

Ricerca di Sistema elettrico



LA3.13 – Scambio Termico: Realizzazione e sperimentazione di un sistema di ricarica rapida con raffreddamento bifase nell'uso reale

L. Saraceno, G. Zummo, A.Scotini, Y. De Pra

LA3.13 – SCAMBIO TERMICO: REALIZZAZIONE E SPERIMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI RICARICA RAPIDA CON RAFFREDDAMENTO BIFASE NELL'USO REALE

L. Saraceno, G. Zummo, A.Scotini, Y. De Pra (ENEA)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.7 – Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 3.13

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Fernando, Ortenzi, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Giuseppe, Zummo, ENEA

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Indice

1	Risultati attesi	4
1.1	Realizzazione prototipo	4
1.2	Sperimentazione sul prototipo.....	4
1.3	Analisi della soluzione tecnica	4
2	Risultati ottenuti.....	5
2.1	Realizzazione di un prototipo	5
2.2	Sperimentazione sul prototipo.....	5
2.3	Analisi della soluzione tecnica	5
3	Prodotti attesi	6
3.1	Impianto prototipale	6
3.2	Testing e sviluppo.....	6
4	Prodotti sviluppati	7
4.1	Impianto prototipale	7
4.2	Database sperimentale	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Prototipo del sistema integrato per la gestione termica di una stazione di ricarica rapida 11	
7.1.1	Banco di test per sistemi di raffreddamento bifase.....	13
7.1.2	Pompa di calore termica	14
7.1.3	Sistemi ausiliari	17
7.1.4	Circuito a bassa temperatura e pacco batterie	21
7.2	Sperimentazione e analisi preliminare dei dati acquisiti	26
7.3	Conclusioni	30
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	31
9	Pubblicazioni scientifiche.....	32
10	Eventi di disseminazione	33

Indice delle figure

Figura 1 - Layout del sistema integrato di controllo termico e recupero del calore	11
Figura 2 - Visione d'insieme del prototipo di sistema integrato.....	12
Figura 3 - Vista complessiva del banco prova per raffreddamento bifase	13
Figura 4 - Pompa di calore ad adsorbimento	15
Figura 5 - Pompa di calore ad adsorbimento	16
Figura 6 - P&I della pompa di calore termica utilizzata	18
Figura 7 - Circuito ausiliario a media temperatura MT	20
Figura 8 - Circuito ausiliario a media temperatura MT HEX.....	21
Figura 9 - Circuito ausiliario a bassa temperatura LT.....	22
Figura 10 - Minibus elettrico presso ENEA	23
Figura 11 - Pacco batterie minibus elettrico	23
Figura 12 - Schema circuito di raffreddamento di serie del pacco batterie del minibus elettrico	24
Figura 13 - Pacco Batterie	25
Figura 14 - Schermata del software di controllo della pompa di calore ad adsorbimento	26
Figura 15 - Schermate programma di controllo dei circuiti ausiliari	27
Figura 16 - Andamento delle temperature di processo della pompa di calore termica	28
Figura 17 - Andamento delle portate di processo dei circuiti della pompa di calore termica ..	29
Figura 18 - Andamento delle potenze termiche scambiate tra i vari sottosistemi del prototipo integrato	29

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Caratteristiche tecniche pompa di calore ad adsorbimento	19
Tabella 2 - Specifiche nominali pacco batterie	25
Tabella 3 - Valori potenze termiche elaborate dalla pompa di calore termica	30

1 Risultati attesi

1.1 Realizzazione prototipo

Realizzazione di un impianto prototipale per il controllo termico di una stazione di ricarica con integrazione di un sistema di recupero del calore tramite pompa di calore termica.

1.2 Sperimentazione sul prototipo

Sperimentazione sul prototipo in condizioni operative variabili e analisi dei dati sperimentali raccolti durante la campagna di prove.

1.3 Analisi della soluzione tecnica

Analisi della soluzione tecnica adottata al fine di verificare in maniera preliminare affidabilità, performance e punti critici del sistema.

2 Risultati ottenuti

In riferimento alla sezione precedente dei Risultati attesi, segue una lista dei risultati ottenuti.

2.1 Realizzazione di un prototipo

Completata la progettazione e l'assemblaggio del prototipo con integrazione della pompa di calore.

Verificato il corretto funzionamento del sistema di controllo termico e del recupero di calore.

Effettuati test preliminari per validare la capacità di gestione della temperatura e l'efficienza energetica.

2.2 Sperimentazione sul prototipo

Condotta una campagna sperimentale con prove in diverse condizioni operative (carico variabile, temperature ambientali differenti, cicli di ricarica intensivi).

Raccolti e analizzati dati relativi a temperatura, consumi energetici, efficienza della pompa di calore e impatto sulle prestazioni della stazione di ricarica.

2.3 Analisi della soluzione tecnica

Analisi introduttiva della soluzione tecnica adottata al fine di verificarne affidabilità, performance e punti critici del sistema.

Verificata l'affidabilità del sistema in condizioni operative reali.

Identificati in via preliminare i benefici energetici del recupero di calore rispetto a una stazione di ricarica priva di questo sistema.

Evidenziati possibili margini di miglioramento, tra cui ottimizzazione della gestione del calore e riduzione delle perdite termiche.

3 Prodotti attesi

3.1 Impianto prototipale

Realizzazione di una facility prototipale in scala reale per il controllo termico completo di una stazione di ricarica di veicoli elettrici e contemporaneo recupero del calore di scarto tramite una pompa di calore termica.

3.2 Testing e sviluppo

Esecuzione di una campagna sperimentale preliminare per la verifica del corretto funzionamento in condizioni reali del sistema di controllo termico integrato e la valutazione delle prestazioni nell'ottica di garantire la ricarica veloce delle batterie dei veicoli elettrici.

4 Prodotti sviluppati

4.1 Impianto prototipale

Prototipo in scala reale di un sistema di scambio termico bifase per una stazione di ricarica rapida con raffreddamento anche della batteria di bordo di un minibus elettrico. Realizzazione e Testing del prototipo in ambiente reale.

4.2 Database sperimentale

Database preliminare dei dati sperimentali raccolti durante le fasi di testing iniziale dei vari sottosistemi nonché del sistema integrato durante le prove di ricarica di un pacco batterie di un minibus elettrico.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Il principale scostamento rispetto alle attività programmate riguarda l'utilizzo di un banco prova sperimentale (cfr. Report RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA3.14_020) al posto della stazione di ricarica ubicata in Area Capanna del C.R. Casaccia dell'ENEA, per testare il sistema di raffreddamento bifase dell'elettronica di potenza del sistema di ricarica rapida (IGBT dell'inverter) e al contempo generare il calore di scarto da immettere nella pompa di calore termica. Quanto sopra si è reso necessario per questioni puramente logistiche di mutuo posizionamento dei vari sottostemi costituenti il sistema integrato di controllo termico della stazione di ricarica delle batterie del veicolo elettrico. Da un punto di vista tecnico, rimane inalterata la validità dei test effettuati in quanto per il banco di prova è stata utilizzata la medesima elettronica presente nella stazione di ricarica all'interno del container situato Area Capanna (cfr. Report RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA3.14_019).

Un secondo scostamento rispetto al piano iniziale concerne la numerosità dei test sperimentali effettuati sul sistema integrato finale e sono ascrivibili ad un ritardo nell'inizio della campagna sperimentale. Tale ritardo è stato causato a sua volta dalla necessità in itinere di reinviare la pompa di calore ad adsorbimento al fornitore per alcune modifiche strutturali (a costo nullo per il committente) al fine di una più corretta integrazione termica con il banco sperimentale utilizzato per effettuare la ricarica rapida dei sistemi di accumulo elettrochimico a disposizione.

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività svolte nell'ambito della LA 3.13 hanno condotto alla realizzazione di un impianto prototipale per il controllo termico di una stazione di ricarica rapida per veicoli elettrici con integrazione di un sistema di recupero del calore a mezzo di una pompa di calore termica per la produzione di potenza frigorifera. La realizzazione dell'impianto prototipale è stata realizzata presso i laboratori del C.R. Casaccia dell'ENEA. Nel seguito della trattazione saranno presentati i diversi sottosistemi che compongono l'impianto prototipale e le modalità di integrazione tra gli stessi.

Vengono presentate inoltre le prime risultanze sperimentali derivanti dall'esecuzione di alcuni test effettuati in condizioni operative reali del sistema integrato di cui sopra.

In conclusione, è stata effettuata una breve analisi della soluzione tecnica adottata al fine di verificare affidabilità, performance e punti critici del sistema.

7 Dettaglio delle attività svolte

Come già introdotto nel report RdS_PTR 22-24_PR1.7_LA3.12_019, relativo alla corrispondente LA del SAL1 del PTR 22-24, l'obiettivo generale delle attività di ricerca svolte in questo triennio è stato individuato nello sviluppo di un sistema avanzato di gestione termica per una stazione di ricarica rapida destinata ai veicoli elettrici. Tale modalità di ricarica sollecita le batterie dei suddetti veicoli con correnti elevate e quindi con generazione di calore che deve essere smaltito efficacemente per evitare surriscaldamenti dannosi e potenzialmente pericolosi. L'approccio proposto ha quindi previsto l'integrazione di un sistema di raffreddamento bifase con un sistema a pompa di calore termica per il recupero del calore di scarto, garantendo così un'elevata efficienza operativa e un controllo ottimale della temperatura del sistema nel suo complesso durante le diverse fasi operative che caratterizzano la ricarica rapida di un mezzo elettrico.

