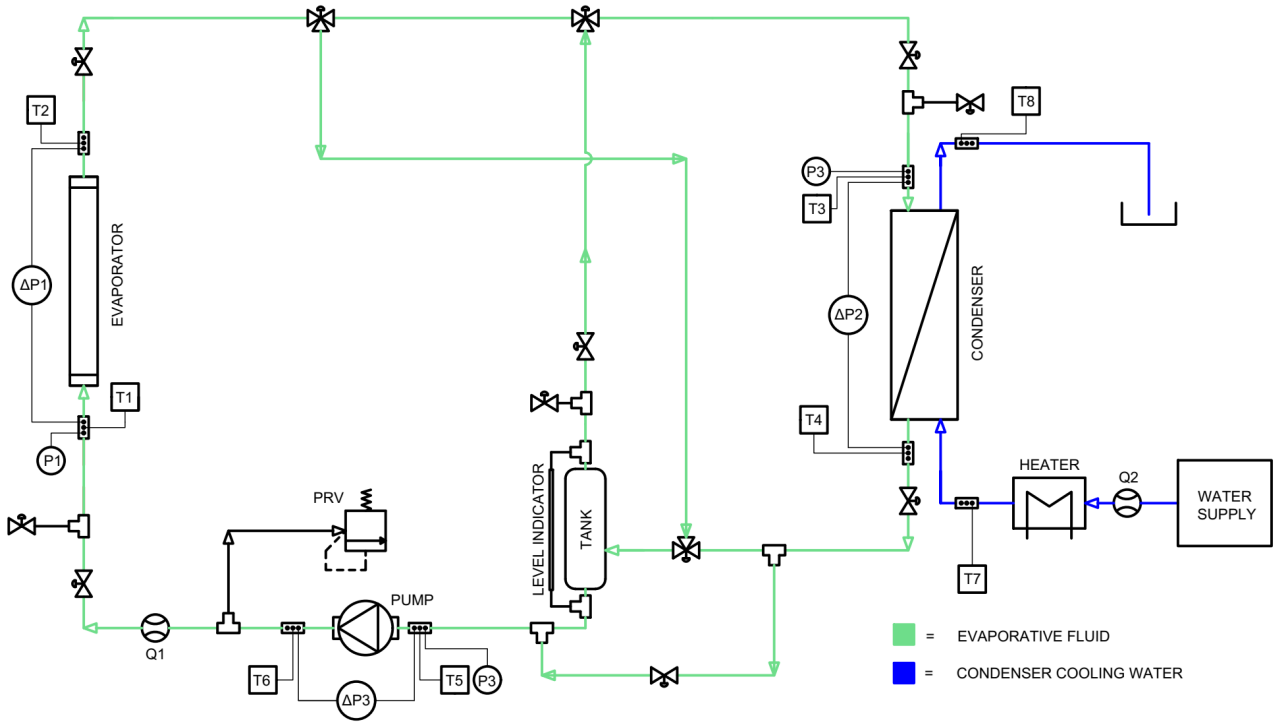

Figura 6 –Schema del circuito sperimentale per provare il two-phase cooling sugli IGBT

La Figura 6 mostra lo schema del circuito idraulico dell'impianto sperimentale. Sono presenti due circuiti: uno è il circuito bifase (in verde) e l'altro il circuito dell'acqua (in blu).
Il circuito bifase è il circuito in cui scorre il refrigerante per le prove di scambio termico in evaporazione per il raffreddamento dell'IGBT. Il circuito dell'acqua ha la funzione di raffreddare il condensatore. In questo circuito è presente anche un preriscaldatore (heater) che consente di variare la temperatura dell'acqua fino a 45°C per simulare il comportamento estivo del condensatore. Infatti, nelle condizioni estive, si stima che le temperature di riferimento per gli scambiatori raffreddati ad aria possano raggiungere 45°C nelle giornate più calde.
La Figura 7 mostra l'immagine del circuito di prova installato presso il laboratorio dell'Unità IPSE (Laboratorio Ingegneria dei Processi e dei Sistemi per la Decarbonizzazione Energetica, TERIN-PSU-IPSE) nel C.R. Casaccia dell'ENEA. Nell'immagine è evidenziata la posizione di un IGBT della Semikron raffreddato con il sistema bifase.

