

Ricerca di Sistema elettrico



Conversione di una stazione di ricarica per sistema di
raffreddamento bifase (LA3.15)

Alessandro Lidozzi, Giovanni Marini, Nicolas Basquera, Giulia Di Nezio

Conversione di una stazione di ricarica per sistema di raffreddamento bifase

TITOLO (LA3.15 Conversione di una stazione di ricarica per sistema di raffreddamento bifase)
Alessandro Lidozzi, Nicolas Basquera, Giulia Di Nezio, Giovanni Marini. Università degli Studi ROMA TRE

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: 3.15

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Fernando Ortenzi, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Alessandro Lidozzi, ENEA

Mese inizio previsto: 18

Mese inizio effettivo: 18

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: *"Tecnologie sperimentali per la ricarica dei veicoli elettrici e modelli per l'analisi e la simulazione della mobilità urbana"*

Indice

1	Risultati attesi	4
1.1	Stazione di ricarica	4
1.2	Risultati attesi	5
2	Risultati ottenuti.....	6
3	Prodotti attesi	7
4	Prodotti sviluppati	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	10
6	Sintesi delle attività svolte	11
7	Dettaglio delle attività svolte.....	12
7.1	Aggiornamento della stazione di ricarica per Two-Phase Cooling.....	13
7.1.1	Sensori e trasduttori	16
7.1.2	Software di controllo e acquisizione	17
7.2	Risultati sperimentali	19
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	21
9	Pubblicazioni scientifiche	22
10	Eventi di disseminazione	23

Indice delle figure

Figura 1 - Schema illustrativo della stazione di ricarica.	4
Figura 2 - Vista della stazione di ricarica completa.	5
Figura 3 - Layout del sistema realizzato per l'adozione del raffreddamento bifase all'interno della stazione di ricarica.	9
Figura 4 - Vista complessiva dell'elettronica di potenza e del circuito di raffreddamento bifase a supporto della stazione di ricarica.	9
Figura 5 - Schema a blocchi del circuito di raffreddamento di tipo bifase.	13
Figura 6 - Banco per aggiornamento della stazione di ricarica.	14
Figura 7 - Piattaforma di controllo PED-Board V4.	15
Figura 8 - Nuova Adapter Board V2 di interfaccia tra la scheda di controllo e la stazione di ricarica.	15
Figura 9 - Moduli IGBT Semikron Skiip e dissipatore per raffreddamento a liquido.	16
Figura 10 - Front Panel LabVIEW per l'acquisizione dei dati ed il controllo dell'impianto bifase.	18
Figura 11 - Block Diagram LabVIEW che riassume l'acquisizione ed il trattamento delle misure su μ Processore.	18
Figura 12 - FPGA Block Diagram l'acquisizione delle misure ed il controllo dell'impianto.	19
Figura 13 - Transitorio di temperatura del modulo di potenza durante una fase di ricarica.	20
Figura 14 - Confronto tra la temperatura del modulo di potenza con 2-Phase Cooling e con Water Cooling durante l'operazione di ricarica dell'accumulatore elettrochimico.	20

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Proprietà principali dei fluidi refrigeranti utilizzati.	13
Tabella 2 - Sensoristica.	16
Tabella 3 - Confronto a regime tra 2-Phase Cooling e Water Cooling	20

1 Risultati attesi

Dalla LA 3.15 avente titolo *Conversione di una stazione di ricarica per sistema di raffreddamento bifase* ci si attende l'aggiornamento tecnologico e la realizzazione delle componenti necessarie per l'upgrade della stazione di ricarica realizzata nel triennio di RdS precedente al fine di poter impiegare il raffreddamento bifase.

1.1 Stazione di ricarica

La stazione di ricarica, realizzata in un precedente Piano Triennale della Ricerca, ha le seguenti caratteristiche:

- Potenza in ricarica massima al capolinea 40 kW per 8 minuti
- Tensione nominale sistema di accumulo a bordo del veicolo 300 V, tensione massima 400 V e tensione minima maggiore di 200 V
- Energia da ricaricare 4.5÷5 kWh
- Potenza massima richiesta alla rete: 20 kW (~32 A)

La Figura 1 rappresenta lo schema illustrativo dell'intera stazione di ricarica: la macchina elettrica accoppiata al volano si interfaccia con la rete tramite un doppio stadio di conversione AC-DC-AC, grazie ai due convertitori lato rete e lato macchina, mentre la ricarica delle batterie sul veicolo viene effettuata tramite un ulteriore convertitore DC-DC collegato al link DC. Nella pratica, per effettuare l'operazione di ricarica, l'autobus è dotato di un pantografo che si collega all'uscita del convertitore C3. Il convertitore C3 sarà responsabile della gestione della ricarica dell'accumulatore di bordo, mentre C1 gestirà la potenza prelevata dalla rete elettrica necessaria per la ricarica del volano e a supporto della ricarica del veicolo.

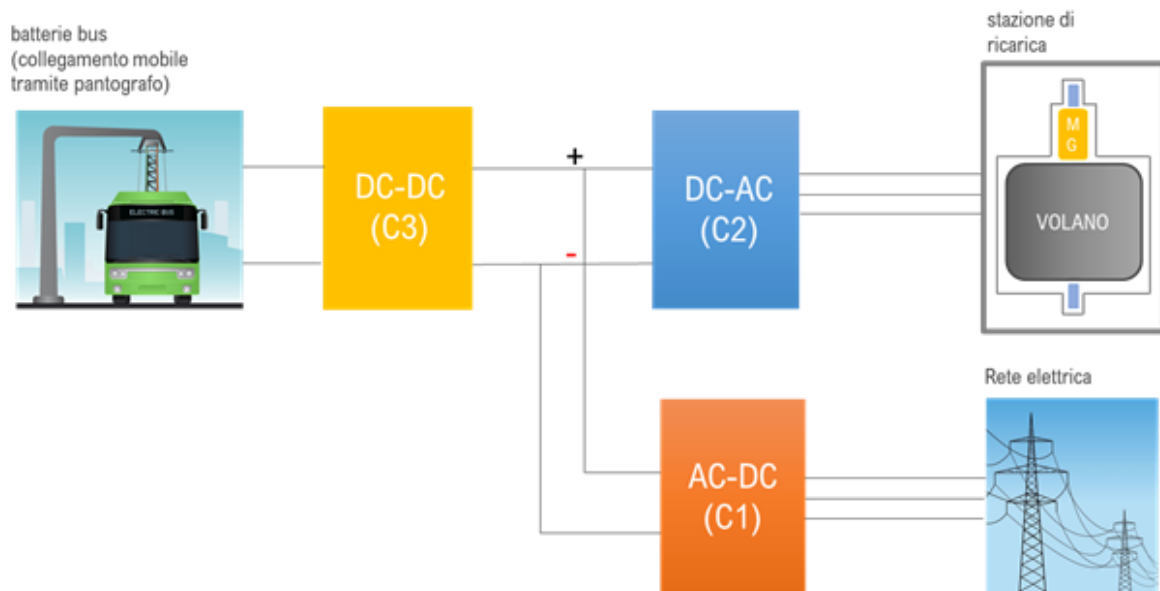


Figura 1 – Schema illustrativo della stazione di ricarica.

La Figura 2 mostra la vista frontale dell'assemblaggio relativo alla stazione di ricarica. All'interno di un armadio industriale sono stati alloggiati i vari sistemi di conversione statica, le relative schede di controllo, il filtro ed il trasformatore per l'allaccio alla rete elettrica, i vari sistemi per l'alimentazione ausiliaria ed i dispositivi di protezione come interruttori e fusibili.