In particolare, la tecnologia del raffreddamento bifase è stata implementata per gestire la temperatura dell'elettronica di potenza dell'inverter della stazione di ricarica, assicurando così che i componenti elettronici operino entro intervalli termici sicuri. Questa tecnologia consente di mantenere le superfici da raffreddare isoterme, garantendo elevati coefficienti di scambio termico e un ridotto consumo energetico. Inoltre, operando con basse portate, si ottiene una significativa riduzione della potenza di pompaggio e dell'ingombro del sistema. In definitiva vengono ottimizzate sia le prestazioni che la durata dei dispositivi elettronici, migliorando l'affidabilità complessiva del sistema.

Per quanto riguarda il recupero energetico, il calore generato dagli IGBT dell'inverter e dagli altri sistemi elettrici durante la fase di ricarica - calore solitamente a "bassa" temperatura - è stato intercettato e valorizzato attraverso una speciale pompa di calore termica. Quest'ultima, basata su un sistema ad adsorbimento con acqua e gel di silice, consente di convertire tale calore di scarto in potenza frigorifera, impiegata poi per il raffreddamento delle batterie dei veicoli durante la loro ricarica rapida. Questo processo contribuisce a mantenere le batterie in condizioni operative ottimali durante la ricarica, prolungandone la vita utile e minimizzandone al contempo i tempi di ricarica.

Da un punto di vista prettamente tecnico, per la corretta e funzionale integrazione dei due sistemi di cui sopra in un unico impianto prototipale, sono stati progettati e realizzati una serie di sottosistemi o sistemi ausiliari, sviluppando per essi anche opportuni programmi di controllo.

L'attività di sperimentazione svolta ha previsto l'acquisizione e l'analisi dei dati preliminari raccolti dal prototipo, con l'obiettivo di descrivere il funzionamento in toto del sistema di controllo termico integrato e identificare eventuali criticità nell'interazione tra il raffreddamento bifase, la pompa di calore termica e le esigenze di gestione termica delle batterie. Questa fase è di fondamentale importanza per lo sviluppo futuro di un sistema di controllo dedicato, capace di ottimizzare le prestazioni della stazione di ricarica in condizioni operative estreme.

In conclusione, l'adozione e l'integrazione di tecnologie innovative come quelle ivi proposte può segnare un passo importante verso la realizzazione di stazioni di ricarica più efficienti,

sostenibili e performanti, massimizzando l'utilizzo delle risorse energetiche disponibili e riducendo l'impatto ambientale del sistema. L'adozione combinata di strategie avanzate di raffreddamento e recupero energetico rappresenta un'evoluzione significativa nel settore della mobilità elettrica, definendo al contempo nuovi standard di sostenibilità.

7.1 Prototipo del sistema integrato per la gestione termica di una stazione di ricarica rapida

La Figura 1 illustra la configurazione del prototipo di sistema integrato di gestione termica e recupero energetico per una stazione di ricarica rapida, la cui progettazione è stata descritta nel report RdS_PTR 22-24_PR1.7_LA3.12_019.

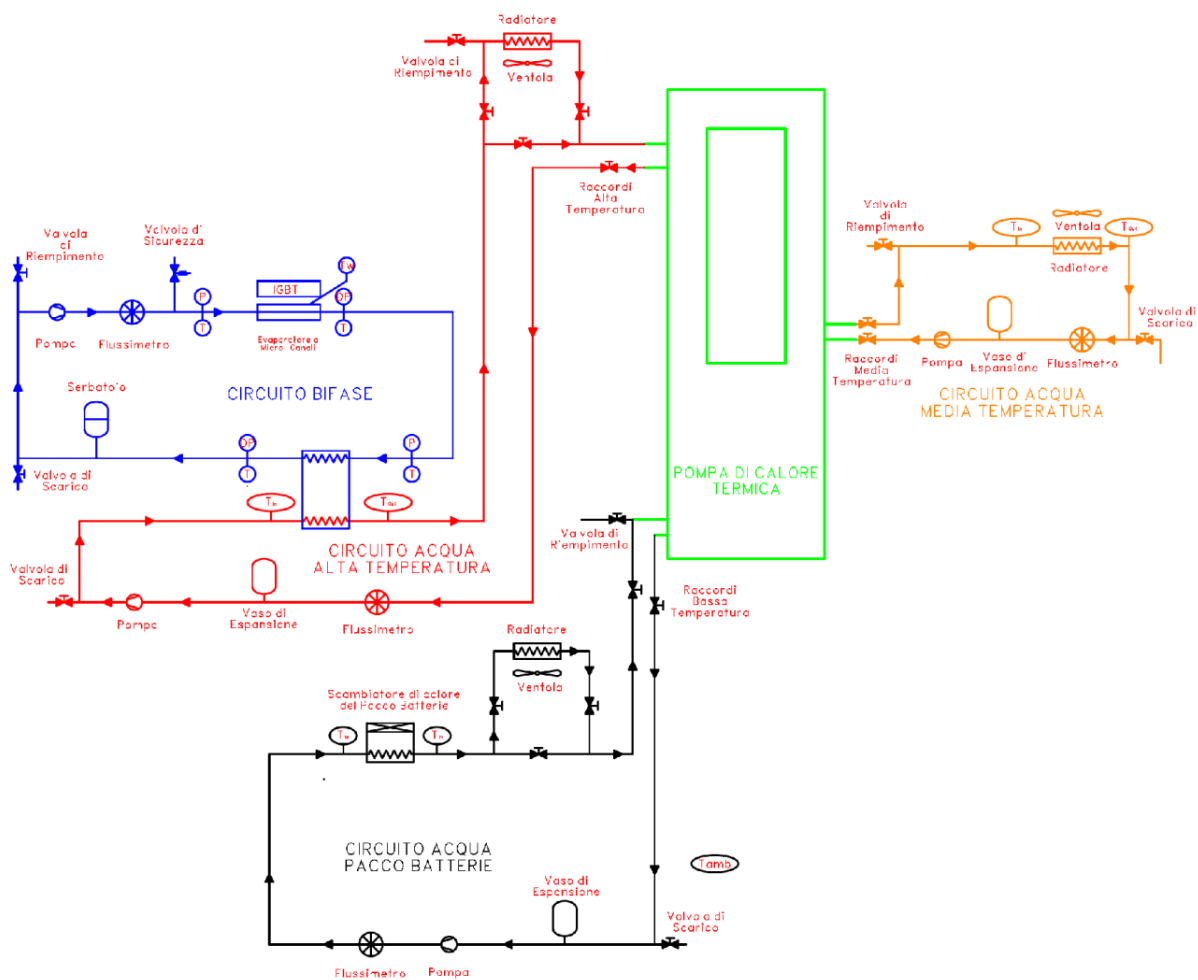


Figura 1 - Layout del sistema integrato di controllo termico e recupero del calore

L'impianto è composto schematicamente da quattro circuiti idraulici indipendenti e un'unità di refrigerazione ad adsorbimento.

Il prototipo prevede un primo circuito per il raffreddamento bifase dell'inverter e il trasferimento del calore generato dall'elettronica di potenza del sistema che gestisce la ricarica elettrica delle batterie di un veicolo elettrico. In particolare, il circuito bifase si occupa di dissipare il calore prodotto dall'inverter tramite il cambiamento di fase di un fluido refrigerante dielettrico, trasferendo quindi tale calore dall'evaporatore a micro-canali posto a contatto con gli IGBT fino al condensatore a piastre. Successivamente, un circuito ad acqua (o miscela acqua e glicole) convoglia il calore dal secondario del condensatore a piastre alla

sezione ad alta temperatura della pompa di calore termica, con una temperatura di ingresso dell'acqua compresa tra 55°C e 70°C ("circuito acqua alta temperatura" in fig.1).

Un secondo circuito, operante a più bassa temperatura (25-35 °C), ha il compito di smaltire nell'ambiente l'energia termica non sfruttata dalla pompa di calore termica ("circuito acqua media temperatura" in fig.1). La pompa di calore termica, nelle condizioni ottimali, presenta infatti un coefficiente di prestazione (COP) di circa 0,5, il che implica che circa il 50% dell'energia termica recuperata viene poi trasformata in capacità frigorifera.

Infine, il circuito a bassa temperatura ("circuito acqua pacco batterie" in fig.1) è dedicato al raffreddamento delle batterie del veicolo elettrico durante la ricarica rapida. In questo caso, l'intervallo termico stimato varia tra 18°C e 28°C, garantendo condizioni ottimali per il pacco batteria e preservandone l'efficienza e la durata nel tempo.



Figura 2 - Visione d'insieme del prototipo di sistema integrato

Come si può notare in Figura 2, il cosiddetto circuito a media temperatura in realtà è costituito da due distinti circuiti idraulici, denominati rispettivamente circuito MT e circuito MT_Ex, che si interfacciano con due scambiatori posti all'interno della pompa di calore ad adsorbimento. Le funzionalità di tali circuiti intermedi saranno meglio esplicitate nel prosieguo della trattazione.

7.1.1 Banco di test per sistemi di raffreddamento bifase

Come già esplicitato nella Sezione 5 del presente Report, è stato impiegato un banco di prova sperimentale al posto della stazione di ricarica inizialmente prevista, per testare il sistema di raffreddamento bifase dell'elettronica di potenza del sistema di ricarica rapida (IGBT dell'inverter) e al contempo generare il calore di scarto da immettere nella pompa di calore termica. Da un punto di vista tecnico, rimane inalterata la validità dei test effettuati in quanto per il banco di prova è stata utilizzata la medesima elettronica presente nella stazione di ricarica di cui sopra. La Figura 3 mostra il banco prova utilizzato.