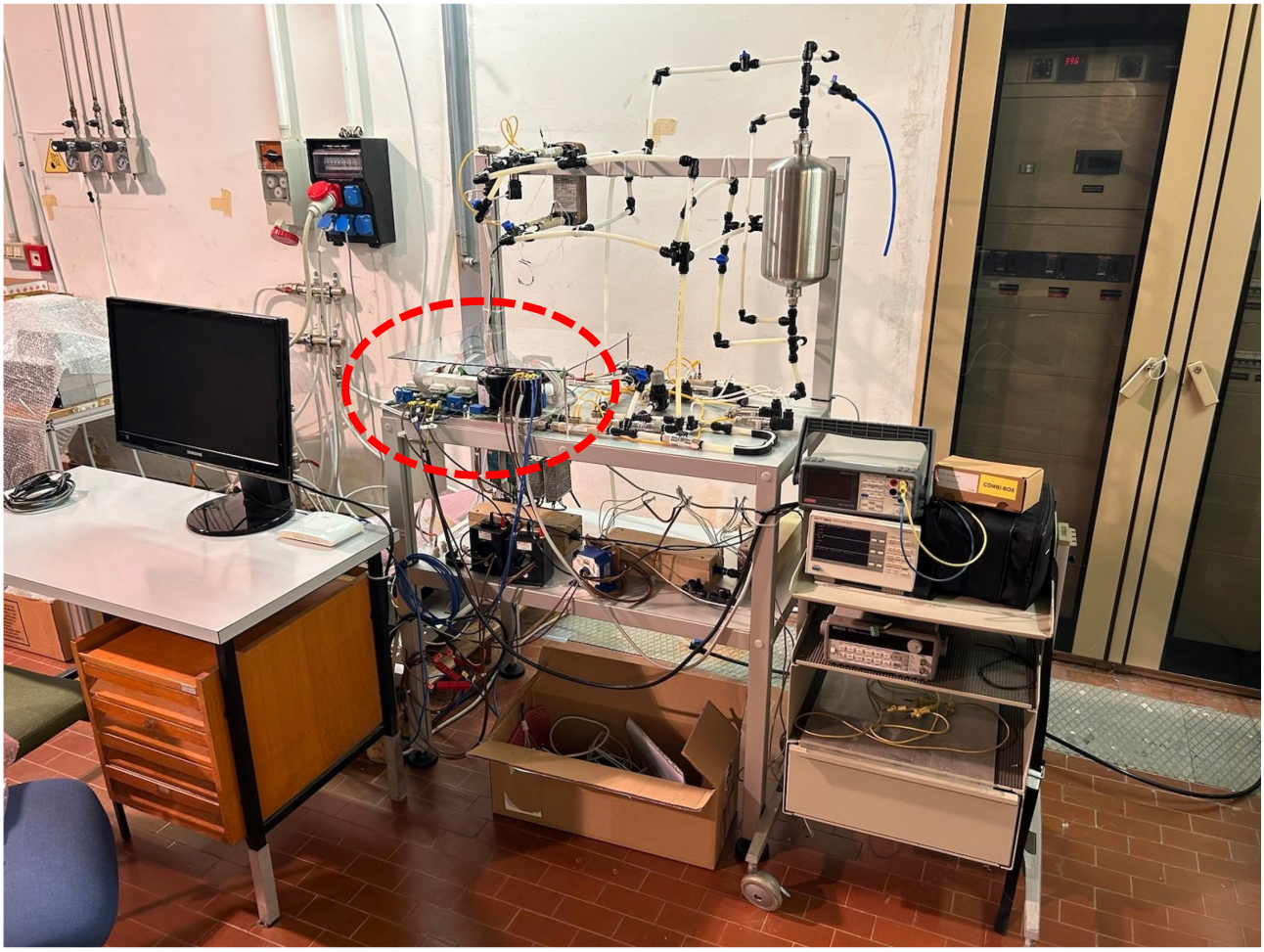

Figura 7 –Circuito per i test di scambio termico bifase sugli IGBT

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state attivate consulenze esterne.

8.1

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta

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