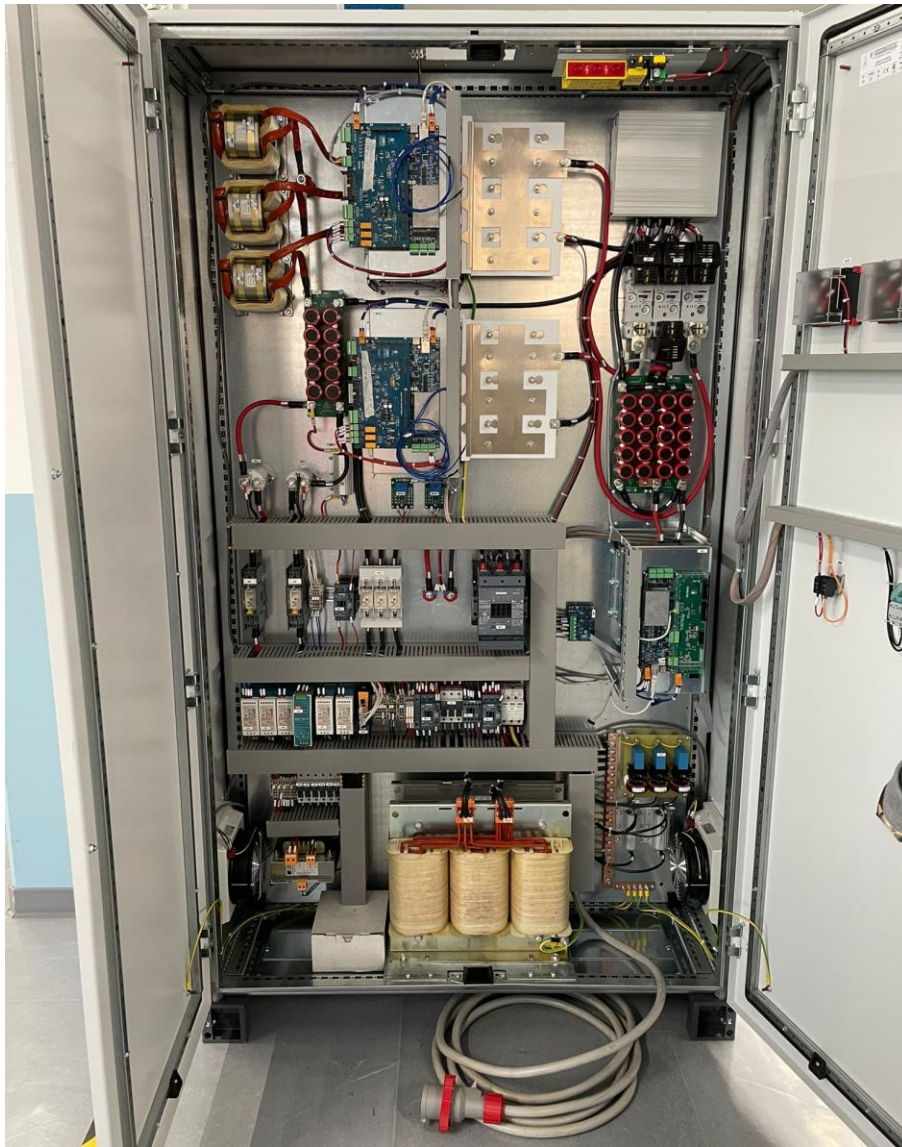


Figura 2 - Vista della stazione di ricarica completa.

1.2 Risultati attesi

Risultati attesi:

- Conversione della stazione di ricarica per impiego del raffreddamento bifase.
- Aggiornamento delle schede elettroniche per l'interfacciamento dell'impianto.
- Aggiornamento dell'elettronica di potenza al fine di impiegare il raffreddamento bifase.
- Test sperimentali di validazione.

2 Risultati ottenuti

L'attività ha consentito di valutare sperimentalmente le effettive prestazioni di un sistema di raffreddamento bifase a pompa applicato ai sistemi elettronici di potenza, e nello specifico a stazioni di ricarica per bus adibiti al trasporto pubblico urbano. La stazione di ricarica realizzata in una precedente attività di RdS è stata convertita per impiegare il raffreddamento bifase in luogo delle tecniche convenzionali comunemente utilizzate.

Dai test effettuati si evince come il sistema Pump-Driven Two-Phase Cooling (PTPC) permetta di asportare una quantità di calore decisamente superiore rispetto a un sistema di raffreddamento acqua-glicole standard, con una riduzione della temperatura del modulo fino a 20°C e un consumo di fluido inferiore di un ordine di grandezza. La progettazione e realizzazione di un sistema hardware completo, dotato di sensori di temperatura, pressione e flusso, insieme allo sviluppo del software di controllo basato su un'interfaccia LabVIEW, ha consentito l'implementazione di un algoritmo avanzato per la gestione ottimale del sistema PTPC.

Le conoscenze acquisite permettono di estendere questa tecnologia a diversi campi applicativi, tra cui sistemi di accumulo, impianti industriali, data center e settori avanzati come l'aeronautica e l'aerospazio. Sebbene i sistemi di raffreddamento bifase offrano evidenti vantaggi in termini di trasferimento termico, la loro applicazione risente di sfide legate alla gestione del fluido, come il controllo preciso dell'evaporazione in prossimità dei dispositivi da raffreddare. L'attività proposta ha permesso, oltre alla realizzazione di un banco prova completo di sensoristica avanzata e scheda di controllo, di testare l'efficacia di fluidi specifici per il raffreddamento bifase e di sviluppare algoritmi di controllo dedicati, migliorando significativamente l'efficienza e l'affidabilità di questi sistemi.

Pertanto, i risultati ottenuti dimostrano come l'adozione del sistema Pump-Driven Two-Phase Cooling (PTPC) consenta un significativo miglioramento dell'efficienza termica, con una riduzione della temperatura dei moduli fino a 20°C e un minore consumo di fluido refrigerante rispetto alle soluzioni tradizionali. Inoltre, lo sviluppo di un hardware completo e di algoritmi avanzati di controllo ha permesso di ottimizzare la gestione del raffreddamento, aumentando l'affidabilità e la sicurezza operativa. Questi progressi comportano un beneficio concreto per il sistema elettrico nazionale, poiché contribuiscono a migliorare l'efficienza delle infrastrutture di ricarica per il trasporto pubblico, ridurre il consumo energetico e favorire l'integrazione di tecnologie avanzate in settori strategici come l'accumulo energetico e i data center. L'ottimizzazione della gestione termica si traduce, inoltre, in una maggiore sostenibilità e in una riduzione dei costi operativi, rendendo le reti elettriche più resilienti e performanti.

3 Prodotti attesi

La presente attività ha come obiettivo principale la conversione della stazione di ricarica realizzata in una precedente attività di RdS, con tecniche avanzate ed integrate di raffreddamento bifase (Pump-Driven Two-Phase Cooling, PTPC). L'output finale è rappresentato proprio dalla stazione di ricarica equipaggiata con il sistema PTPC, progettata per garantire un'elevata efficienza termica nella gestione del calore generato durante le operazioni di ricarica. Per raggiungere questo risultato, la stazione di ricarica è stata aggiornata anche nell'elettronica di potenza affinché potesse consentire l'impiego del PDTC. I convertitori statici sono stati inseriti all'interno del circuito idraulico completo di sensoristica per il monitoraggio di temperatura, pressione e flusso del fluido refrigerante, necessario per validare le prestazioni del sistema PTPC. Inoltre, è stata realizzata la scheda di interfaccia dedicata che acquisisce i dati dai sensori e consente la gestione completa del ciclo di raffreddamento tramite una scheda di controllo programmabile con il fine di ottimizzare il ciclo di evaporazione e condensazione del fluido, migliorando l'efficienza termica e riducendo il consumo energetico.