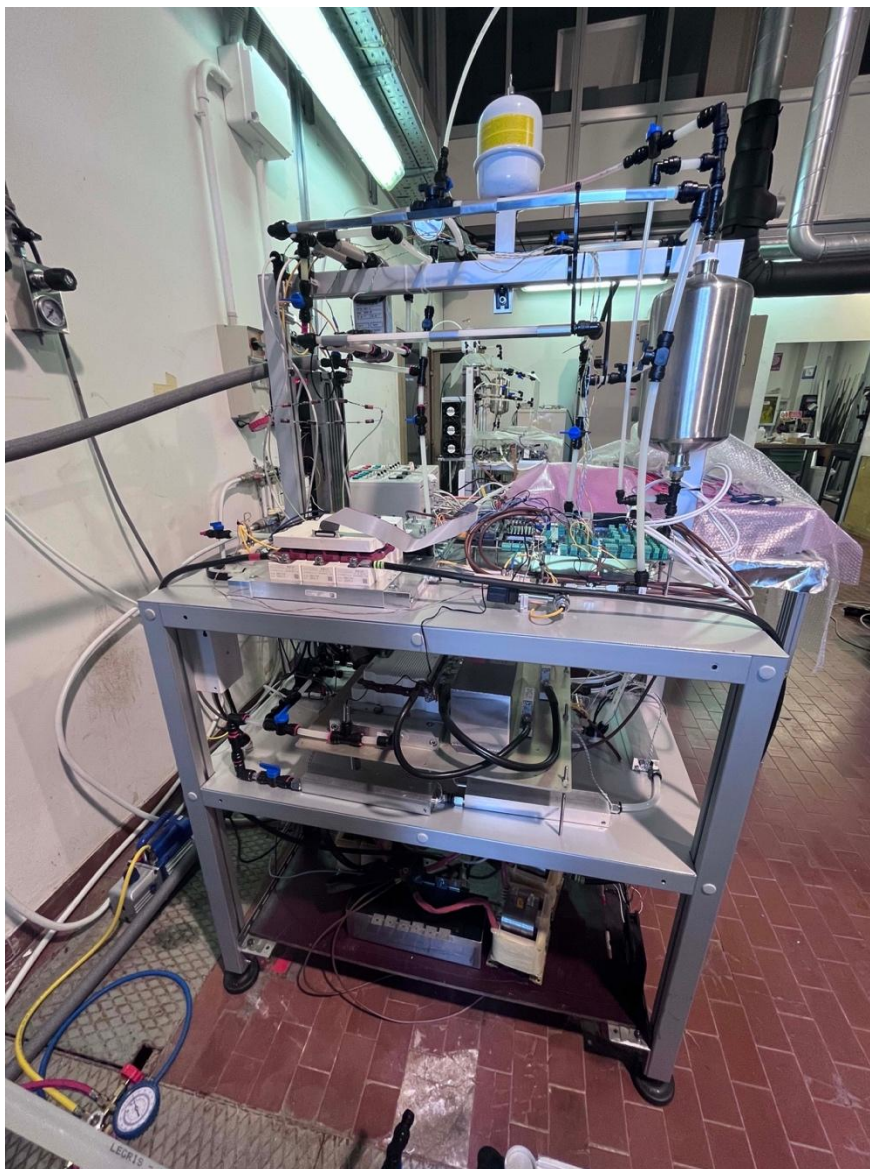


Figura 3 - Vista complessiva del banco prova per raffreddamento bifase

L'esigenza di sviluppare un banco sperimentale di laboratorio per testare l'efficacia del sistema di raffreddamento bifase sugli IGBT, nasce con l'obiettivo principale di verificare l'idoneità dei vari componenti del sistema, a partire dall'evaporatore, lo scambiatore a microcanali posto a contatto con l'elettronica da raffreddare, assicurando la dissipazione del calore avvenga in maniera efficiente e scevra da possibili criticità operative. Inoltre, la facility, grazie alla sua versatilità, consente di ottimizzare i parametri operativi del sistema di raffreddamento bifase, quali portata del fluido, pressione di esercizio e temperatura di ingresso nell'evaporatore, per migliorare le prestazioni complessive del sistema.

Facendo sempre riferimento allo schema riportato in Figura 1, il circuito bifase (in blu) è dedicato al passaggio del fluido refrigerante, che viene impiegato per investigare il comportamento dello scambio termico durante il processo di evaporazione, finalizzato al raffreddamento dell'IGBT. Il circuito dell'acqua, invece, ha il compito di raffreddare il condensatore e include in aggiunta un preriscaldatore che permette di variare la temperatura dell'acqua in ingresso al condensatore fino a 45°C. Questa funzione è utile per simulare le condizioni operative estive, in cui le temperature di riferimento per gli scambiatori raffreddati ad aria possono raggiungere tale valore nelle giornate più calde.

L'attività sperimentale è stata strutturata per garantire una valutazione accurata del comportamento del sistema di raffreddamento bifase in condizioni operative reali. Ciò ha permesso di raccogliere dati utili per determinare l'affidabilità e le prestazioni del sistema, nonché per definire le condizioni ottimali per l'integrazione del raffreddamento bifase nelle future applicazioni industriali. Il banco prova realizzato ha consentito quindi la caratterizzazione completa del sistema, permettendo di valutare l'efficienza termica, le condizioni di lavoro e le possibili configurazioni di scambiatori e fluidi refrigeranti.

Durante le sperimentazioni, sono stati analizzati diversi fluidi e architetture di scambio termico, con particolare attenzione al controllo preciso di parametri fondamentali come portata, pressione e temperatura. Uno dei principali risultati emersi dalle prove sperimentali è la capacità del sistema bifase di dissipare quantità di calore significativamente superiori rispetto ai sistemi di raffreddamento tradizionali basati su miscele acqua-glicole. Tuttavia, l'adozione di questa tecnologia presenta sfide tecniche legate alla gestione dell'evaporazione del fluido, che deve avvenire in modo controllato e localizzato nei pressi dell'IGBT.

Per ulteriori dettagli si faccia riferimento i report RdS_PTR 22-24_PR1.7_LA3.12_19 e RdS_PTR 22-24_PR1.7_LA3.14_020 e dove vengono descritti la progettazione la realizzazione e il testing del banco di prova descritto

7.1.2 Pompa di calore termica

Nelle Figure 4 e 5 viene mostrata la pompa di calore ad adsorbimento della Sorption Technologies, utilizzata per il recupero del calore dissipato dal sistema di raffreddamento bifase durante i test di ricarica delle batterie di un veicolo elettrico. Il modello impiegato è stato appositamente modificato per ottimizzare l'integrazione termica con il banco sperimentale descritto nella sezione precedente.

La pompa di calore ad adsorbimento sfrutta il principio della compressione termica, utilizzando il calore residuo anziché l'energia elettrica per generare acqua refrigerata o aria fredda. Il sistema utilizza acqua pura come refrigerante all'interno di un circuito chiuso, mantenuto sotto vuoto. Il ciclo di funzionamento si basa su due fasi principali:

- Adsorbimento: il refrigerante evapora nell'evaporatore, sottraendo calore all'ambiente da raffreddare. Il vapore acqueo viene quindi adsorbito da un materiale adsorbente, come il gel di silice. Questo processo rilascia calore, che deve essere dissipato.
- Deadsorbimento: una volta saturo, il materiale adsorbente viene rigenerato mediante l'applicazione di calore a bassa temperatura (tipicamente tra 55°C e 85°C), rilasciando il vapore precedentemente adsorbito. Il vapore condensa nel condensatore e ritorna allo stato liquido, completando il ciclo.



Figura 4 - Pompa di calore ad adsorbimento

Il sistema si distingue per la riduzione del consumo energetico, con un risparmio compreso tra il 60% e l'80% rispetto ai tradizionali sistemi di raffreddamento a compressione di vapore. L'elettricità è necessaria solo per il funzionamento di pompe e valvole, rendendo il sistema altamente efficiente. Inoltre, l'uso dell'acqua come unico refrigerante elimina l'impiego di gas dannosi per l'ambiente. L'implementazione di moduli operanti in parallelo consente un

raffreddamento continuo e stabile, con una gestione intelligente dei flussi termici per adattarsi ai carichi variabili. La struttura costruttiva semplificata e l'assenza di parti meccaniche in movimento garantiscono una lunga durata operativa senza degrado delle prestazioni del materiale adsorbente.

Infine, grazie alla natura modulare e alla possibilità di integrazione diretta con i sistemi esistenti, questa tecnologia rappresenta una soluzione sostenibile ed efficiente per il recupero e il riutilizzo del calore di scarto in molteplici applicazioni industriali e di raffreddamento di infrastrutture critiche.



Figura 5 - Pompa di calore ad adsorbimento

Nelle figure precedenti è possibile notare nei diversi lati del rack le uscite a diverse temperature (alta, media e bassa) per i collegamenti ai circuiti idraulici ad alta, media e bassa temperatura.

7.1.3 Sistemi ausiliari

La Figura 6 mostra il P&I della macchina fornita dalla Sorption Technologies mentre in Tabella 1 ne sono riportate le caratteristiche tecniche.