Lista dei prodotti hardware/software attesi:

- Stazione di ricarica avanzata con raffreddamento PTPC
- Scheda di interfaccia dedicata
- Software di controllo appositamente sviluppato e basato su NI-LabVIEW
- Integrazione con la piattaforma di controllo PED-Board®
- Banco prova per test su raffreddamento bifase
- Infrastruttura di monitoraggio e controllo del banco prova
- Algoritmo di controllo avanzato per piattaforma combinata FPGA-microprocessore

4 Prodotti sviluppati

Questa Linea di Attività ha sviluppato prodotti sia in termini di hardware che di software, portando allo sviluppo di due principali prodotti: una stazione di ricarica avanzata integrata con il sistema Pump-Driven Two-Phase Cooling (PTPC). La stazione di ricarica mostrata in Figura 2, aggiornata per includere il raffreddamento bifase, rappresenta il primo prodotto sviluppato. Questo aggiornamento ha richiesto:

1. La riprogettazione e realizzazione di una scheda di interfaccia personalizzata, progettata per collegare l'elettronica di potenza della stazione al sistema di raffreddamento come mostrato nel layout in Figura 3. Questa scheda consente l'acquisizione di segnali fondamentali come temperature, pressioni e portate, garantendo un controllo dinamico del fluido refrigerante e dello scambio termico con l'ambiente o con un circuito esterno
2. L'integrazione di un software di controllo aggiornato, implementato utilizzando l'ambiente di sviluppo LabVIEW, che garantisce la gestione in tempo reale del raffreddamento PTPC e il salvataggio dei dati per analisi successive. Grazie alla sua accessibilità tramite web server integrato nella piattaforma PED-Board®, il software può essere utilizzato da remoto tramite browser, rendendo il sistema facilmente configurabile dagli utenti.

Il sistema mostrato in Figura 4, sviluppato come strumento complementare, rappresenta il secondo prodotto chiave. Progettato per aggiornare la stazione di ricarica affinché possa utilizzare il raffreddamento bifase, e dando la possibilità di testare diversi fluidi e configurazioni operative del sistema PTPC, il banco prova offre:

1. La possibilità di separare o combinare la fase liquida e la fase vapore, ampliando la flessibilità e le applicazioni del sistema.
2. Un'infrastruttura completa di monitoraggio e controllo, basata sulla scheda di interfaccia e sul software, per valutare e ottimizzare le prestazioni del sistema di raffreddamento bifase.

Entrambi i prodotti dispongono di un'architettura software avanzata, sviluppata per la piattaforma PED-Board®. L'algoritmo di controllo è suddiviso tra FPGA, per la gestione delle operazioni a tempo critico, e μ processore, per il monitoraggio, l'analisi dei dati e l'interfaccia utente. Questa struttura garantisce un controllo preciso e automatizzato del sistema PTPC, ottimizzando i parametri operativi in tempo reale. Grazie alla combinazione di stazione di ricarica aggiornata e banco prova, questa Linea di Attività ha fornito strumenti completi e flessibili per l'implementazione e l'ottimizzazione del sistema Pump-Driven Two-Phase Cooling, rendendolo adatto a una vasta gamma di applicazioni industriali.

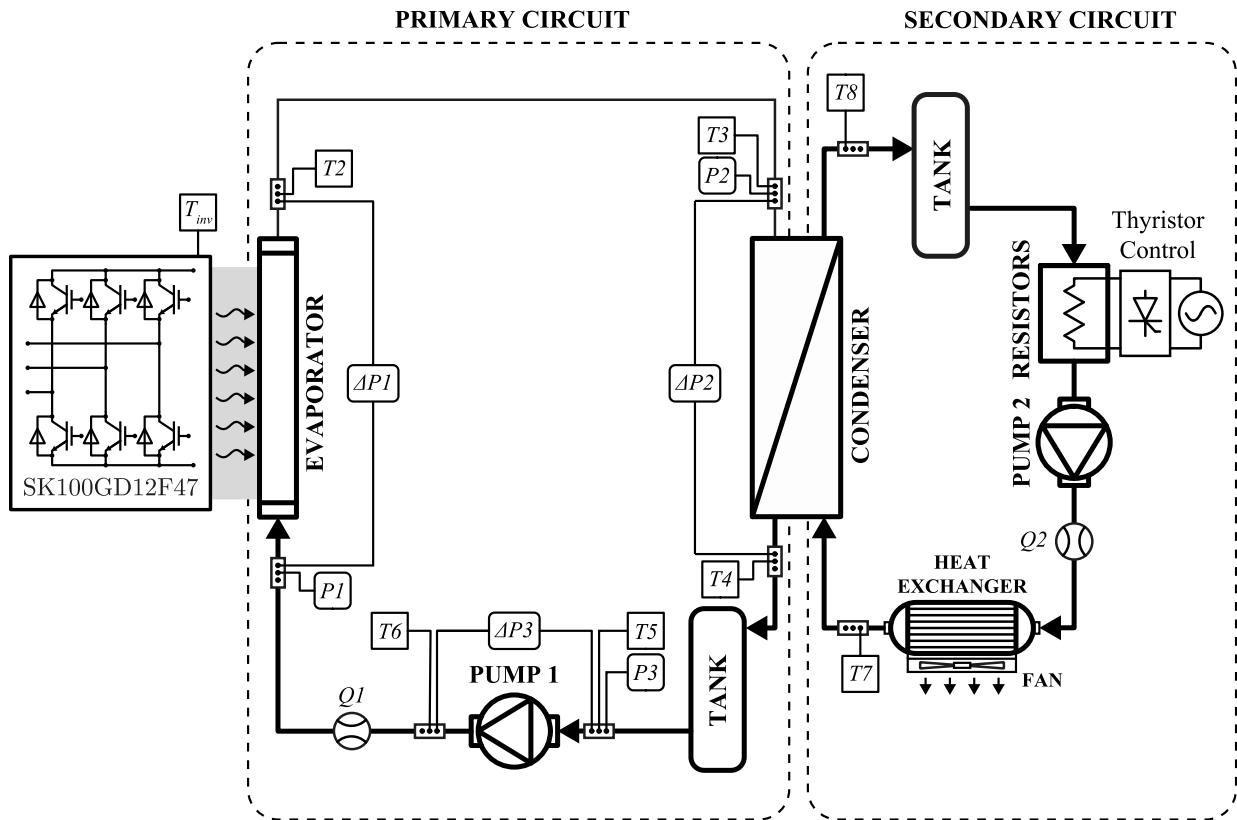


Figura 3 - Layout del sistema realizzato per l'adozione del raffreddamento bifase all'interno della stazione di ricarica.

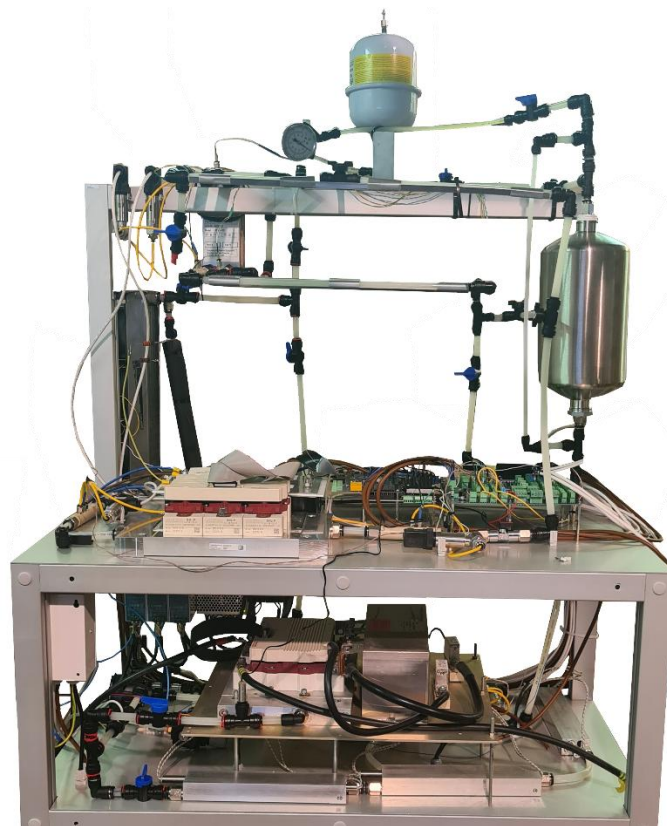


Figura 4 - Vista complessiva dell'elettronica di potenza e del circuito di raffreddamento bifase a supporto della stazione di ricarica.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Il progetto non ha subito scostamenti.

6 Sintesi delle attività svolte

Questa Linea di Attività ha avuto l'obiettivo di aggiornare la stazione di ricarica, progettata e realizzata, per impiegare il sistema di raffreddamento bifase. A tal fine, è stato progettato l'intero aggiornamento della stazione di ricarica, trasformando il sistema critico inizialmente raffreddato ad aria, in un sistema con 2-phase cooling.

La scheda di interfaccia tra l'elettronica di potenza e l'impianto di raffreddamento è stata riprogettata e quindi successivamente realizzata. La sensoristica è stata ridefinita ed integrata nella stazione di ricarica. Il software di controllo è stato aggiornato includendo la gestione dell'impianto di raffreddamento.

La scheda di controllo PED-Board® è stata selezionata anche per questa attività, essendo perfettamente in grado di gestire sia l'elettronica di potenza che l'impianto 2-Phase.

Per la programmazione è stato utilizzato l'ambiente di sviluppo LabVIEW della National Instruments.

7 Dettaglio delle attività svolte

Questa Linea di Attività ha avuto l'obiettivo di aggiornare la stazione di ricarica, progettata e realizzata, per impiegare il sistema di raffreddamento bifase. A tal fine, è stato progettato l'intero aggiornamento della stazione di ricarica, trasformando il sistema critico inizialmente raffreddato ad aria, in un sistema con 2-phase cooling. La scheda di interfaccia tra l'elettronica di potenza e l'impianto di raffreddamento è stata riprogettata e quindi successivamente realizzata. La sensoristica è stata ridefinita ed integrata nella stazione di ricarica. Il software di controllo è stato aggiornato includendo la gestione dell'impianto di raffreddamento.

La scheda di controllo non ha subito modifiche essendo perfettamente in grado di gestire contemporaneamente l'elettronica di potenza e l'impianto 2-Phase.

Per la programmazione è stato utilizzato l'ambiente LabVIEW della National Instruments. L'algoritmo di controllo è stato suddiviso tra i vari target disponibili sulla scheda, con la parte a tempo critico implementata su FPGA e quella per l'analisi, la gestione dell'interfaccia utente e il salvataggio dei dati gestita dal microprocessore. I risultati ottenuti hanno confermato l'efficacia di questi sistemi nell'asportare il calore generato dalle perdite nei dispositivi. In particolare, dai test sperimentali effettuati sulla stazione di ricarica è emerso che sono richieste portate di fluido significativamente più basse, circa un ordine di grandezza inferiore rispetto a quelle necessarie nei sistemi tradizionali basati su miscele di acqua e glicole. Inoltre, la temperatura operativa dell'elettronica di potenza risulta nettamente inferiore a quella che si otterrebbe raffreddando con miscele di acqua e glicole.

Un sistema di raffreddamento a due fasi sfrutta il calore latente di vaporizzazione che un qualsiasi liquido assorbe durante la sua evaporazione per asportare calore da una superficie calda. L'evaporazione si verifica quando la temperatura della superficie raggiunge e supera la temperatura di saturazione del liquido alla pressione di saturazione e si manifesta tipicamente con la formazione di bolle di vapore all'interfaccia superficie-liquido. Ad un certo valore di pressione, l'evaporazione di un liquido avviene senza incremento di temperatura, ossia in condizioni isoterme.

Il sistema mostrato in Figura 5 comprende due circuiti: il circuito primario e il circuito secondario. Il circuito primario include un condensatore, una pompa, un modulo di alimentazione e il relativo dissipatore di calore. Il refrigerante, evidenziato in giallo, fluisce nel dissipatore, dove subisce il TPC (Trattamento di Protezione e Condizionamento), rappresentato in giallo e grigio, mentre assorbe calore dalla fonte di calore. Successivamente, il refrigerante ritorna al condensatore. Nello specifico, il liquido raffreddato che esce dal condensatore viene pompato nel dissipatore di calore, dove assorbe il calore generato dalla fonte di alimentazione. Durante questo processo, il liquido parzialmente evapora, formando una miscela a due fasi la cui composizione varia a seconda delle condizioni operative. Il circuito secondario è invece fornito di acqua ed è costituito dal condensatore, da una pompa e da un radiatore di scambio ed ha lo scopo di condensare il liquido refrigerante bifase attraverso il condensatore.

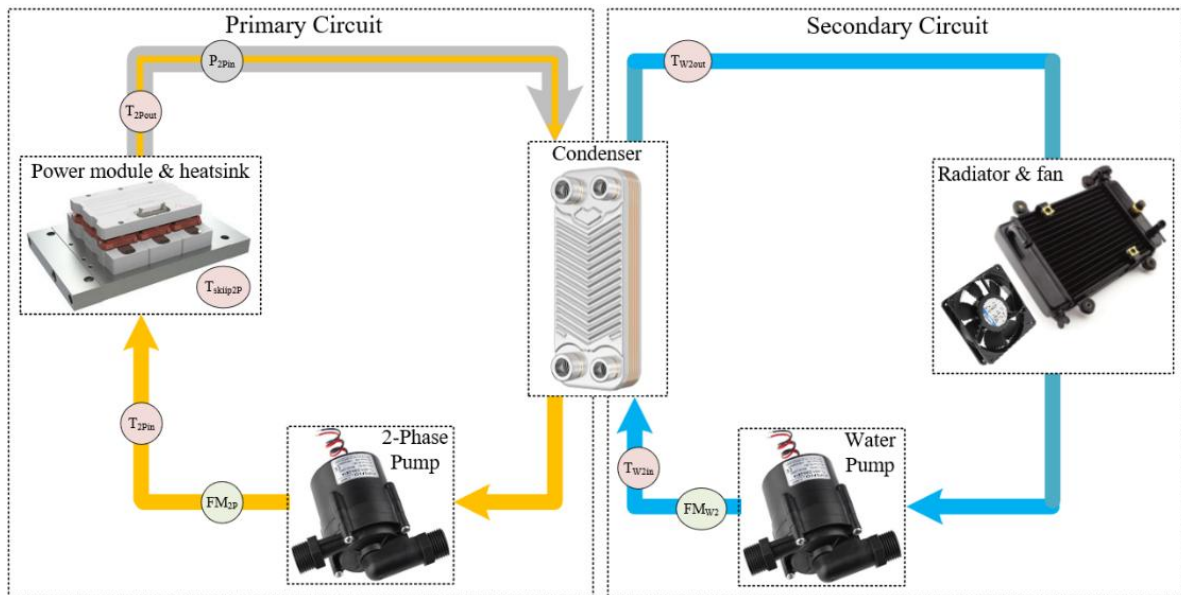


Figura 5 - Schema a blocchi del circuito di raffreddamento di tipo bifase.