Chiller unit 3kW P22-0010 DYMAN-0

List of sensors:

- 1 Pressure sensor THYRACONT VCC200MA4
- 10 Temperature sensors PT1000

Important note:

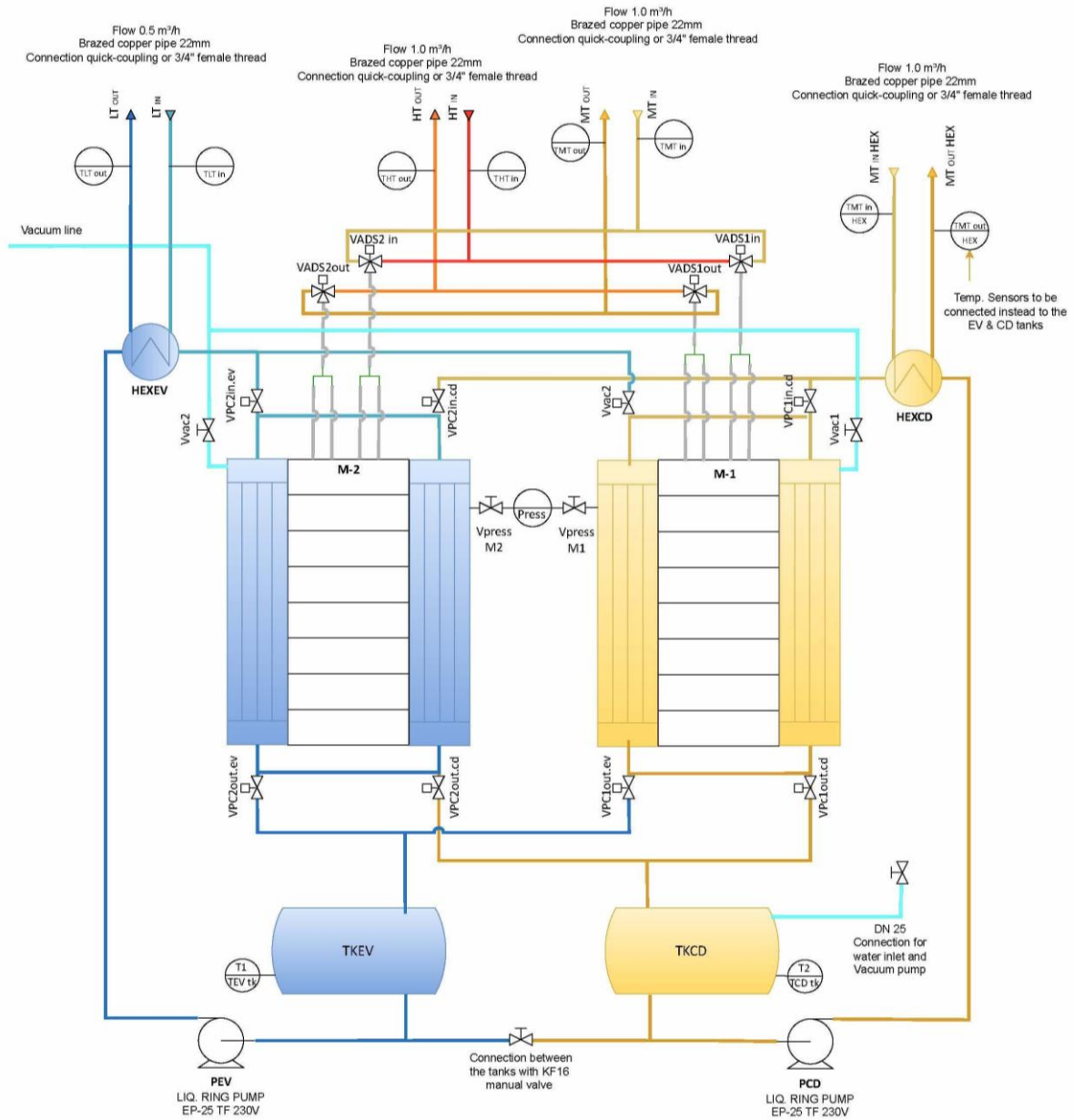


Figura 6 - P&I della pompa di calore termica utilizzata

Tabella 1 - Caratteristiche tecniche pompa di calore ad adsorbimento

REFRIGERATORE AD ADSORBIMENTO A GEL DI SILICE

Codice	Descrizione																		
ENEA-REQ-01	Alimentazione 230V AC / 50 Hz																		
ENEA-REQ-02	Condizioni operative indoor a temperature nell'intervallo: +5 to 50°C e umidità relativa fino all' 80%.																		
ENEA-REQ-03	I componenti dovranno essere disponibili sul mercato per i prossimi 5/10 anni.																		
ENEA-REQ-04	L'involucro dovrà essere lavabile e resistente ai comuni detergenti.																		
ENEA-REQ-05	Qualità dell'acqua di riempimento dei circuiti lato utente: <table border="1" style="margin: 10px auto; width: 80%; background-color: #e6f2ff;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #4a86e8; color: white;">Water quality</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PH-level at 20 °C</td> <td>7,5 - 9,0</td> </tr> <tr> <td>Electrical conductivity at 25 °C</td> <td>80 – 500 µS/cm</td> </tr> <tr> <td>Water hardness</td> <td>6 - 10° dH</td> </tr> <tr> <td>Hydrogen carbonate</td> <td>120 - 300 mg/l</td> </tr> <tr> <td>Sulphate</td> <td>< 70 mg/l</td> </tr> <tr> <td>Total count of bacteria at 22 °C</td> <td>< 1000 KBE s/ml</td> </tr> <tr> <td>Appearance</td> <td>clear, without sediments</td> </tr> <tr> <td>Colour</td> <td>colourless</td> </tr> </tbody> </table>	Water quality		PH-level at 20 °C	7,5 - 9,0	Electrical conductivity at 25 °C	80 – 500 µS/cm	Water hardness	6 - 10° dH	Hydrogen carbonate	120 - 300 mg/l	Sulphate	< 70 mg/l	Total count of bacteria at 22 °C	< 1000 KBE s/ml	Appearance	clear, without sediments	Colour	colourless
Water quality																			
PH-level at 20 °C	7,5 - 9,0																		
Electrical conductivity at 25 °C	80 – 500 µS/cm																		
Water hardness	6 - 10° dH																		
Hydrogen carbonate	120 - 300 mg/l																		
Sulphate	< 70 mg/l																		
Total count of bacteria at 22 °C	< 1000 KBE s/ml																		
Appearance	clear, without sediments																		
Colour	colourless																		
ENEA-REQ-06	Il refrigerante utilizzato deve essere R718, acqua																		
ENEA-REQ-07	Attacchi filettati maschi G3/8" oppure G1/2"																		
ENEA-REQ-08	<table border="1" style="width: 100%;"> <tbody> <tr> <td>HT inlet temperature</td> <td>55°C - 70°C</td> </tr> <tr> <td>MT inlet average temperature</td> <td>35°C</td> </tr> <tr> <td>MT inlet max temperature</td> <td>45°C – ambient condition in Rome</td> </tr> <tr> <td>LT output temperature</td> <td>20°C</td> </tr> <tr> <td>Available heating for HT loop</td> <td>5 kW</td> </tr> <tr> <td>COP</td> <td>Min 0.4 massimo 0.6</td> </tr> </tbody> </table>	HT inlet temperature	55°C - 70°C	MT inlet average temperature	35°C	MT inlet max temperature	45°C – ambient condition in Rome	LT output temperature	20°C	Available heating for HT loop	5 kW	COP	Min 0.4 massimo 0.6						
HT inlet temperature	55°C - 70°C																		
MT inlet average temperature	35°C																		
MT inlet max temperature	45°C – ambient condition in Rome																		
LT output temperature	20°C																		
Available heating for HT loop	5 kW																		
COP	Min 0.4 massimo 0.6																		
ENEA-REQ-09	La macchina sarà dotata di un sistema di controllo e di acquisizione dati interfacciabile via ethernet																		
ENEA-REQ-10	Tutti i parametri della macchina saranno accessibili via ethernet																		
ENEA-REQ-11	La macchina sarà spedita a ENEA, CR Casaccia, via Anguillarese 301, Roma																		
ENEA-REQ-12	La macchina sarà installata e collaudata presso il CR Casaccia, via Anguillarese 301, Roma																		

Il circuito identificato come HT nello schema di cui sopra è rappresentato dal circuito ad acqua e glicole (miscela al 20% in volume di glicole) proveniente dal condensatore del banco di prova bifase e fornisce alla macchina la sorgente termica ad "alta" temperatura. Il circuito a media temperatura, come anticipato in precedenza, in realtà è costituito da due distinti circuiti idraulici, denominati rispettivamente circuito MT e circuito MT_HEX, che si interfacciano con due scambiatori posti all'interno della pompa di calore ad adsorbimento (Figura 7 e Figura 8) e che devono operare, in condizioni nominali, a temperature comprese in un determinato range: essi hanno sostanzialmente la funzione di smaltire nell'ambiente l'energia termica non sfruttata dalla pompa di calore in termini di erogazione di potenza frigorifera. In condizioni ottimali, la pompa di calore termica raggiunge infatti un coefficiente di prestazione (COP) di circa 0,5, il che significa che metà dell'energia termica recuperata viene convertita in potenza frigorifera.



Figura 7 - Circuito ausiliario a media temperatura MT

Ciascuno dei due circuiti ausiliari a media temperatura è sostanzialmente costituito da due pompe centrifughe in serie (per incrementarne la prevalenza), un misuratore di portata ad effetto Hall e da un radiatore a microcanali munito di ventole assiali per la dissipazione del calore in aria. Il fluido di lavoro è per entrambi acqua pura, la cui portata viene regolata, insieme alla portata di aria delle ventole, tramite un software di controllo sviluppato in ambiente Arduino che consente di mantenere le temperature di ingresso alla pompa di calore in un range compreso tra 25 e 35 °C al variare delle condizioni ambientali in cui sono posti i radiatori.



Figura 8 - Circuito ausiliario a media temperatura MT HEX

7.1.4 Circuito a bassa temperatura e pacco batterie

L'ultimo circuito ausiliario connesso all'unità di refrigerazione ad adsorbimento è quello cosiddetto a bassa temperatura, denominato LT nello schema di Figura 6 e "circuito acqua pacco batterie" in Figura 1. È il circuito, mostrato parzialmente in Figura 9, in cui si ottiene l'effetto utile della pompa di calore ad adsorbimento in termini di potenza frigorifera disponibile e deputato al raffreddamento delle batterie del veicolo elettrico durante la sua ricarica rapida. Nel nostro caso il veicolo è un minibus elettrico in dotazione all'ENEA (Figura 10): il circuito LT è stato quindi collegato al sistema di raffreddamento a liquido di serie del pacco batterie del minibus, utilizzando due connessioni idrauliche da 1/2" e due valvole a tre vie opportunamente predisposte per bypassare il radiatore ad aria del suddetto sistema (Figura 11 e Figura 12).