La Tabella 1 mostra un confronto tra uno dei fluidi comunemente utilizzati in impianti bifase, l'R-245fa, che ha un Global Warming Potential (GWP) estremamente elevato e quindi mostra una bassa compatibilità ambientale. Il fluido invece utilizzato nell'attività sperimentale è stato l'EVA Fluid con un GWP estremamente basso e quindi meno impattante sull'ambiente.

Tabella 1 - Proprietà principali dei fluidi refrigeranti utilizzati.

R-245fa (Pentafluoropropano)	
Punto di ebollizione a 1 atm	14.9 °C
Temperatura critica	154.01 °C
Pressione critica	36.51 bar
Densità del liquido a 0 °C	1338.54 kg/m ³
Densità del vapore a 25 °C	8.55 kg/m ³
GWP	1030
EVA Fluid	
Punto di ebollizione a 1 atm	37.4 °C
Temperatura critica	163.2 °C
Pressione critica	31.2 bar
Densità del liquido a 0 °C	1245.3 kg/m ³
Densità del vapore a 25 °C	7.2 kg/m ³
GWP	2

7.1 Aggiornamento della stazione di ricarica per Two-Phase Cooling

La scheda di controllo, che esegue la struttura di controllo sia per il convertitore che per il PTPC, è stata implementata utilizzando la piattaforma di controllo di grado industriale PED-Board, completamente programmabile tramite l'ambiente di sviluppo NI LabVIEW. È stata sviluppata e fabbricata una scheda adattatore progettata su misura per acquisire e controllare accuratamente le variabili di interesse dai convertitori e dal sistema PTPC. Di conseguenza, il sistema di controllo può regolare le correnti di fase dello stadio di potenza di carica e il

funzionamento della pompa del sistema PTPC. È stata sviluppata un'interfaccia utente in LabVIEW per monitorare e controllare il sistema di raffreddamento mentre si raccolgono dati in modo efficace. Inoltre, il misuratore di potenza Voltech PM3000A viene utilizzato per misurare la potenza in ingresso-uscita in corrente continua del modulo a IGBT che gestisce la ricarica del sistema di accumulo. Questo consente di determinare le perdite gestite dal sistema PTPC, corrispondenti al calore estratto.

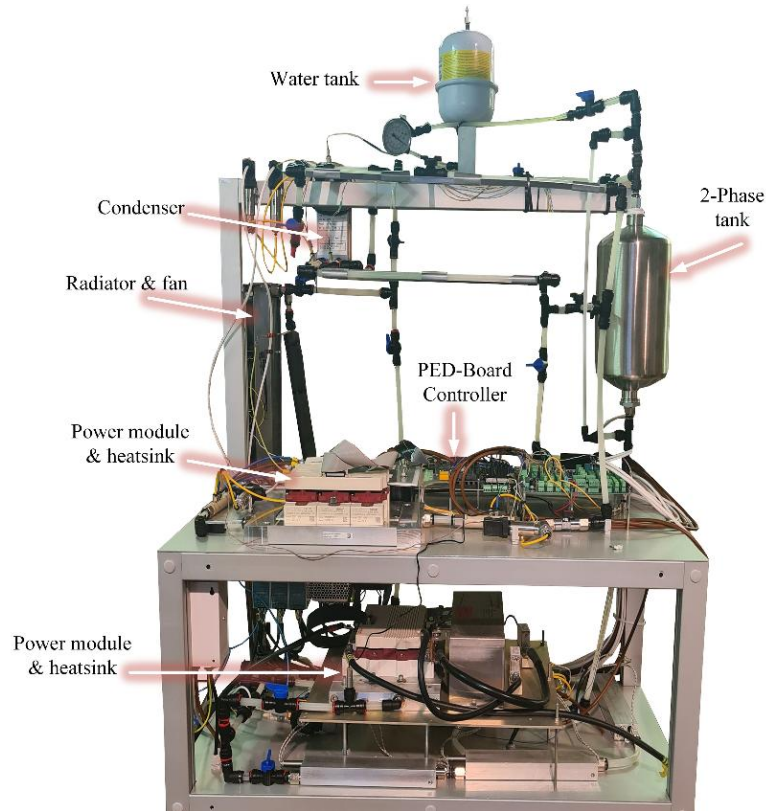


Figura 6 – Banco per aggiornamento della stazione di ricarica.

Per il controllo della stazione di ricarica e per l'acquisizione segnali provenienti dalla sensoristica di bordo, è stata scelta una piattaforma capace di acquisire segnali di tipo analogico (indicati brevemente come AIN, ossia l'ingresso Analog Input) e di tipo digitale (indicati come I/O, ossia Input/Output) e segnali a impulsi PWM (Pulse Width Modulation). La scelta è ricaduta sulla scheda PED-Board V4[®], mostrata in Figura 7, prodotta e commercializzata dalla ED-Elettronica Dedicata Srl. La scheda monta un sistema System-on Module sbRIO-9651 prodotto dalla National Instruments che ha al suo interno un microprocessore ARM dual-core ed una FPGA Xilinx Artix-7. Entrambi i target sono programmabili tramite il software di sviluppo LabVIEW[®].

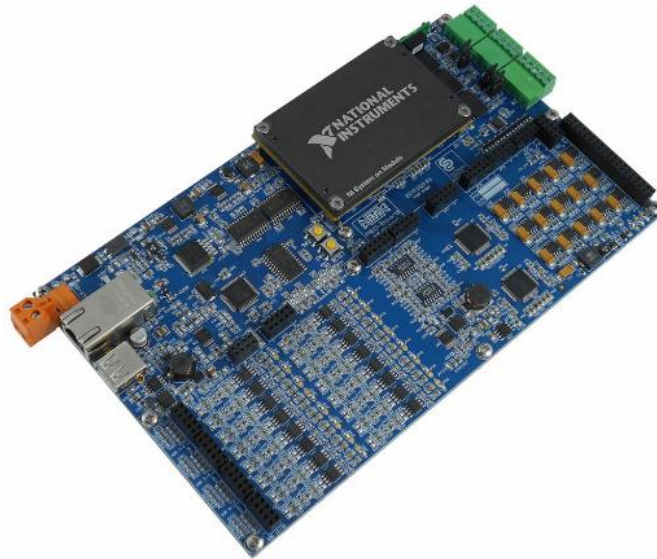


Figura 7 - Piattaforma di controllo PED-Board V4.

L'interfacciamento tra la scheda di controllo, i sottosistemi da pilotare e i trasduttori di misura, è stato reso possibile grazie alla realizzazione di una PCB di interfaccia (Adapter Board), dedicata alla specifica applicazione. L'Adapter Board V2 si è resa necessaria per poter acquisire e condizionare i vari segnali provenienti dai trasduttori installati nei vari punti del circuito e per pilotare l'inverter di trazione. Il collegamento tra i trasduttori e l'Adapter Board è stato realizzato tramite dei connettori dedicati a sgancio rapido con fissaggio a vite. La successiva Figura 8 mostra la scheda di adattamento realizzata ed assemblata.

La Figura 9 mostra i tre moduli IGBT ed i grate driver integrati per funzionamento come inverter/raddrizzatore e come convertitore DC-DC. Il dissipatore è per raffreddamento a liquido con turbolatori posti al suo interno per evitare la formazione di moti laminari che ridurrebbero drasticamente le capacità di raffreddamento anche utilizzando la tecnologia 2-Phase (i.e. la tecnologia di cooling bifase risente molto meno di possibili problemi dovuti a moti laminari, grazie alla presenza di evaporazione).

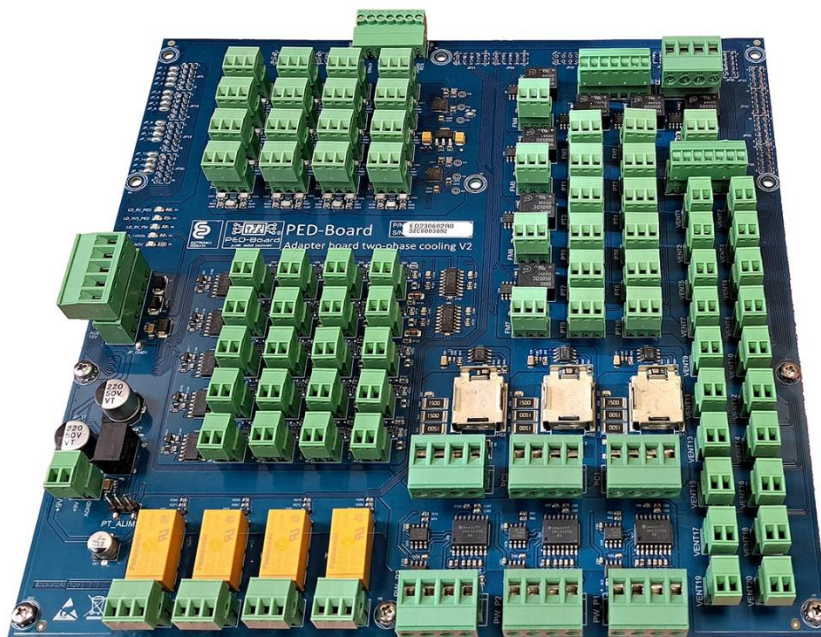


Figura 8 - Nuova Adapter Board V2 di interfaccia tra la scheda di controllo e la stazione di ricarica.

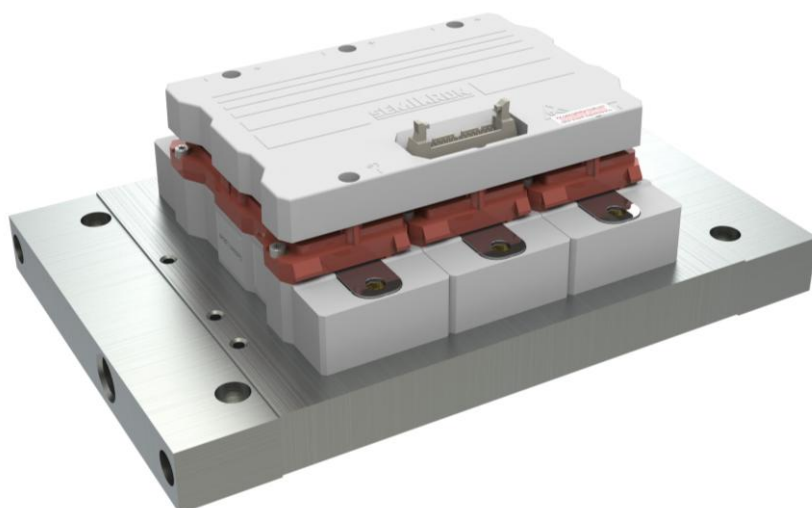


Figura 9 - Moduli IGBT Semikron Skiip e relativo dissipatore per raffreddamento a liquido/2-Phase.

7.1.1 Sensori e trasduttori

La Tabella 2 riporta una lista della sensoristica impiegata per la misura di portata sia nel circuito principale che in quello secondario. I due tipi di trasduttore di pressione impiegati, ovvero assoluto e differenziale. I termistori NTC per valutare le temperature in diverse parti del circuito, con caratteristiche sia ad immersione che per impiego su scambiatore.

Tabella 2 – Sensoristica.

Trasduttore	Modello	Caratteristiche
Misuratore di portata circuito principale	GEM FT-210	Flow range: 0,1 ÷ 2.5 l/min Operating temperature: -20 ÷ +100 °C Max pressure 25 bar
Misuratore di portata circuito secondario	GEMS FT-110	Flow range: 0,5 ÷ 5 l/min Operating temperature: -20 ÷ +100 °C
Trasduttore di pressione assoluta	GE-UNIK 5000 PTX5072-TC-A2-CA-H0-PA	Pressure range: 0 ÷ 5 bar (abs) Temperature range: -40 ÷ +80 °C Accuracy: ±0.1% FS BSL
Trasduttore di pressione differenziale	GE-UNIK 5000 PTX5072-TC-A3-CB-H0-PA	Pressure range: 0 ÷ 350 mbar (diff.) Temperature range: -40 ÷ +80 °C Accuracy: ±0.04% FS BSL
Termistore NTC Immersione fluido	TE Connectivity GA10K3MBD1	Resistenza 10 kΩ a 25°C Temperature range: -40 ÷ +125 °C
Termistore NTC Sezione di prova	TE Connectivity GA10K3MCD1	Resistenza 10 kΩ a 25°C Temperature range: -40 ÷ +125 °C
Serbatoio (tank)	FESTO CRVZS 5	Pressione da -0.95 a 16 bar Range di temperatura: -10 ÷ +100 °C
Pompa centrifuga http://www.topsflo.com/dc-brushless-pump/tl-c01-centrifugal-dc-mini-pump.html	TOPSFLO TL-C01-C12-2008	Max flow rate: 18 l/min Max static lift 8 m
Condensatore a piastre	Xylem Lowara BP 400-020	Potenza > 3kW

7.1.2 Software di controllo e acquisizione

Il software di controllo della stazione di ricarica, inclusi i vari convertitori presenti, non ha richiesto modifiche significative. Tuttavia, è stato sviluppato un nuovo software di controllo per il sistema di raffreddamento bifase, dedicato alla gestione termica della stazione. È stato impiegato l'ambiente di sviluppo LabVIEW e la scheda di controllo già mostrata in Figura 7.

Il front panel del sistema di gestione termica mostrato in Figura 10 è progettato per fornire un'interfaccia utente intuitiva e funzionale. Le principali componenti del front panel includono:

- Indicatori di Temperatura - Visualizzano in tempo reale le temperature rilevate dai sensori posizionati in vari punti del sistema. Questi indicatori possono essere rappresentati da termometri digitali o grafici a barre.
- Controlli di Setpoint - Permettono all'utente di impostare i valori desiderati di temperatura per diverse zone del sistema. Questi controlli possono essere slider o caselle di testo numeriche.
- Pannello di Controllo Manuale - Consente all'utente di intervenire manualmente sul sistema di raffreddamento, attivando o disattivando componenti specifici come ventole o pompe.
- Indicatori di pressione - Forniscono i valori di pressione dell'impianto.
- Indicatori di portata - Forniscono i valori della portata del fluido sul circuito primario e secondario.

Il Block Diagram del sistema di gestione termica in LabVIEW (di cui un frame è mostrato in Figura 11) è progettato per acquisire, elaborare e visualizzare i dati di temperatura, pressione e portata provenienti dall'impianto termico. Le principali componenti del Block Diagram includono:

- Acquisizione dei Dati - Utilizza i moduli di acquisizione analogici e digitali presenti sulla scheda di controllo ed i circuiti di condizionamento presenti sulla Adapter Board progettata e realizzata per le specifiche funzioni.
- Filtraggio dei Segnali - Applica filtri digitali per eliminare il rumore dai segnali acquisiti, garantendo letture di temperatura, pressione e portata più accurate e stabili.
- Elaborazione dei Dati - Eseguce calcoli necessari per determinare parametri termici specifici, come il gradiente di temperatura, la potenza termica e l'efficienza del sistema. Questi calcoli possono essere implementati tramite funzioni matematiche e logiche.
- Visualizzazione dei Dati - I dati elaborati vengono inviati al front panel per la visualizzazione in tempo reale. Questo include grafici, indicatori e allarmi che mostrano lo stato attuale dell'impianto termico.
- Registrazione dei Dati - Salva i dati di temperatura e altri parametri in file di log per analisi successive. Questo può essere fatto utilizzando funzioni di scrittura su file o database.
- Controllo del Sistema - Implementa logiche di controllo per regolare il funzionamento dell'impianto termico in base alle letture dei sensori. Questo può includere il controllo di attuatori come valvole, pompe e ventole.