Figura 9 - Circuito ausiliario a bassa temperatura LT

Come fluido termovettore è stato in questo caso utilizzato il medesimo fluido già presente nel circuito di raffreddamento a liquido del pacco batterie: un liquido pronto all'uso a base di glicole etilenico con aggiunta di un pacchetto inibitore organico e degradabile esente da nitriti, ammine, fosfati, silicati e borati, in grado di proteggere in modo molto efficace contro il gelo, il surriscaldamento e la corrosione, garantendo una fluida circolazione all'interno dell'impianto di raffreddamento. La tubazione di collegamento è stata opportunamente coibentata per minimizzare le perdite di calore verso l'ambiente e quindi avere un calcolo più affidabile dei bilanci termici nei vari scambiatori della pompa di calore.



Figura 10 - Minibus elettrico presso ENEA

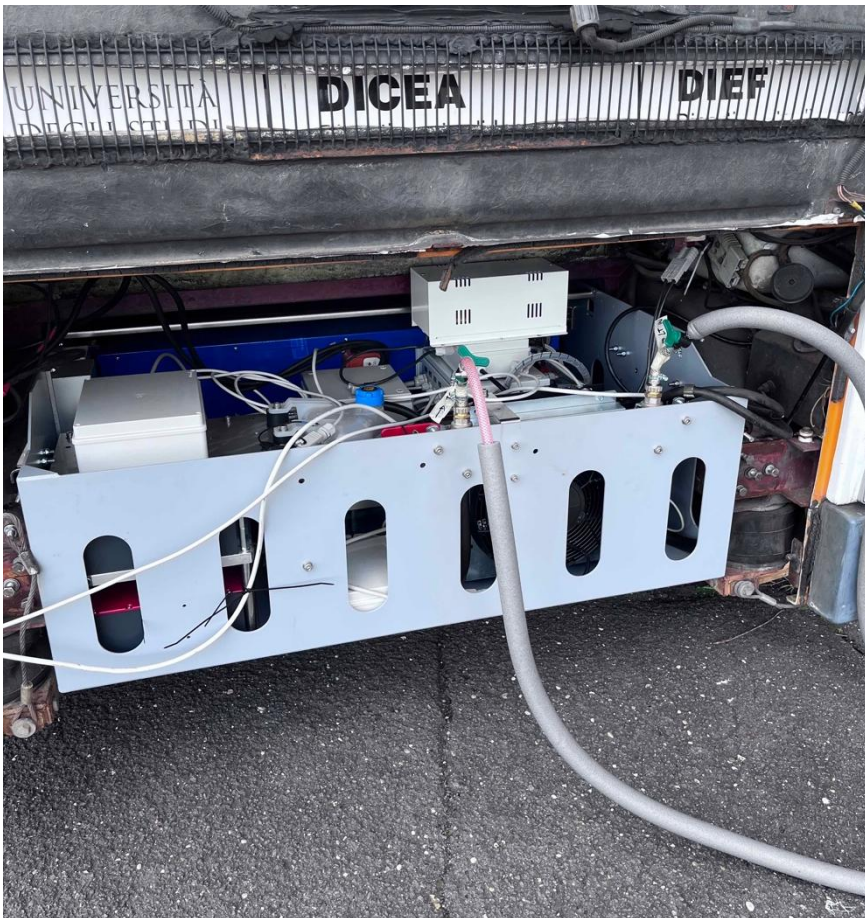


Figura 11 - Pacco batterie minibus elettrico

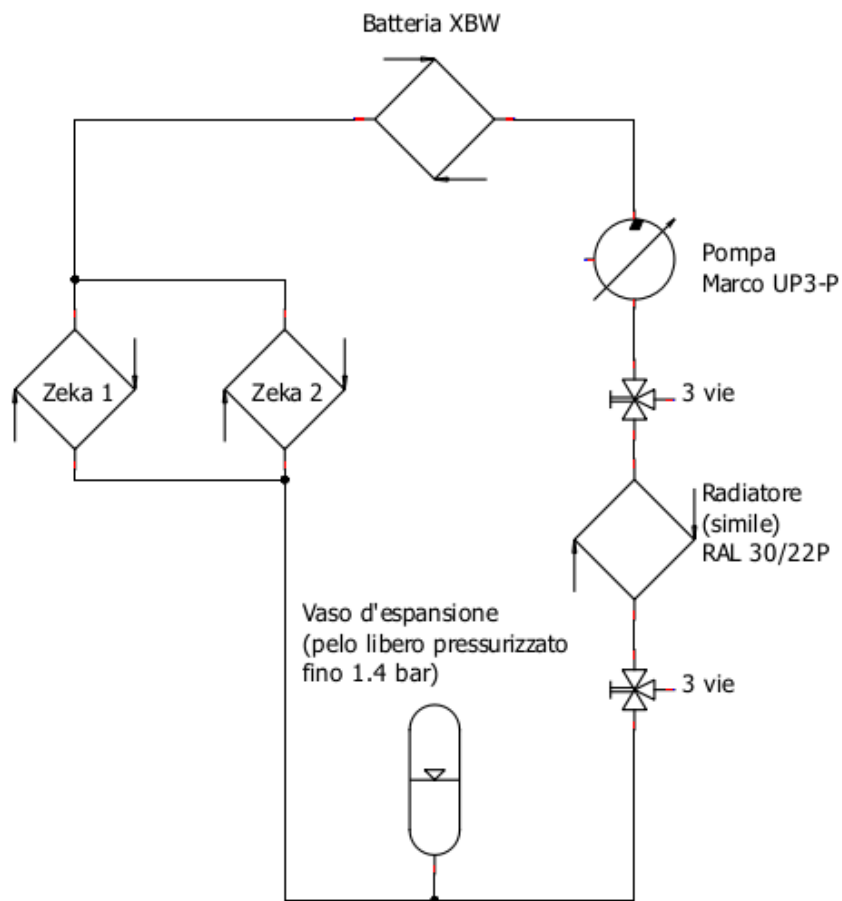


Figura 12 - Schema circuito di raffreddamento di serie del pacco batterie del minibus elettrico

Il Battery Pack (BP) utilizzato nella fase di sperimentazione è costituito da batterie ricaricabili litio-ione, Mod. X-Lipo019657ENE_D01 della ditta XBW-Lithium Battery REvolution e mostrato in Figura 13. Il BP è una batteria ricaricabile Litio-ione con integrata elettronica di controllo (Battery Management System, BMS). Il BMS supervisiona lo stato della tensione delle celle e della temperatura del BP.

Il BP dispone di un'unica uscita di potenza per la carica e la scarica ed è equipaggiato di teleruttori che ne garantiscono la sicurezza e ne preservano il consumo d'energia. Il BP comunica con i sistemi esterni tramite Bus CAN.

Come accennato in precedenza, la batteria è dotata di un sistema di alette in alluminio interposte fra le celle e fissate ad una serie di dissipatori a liquido sempre in alluminio.

Il calore dissipato dalle celle al litio per effetto joule viene trasportato dalle alette ai dissipatori sottostanti, realizzati con un labirinto di canali interni aventi lo scopo di cedere al liquido il calore raccolto dalle celle. I vari dissipatori sono collegati in serie fra loro tramite tubi idraulici.

In Tabella 2 sono riportate le specifiche nominali del pacco batterie.



Figura 13 - Pacco Batterie

Tabella 2 - Specifiche nominali pacco batterie

Grandezza	Valore
3-1 Capacità Nominale	57 Ah
3-2 Energia Nominale	20.246 Wh
3-3 Tecnologia del catodo	NMC
3-4 Tensione Massima ¹	405 V
3-5 Tensione Massima raccomandata ¹	399 V
3-6 Tensione Nominale	355 V
3-7 Tensione Minima raccomandata ¹	326 V
3-8 Tensione Minima ¹	308 V
3-8 Tensione Minima d'attivazione ¹	280 V
3-9 Corrente carica Massima	120 A
3-10 Fusibile	250 A (incorporato nel MSD)
3-11 Dimensioni esterne del BP (di ogni modulo)	Altezza: 357 mm
	Profondità: 486 mm
	Larghezza: 1146 mm
3-12 Ambiente operativo	Carica: 0 ÷ +45°C
	Scarica: -10 ² ÷ +50°C
	Umidità relativa: max85%, senza condensa
3-13 Stoccaggio	Temperatura: +0 ÷ +35°C
	Umidità relativa: max85%, senza condensa
3-14 Peso	250 kg
3-15 Max pressione circuito serie dissipatori a liquido	< 2 bar
3-16 Soglia allarme resistenza Isolamento	400 kΩ
3-17 Tensione di Attivazione EXT	12/24V

¹: Questo valore è valido nell'ipotesi che le celle siano uguali

²: batteria non coibentata: possibile formazione di condensa se utilizzata con trasferimenti rapidi da zone fredde a zone più umide.

7.2 Sperimentazione e analisi preliminare dei dati acquisiti

Le prove sperimentali sono state eseguite collegando elettricamente il pacco batterie all'inverter del banco prova per effettuarne la ricarica rapida; la pompa di calore ad adsorbimento, ricevendo tramite il circuito HT il calore generato nell'inverter e dissipato a mezzo del sistema di controllo termico bifase, genera una potenza frigorifera che, tramite il circuito LT, viene trasferita al circuito di raffreddamento interno del pacco batterie che si sta ricaricando. Allo stesso tempo, i due circuiti ausiliari MT e MT HEX vengono gestiti in maniera da massimizzare il rendimento della pompa di calore ad adsorbimento.