Infine, la Figura 12 mostra una parte del Block Diagram del target FPGA dove sono mostrati lo scheduler principale, i loop di controllo delle portate ed il codice di acquisizione di temperature e pressioni nei vari punti dell'impianto.

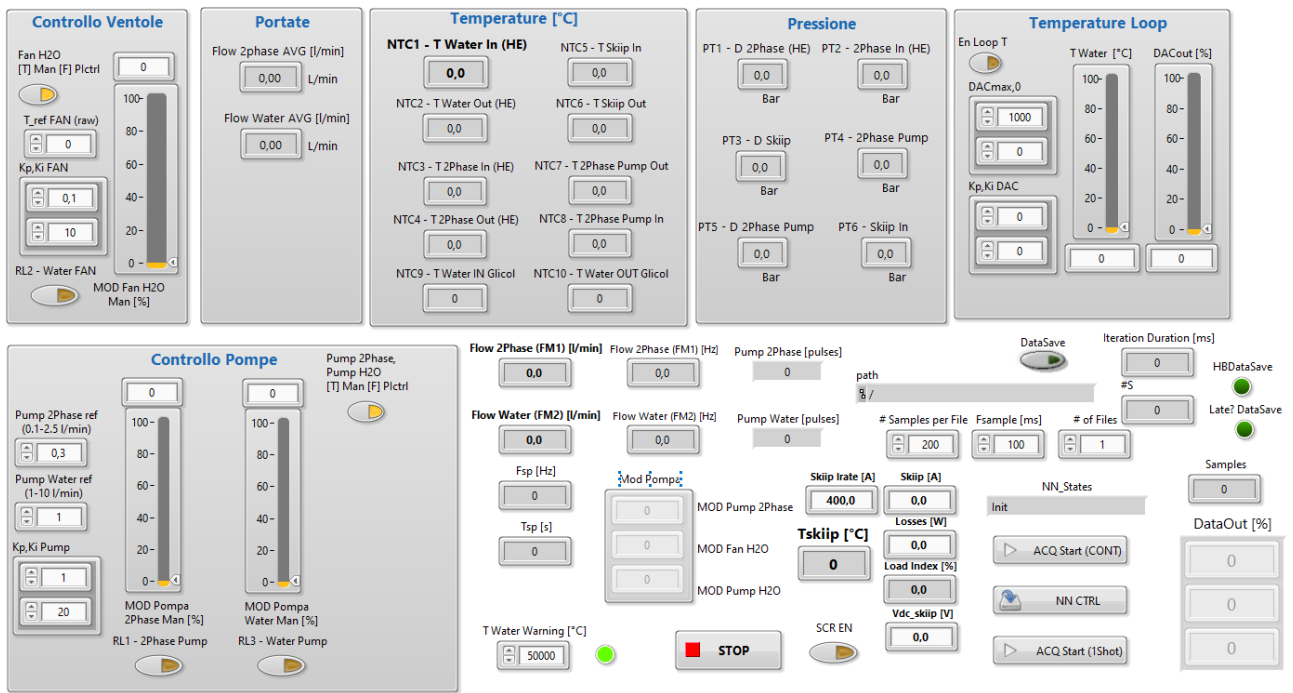


Figura 10 - Front Panel LabVIEW per l'acquisizione dei dati ed il controllo dell'impianto bifase.

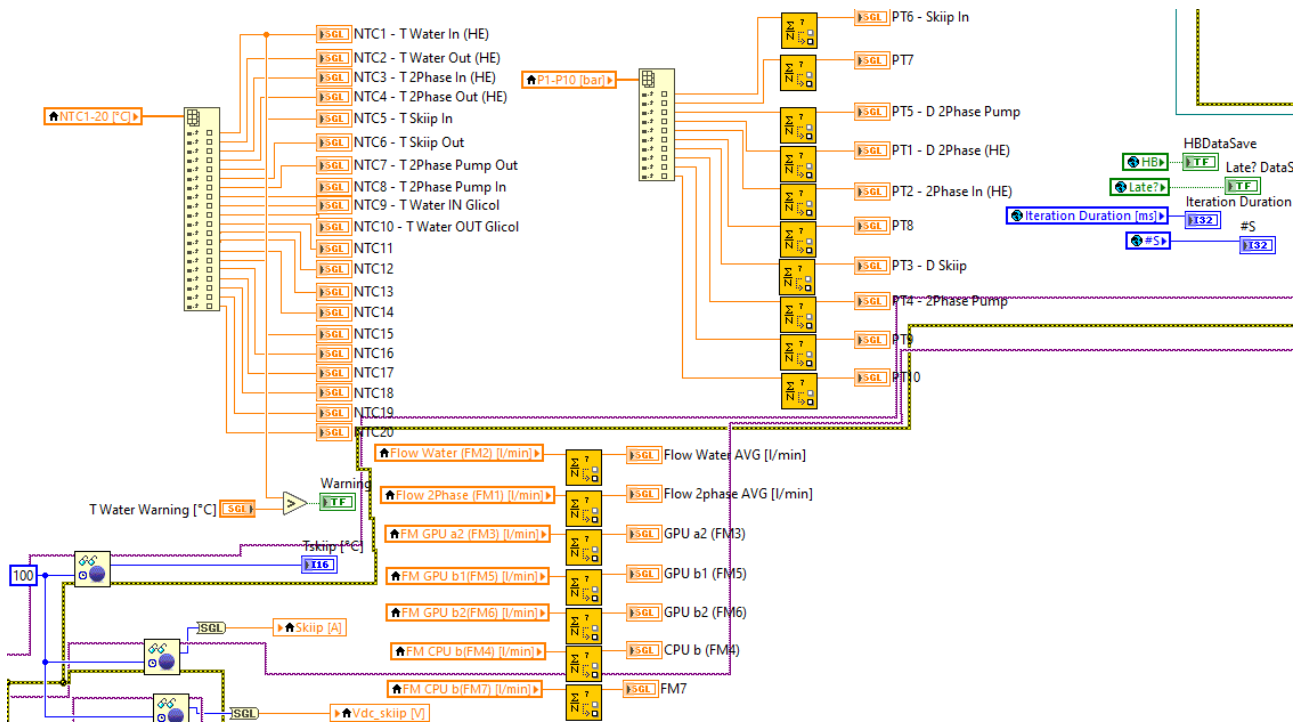


Figura 11 - Block Diagram LabVIEW che riassume l'acquisizione ed il trattamento delle misure su μ Processore.