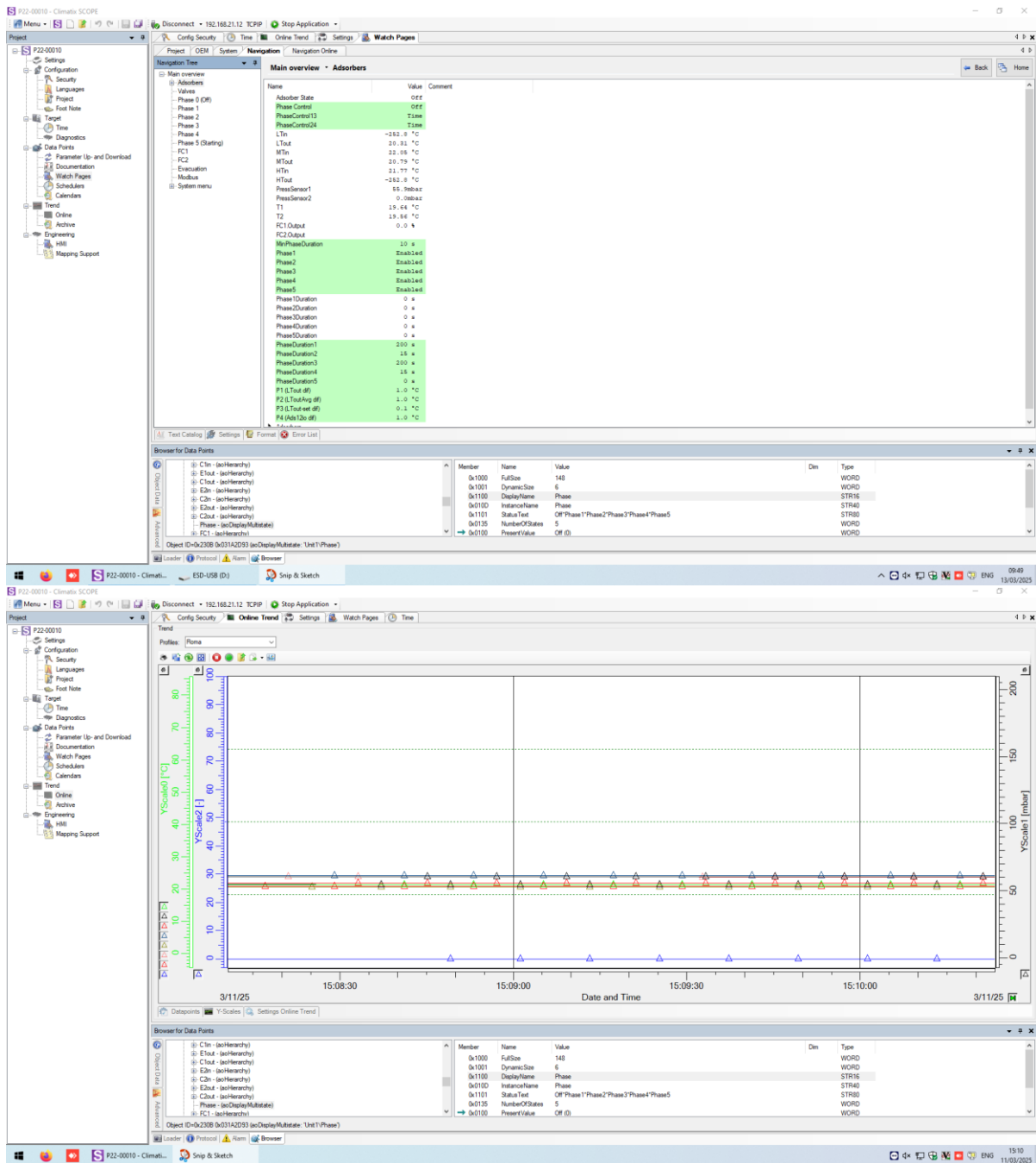


Figura 14 - Schermata del software di controllo della pompa di calore ad adsorbimento

La pompa di calore è dotata di un PLC (Programmable Logic Controller) Siemens, con software Climatix SCOPE (Figura 14) per la gestione remota e il monitoraggio in tempo reale, sia in modalità manuale che automatica, di tutte le fasi dei processi di adsorbimento e deadsorbimento operati dalla macchina. Tale software permette inoltre di scrivere il programma e caricarlo nel PLC, simulare il funzionamento prima della messa in opera, monitorare e diagnosticare errori nel sistema nonché aggiornare il firmware del PLC.

Per ciò che concerne il programma di monitoraggio e controllo del banco prova, si rimanda al Report RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA3.14_020.

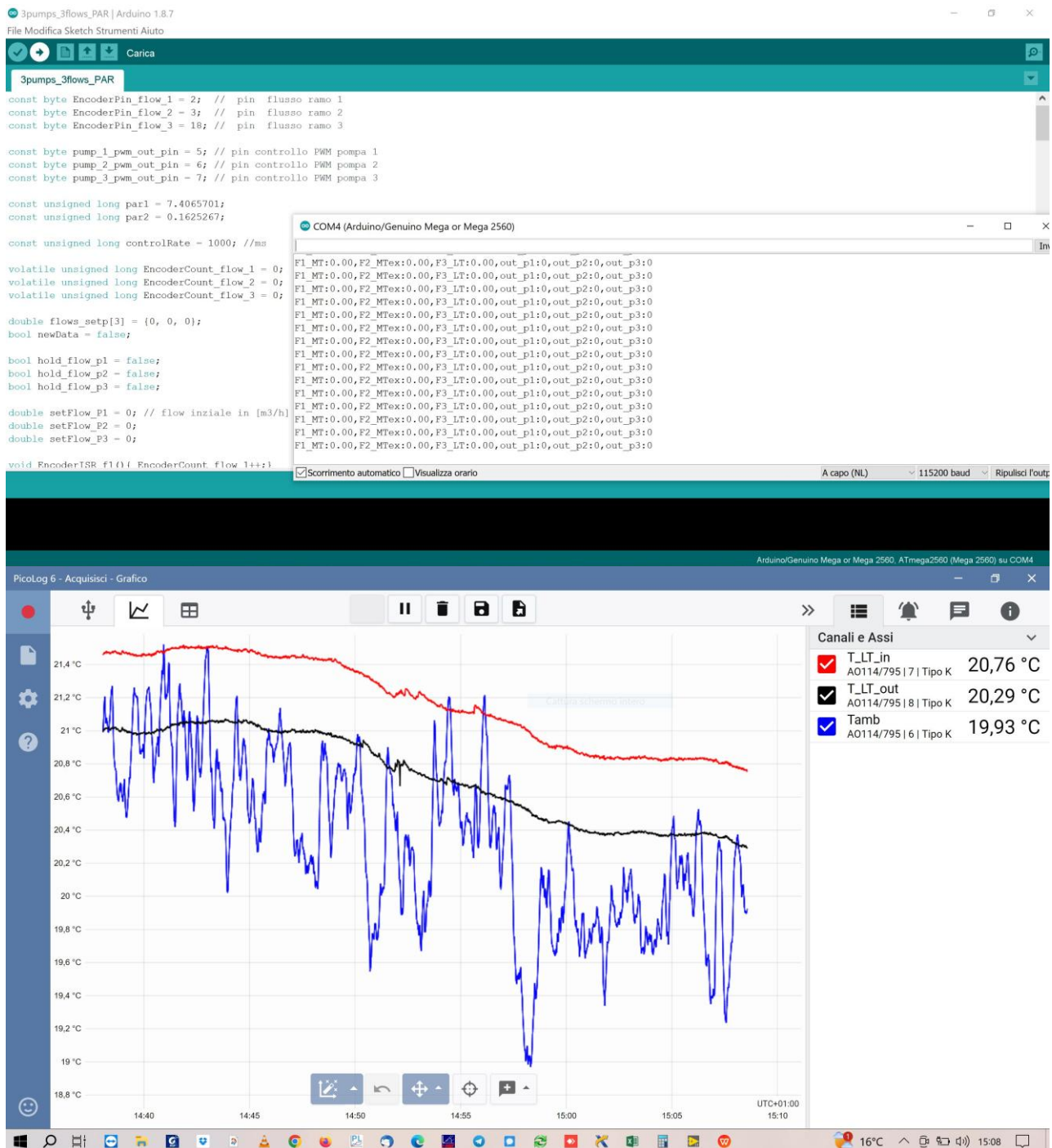


Figura 15 - Schermate programma di controllo dei circuiti ausiliari

Per i circuiti ausiliari MT e MT HEX, asserviti alla pompa di calore termica, è stato sviluppato ad hoc un programma di controllo sviluppato su piattaforma Arduino/PicoLog (Figura 15) che consente non solo di monitorare le grandezze termofluidodinamiche dei fluidi di lavoro ma anche di effettuare il controllo attivo delle loro portate variando il numero di giri delle pompe e di variare il numero di giri delle ventole dei radiatori al fine di mantenere le condizioni nominali di temperatura in corrispondenza dei rispettivi ingressi della pompa di calore.

Per il circuito LT connesso con il pacco batterie, la portata di refrigerante viene gestita direttamente tramite la pompa di circolazione del sistema di raffreddamento a liquido di serie nel pacco batterie (Figura 12).

Nel seguito vengono riportati alcuni risultati dei test sperimentali eseguiti. In particolare, la Figura 16 mostra l'andamento delle temperature ingresso/uscita dei vari circuiti della pompa di calore ad adsorbimento durante le varie fasi di processo operate dalla macchina: è immediato notare l'intermittenza delle fasi di produzione del freddo, dovuta all'utilizzo alternato dei due moduli di cui alla sezione 7.1.2. Le temperature HTin e HTout rappresentano, a meno delle perdite lungo i tratti di tubazione coibentata, le temperature della miscela acqua/glicole del secondario del banco prova. Le temperature LTin e LTout, parimenti, sono le temperature omologhe a quelle in ingresso ed uscita del sistema di raffreddamento del pacco batterie.

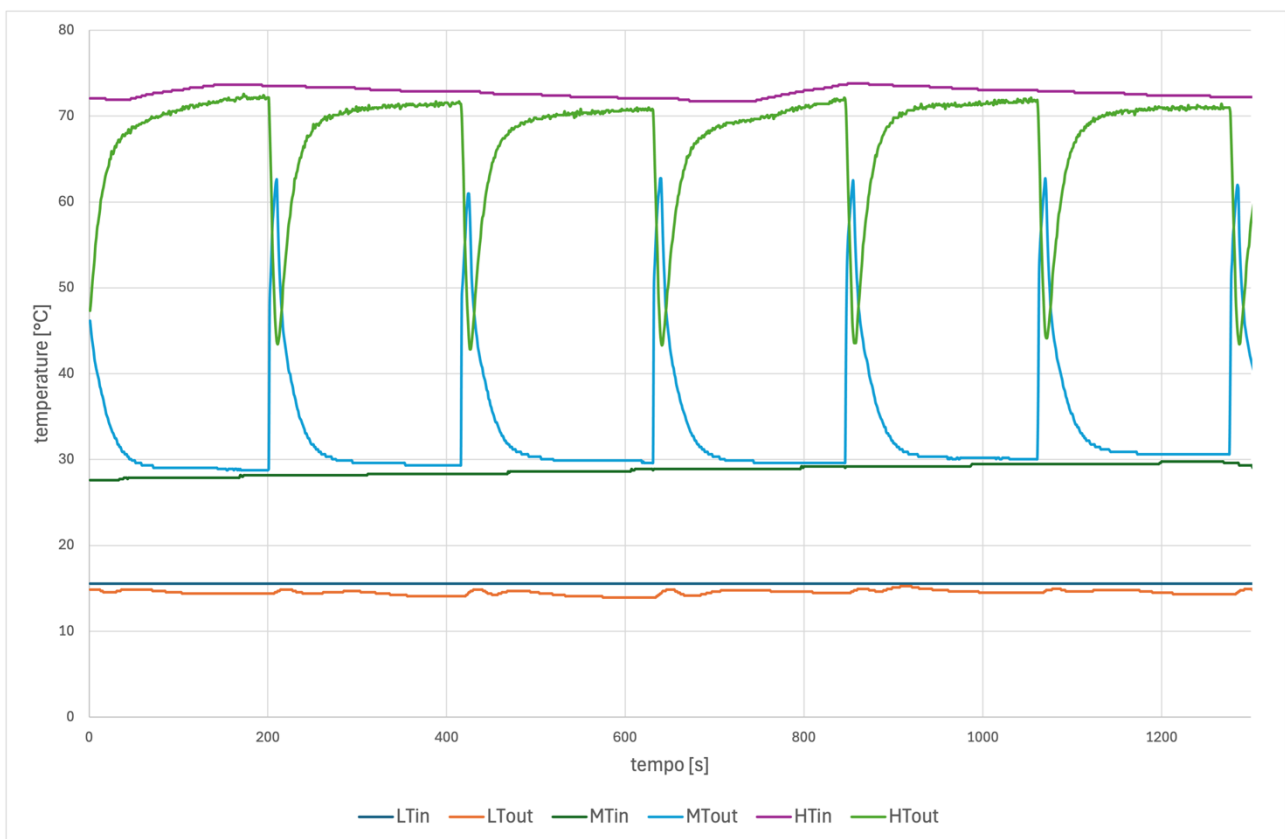


Figura 16 - Andamento delle temperature di processo della pompa di calore termica

Le Figure 17 e 18 mostrano rispettivamente gli andamenti delle portate dei fluidi di lavoro e delle potenze termiche elaborate nei tre circuiti HT, MT e LT della pompa di calore ad adsorbimento durante le varie fasi di funzionamento. Da notare nella figura 18 che i valori elevati di transitorio registrati per i circuiti HT e MT sono da ascrivere alle rapide variazioni di temperatura del fluido in uscita di tali circuiti, variazioni dovute alla ciclica inversione dei processi di adsorbimento e deadsorbimento che si hanno su i due moduli della macchina.

È invece importante notare come la potenza frigorifera, Q_{LT} , prodotta nel circuito a bassa temperatura rimanga praticamente costante durante tutti i cicli operati dalla pompa di calore.

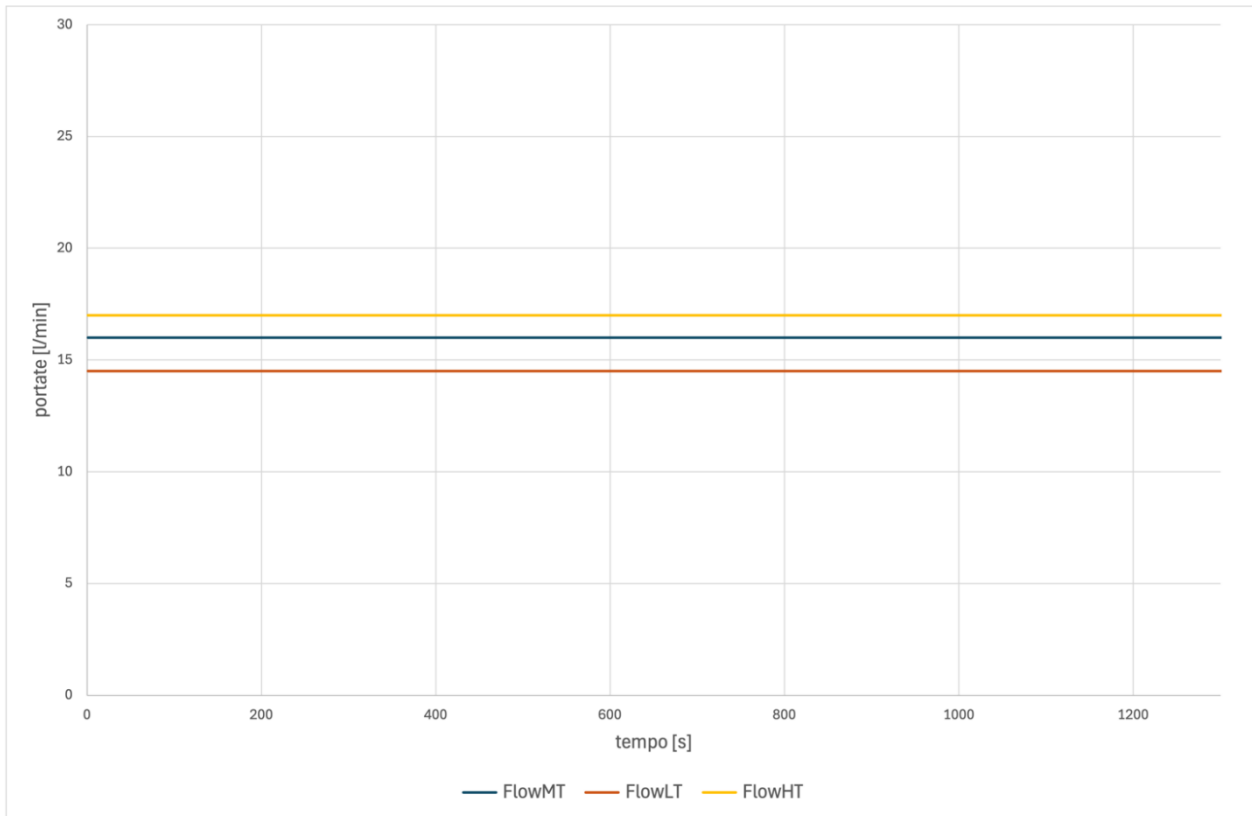


Figura 17 - Andamento delle portate di processo dei circuiti della pompa di calore termica

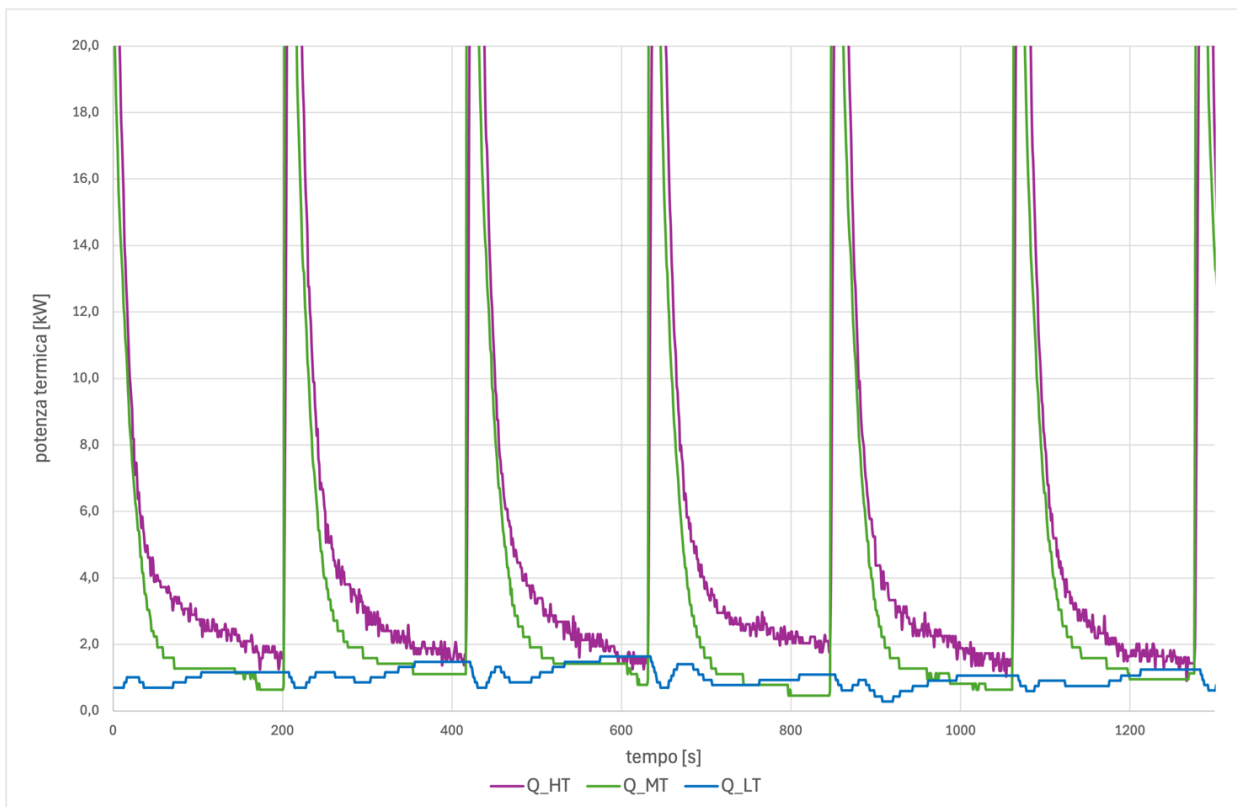


Figura 18 - Andamento delle potenze termiche scambiate tra i vari sottosistemi del prototipo integrato

Tabella 3 - Valori potenze termiche elaborate dalla pompa di calore termica

CONSTANT OVERALL CYCLE OPERATION		
PHASE 1		
M1	M1&2	M2
Q_HT [kW]	Q_MT [kW]	Q_LT [kW]
2,3	1,3	1,3
PHASE 3		
M2	M1&2	M1
Q_HT [kW]	Q_MT [kW]	Q_LT [kW]
2,3	1,1	1,1

In Tabella 3 sono riportati i valori medi delle potenze termiche “scambiate” tra i vari sottosistemi del prototipo di controllo termico proposto durante un intervallo del ciclo termodinamico in cui la macchina funziona con parametri costanti, senza variazioni significative nelle condizioni operative. Si può notare che l’effetto utile “potenza frigorifera” Q_{LT} rappresenti proprio il 50% ca. della potenza termica “di scarto” recuperata dal sistema di controllo termico bifase dell’impianto di ricarica rapida del pacco batterie del minibus elettrico. Infine, le durante la suddetta fase di ricarica, le temperature del pacco batterie si sono mantenute ampiamente entro i range di sicurezza operativa e con valori medi tali da massimizzare il rendimento della del processo di ricarica.

7.3 Conclusioni

L’integrazione di raffreddamento bifase e recupero energetico rappresenta un importante passo avanti per le infrastrutture di ricarica rapida, con potenziali benefici per la durata delle batterie dei veicoli elettrici e l’efficienza complessiva del sistema di ricarica. Future ricerche si concentreranno su miglioramenti nella gestione del calore e nell’automazione del sistema.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state attivate consulenze esterne.

9 Pubblicazioni scientifiche

Per quanto riguarda la Gestione termica avanzata con recupero energetico di una stazione di ricarica veloce per veicoli elettrici e convogli di veicoli eterogenei semiautomatici che si ricaricano in linea, sono stati pubblicati i seguenti lavori:

- Nicolas E Lima Baschera, Alessandro Lidozzi, **Giuseppe Zummo**, **Luca Saraceno**, Fabio Riccardi, **Fernando Ortenzi**, Marco di Benedetto, Luca Solero, "[Advances in Two-Phase Cooling for Next Power Electronics Converters](#)", IEEE Open Journal of Industry Applications, 2024, 5, pp. 381–390
- Giulia Di Nezio, Nicolas E Lima Baschera, Alessandro Lidozzi, Marco di Benedetto, , **Luca Saraceno**, **Fernando Ortenzi**, Luca Solero, **Giuseppe Zummo**, "Neural Network Enhanced Control of Two-Phase Cooling Systems for Power Electronics Converters", submitted on IEEE Open Journal of Industry Applications (25 nov 2024)

10 Eventi di disseminazione

Durante l'evento ZEROEMISSION MEDITERRANEAN 2024, svoltosi presso la Fiera di Roma dal 16 al 18 ottobre 2024, sono state presentate le attività ENEA svolte nell'ambito dell' Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024, Progetto: Tema di ricerca 1.7 - Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali.

Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali: LA 3.12 (Laboratorio CCT)

LA 3.12 Progettazione e dimensionamento di un sistema di raffreddamento bifase per una stazione di ricarica rapida

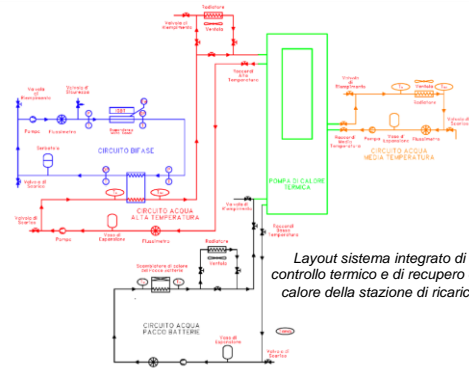


Autobus elettrico per i test di ricarica delle batteria



Obiettivo

Progettazione di un sistema di **thermal management** innovativo per l'elettronica di potenza e le batterie di un **autobus elettrico** di nuova generazione e della sua **stazione di ricarica**



Layout sistema integrato di controllo termico e di recupero del calore della stazione di ricarica



Inverter stazione di ricarica

Elementi di novità:

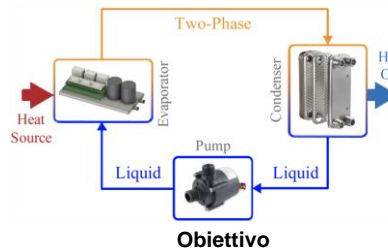
- Integrazione sinergica di un sistema di raffreddamento bifase con una pompa di calore termica, al fine di riutilizzare parte del **calore di scarto** dell'inverter e di trasformarlo in **potenza frigorifera** per il controllo delle batterie durante la fase di ricarica
- Accoppiamento termofluidodinamico tra diversi sottosistemi (inverter e motore elettrico autobus, batterie, inverter stazione di ricarica) che possa garantire **efficienza ed efficacia** nell'operatività in continua del sistema nel suo complesso

Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali: LA 3.14 (Laboratorio CCT & UNIROMA3)

LA 3.14 Prove al banco per sistema di raffreddamento bifase

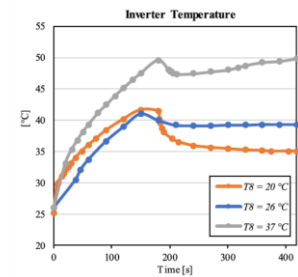


Banco prova per raffreddamento bifase

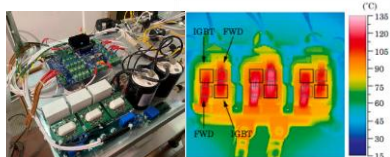


Obiettivo

Portare la tecnologia di **raffreddamento bifase** nel settore industriale tipico dell'**elettronica di potenza** e degli azionamenti elettrici



Comportamento termico dell'inverter al variare della temperatura dell'acqua del circuito secondario di smaltimento del calore



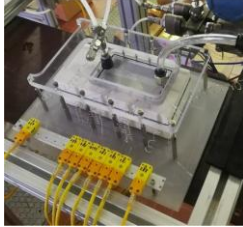
Inverter e scheda di acquisizione e controllo

Elementi di novità:

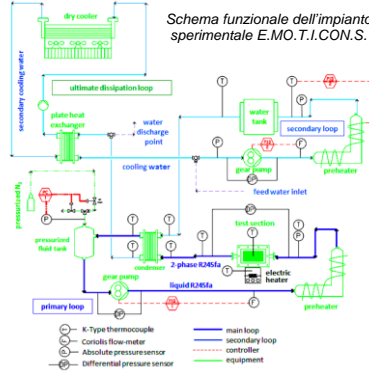
- completa caratterizzazione, valutazione prestazionale e definizione delle specifiche di un sistema di raffreddamento bifase che consentono di ottenere sia i criteri di dimensionamento che l'algoritmo di gestione per tale sistema, verificandone opportunamente le prestazioni e valutando le complessità realizzative
- Realizzazione ad hoc ed utilizzo di schede elettroniche di controllo e acquisizione delle misure, unitamente al software di gestione e acquisizione dati

Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali: LA 3.16 (Laboratorio CCT & UNIROMA1)

LA 3.16 Scambio Termico: sperimentazione scambio termico bifase su un prototipo a banco

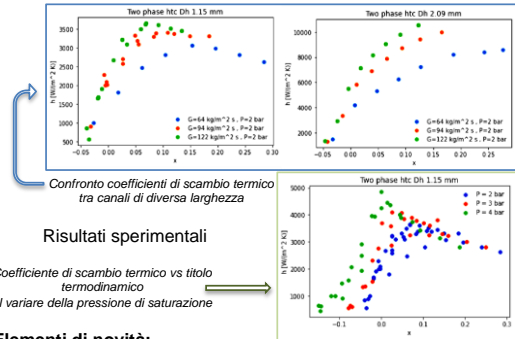


Sezione di prova (evaporatore a microcanali)



Obiettivo

Applicazione del thermal management bifase nel settore dell'elettronica di potenza (IGBT, SiC MOSFET, Diodi, Pacchi Batterie, Celle a Combustibile), per la mobilità elettrica



Elementi di novità:

- approfondimento del problema del raffreddamento di apparecchiature ad elevato flusso termico per applicazioni di elettronica di potenza (PE) ed High Performance Computing (HPC)
- misura sperimentale del coefficiente di scambio termico in varie condizioni operative e per diverse geometrie degli scambiatori a microcanali