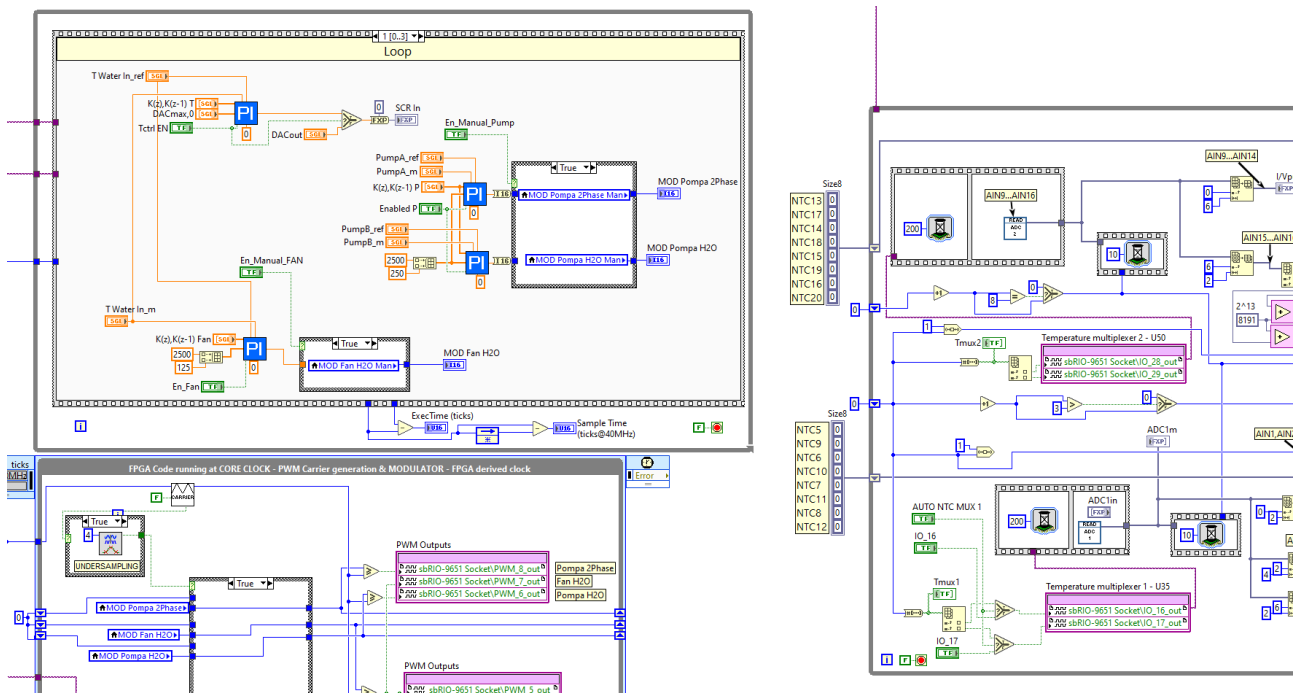


Figura 12 - FPGA Block Diagram l'acquisizione delle misure ed il controllo dell'impianto.

7.2 Risultati sperimentali

La Figura 13 mostra l'andamento della temperatura del modulo di interfaccia verso il pacco batterie. I dati sono stati acquisiti direttamente dalla scheda di controllo durante il transitorio di ricarica con partenza dallo stato di equilibrio termico con l'ambiente esterno. Per confronto, in Figura 14 i risultati ottenuti con fluido 2-Phase sono stati confrontati con quanto ottenuto con un circuito 1-Phase ad acqua. Il test comparativo è stato possibile sfruttando lo stesso circuito idraulico. Si può immaginare che un raffreddamento ad aria, anche forzata, avrebbe portato il modulo di potenza ad operare ad una temperatura di esercizio ancora maggiore.

La Tabella 3 mostra l'analisi comparativa steady-state tra il raffreddamento 2-Phase e un raffreddamento per mezzo di acqua. Le perdite del modulo di potenza sono le medesime in entrambi i casi, essendo il punto operativo lo stesso durante le due prove. Nei due test la temperatura del modulo di potenza è stata mantenuta a circa 63 °C, agendo quindi sulla temperatura ambiente, ovvero sulla temperatura del fluido secondario. Si può notare che a fronte di una riduzione della portata del fluido di più di 10 volte, il raffreddamento 2-Phase è riuscito a mantenere la medesima temperatura del modulo di potenza durante una fase di ricarica, con una temperatura ambiente maggiore di circa 20°C rispetto ad un raffreddamento ad acqua.

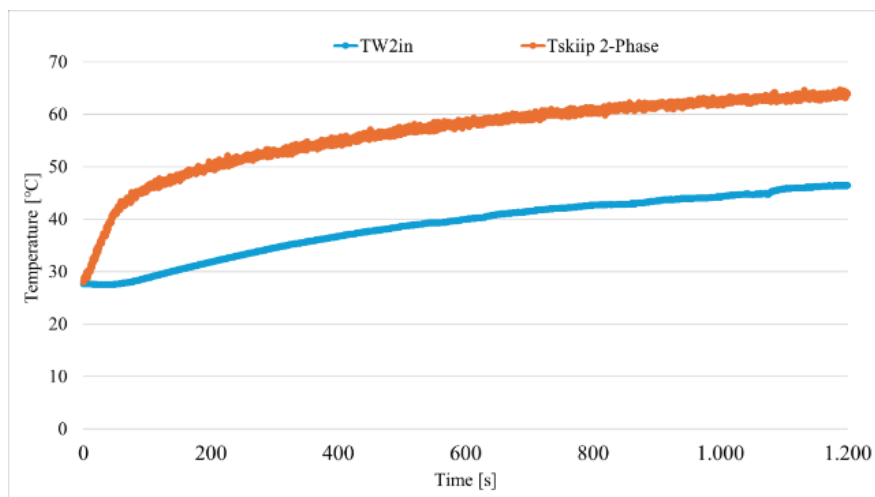


Figura 13 - Transitorio di temperatura del modulo di potenza durante una fase di ricarica.

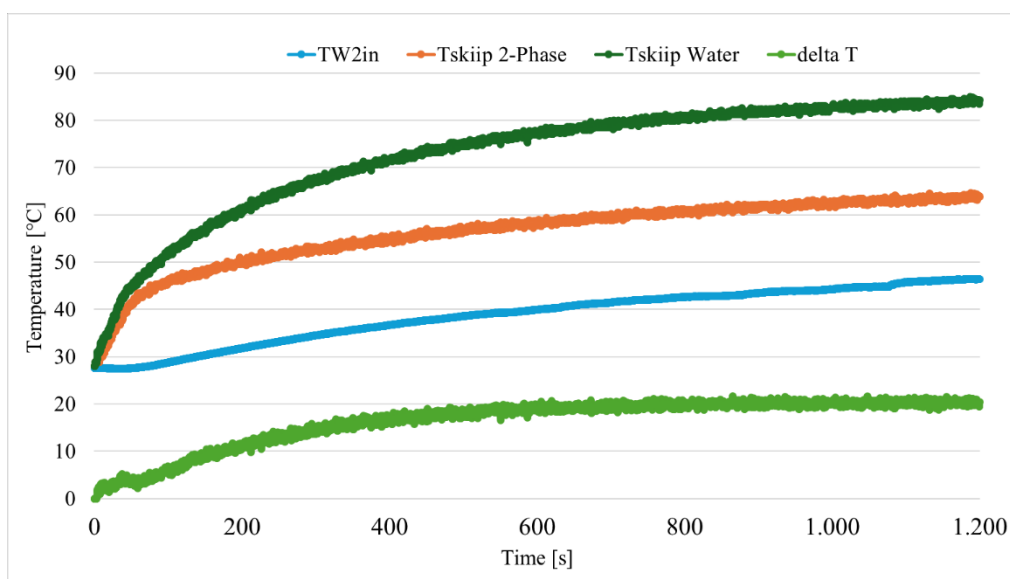


Figura 14 - Confronto tra la temperatura del modulo di potenza con 2-Phase Cooling e con Water Cooling durante l'operazione di ricarica dell'accumulatore elettrochimico.

Tabella 3 - Confronto a regime tra 2-Phase Cooling e Water Cooling

Skiip power module Losses \approx 2200W		
	WATER with 20% Glycol	2-Phase Cooling
Flow rate [l/min]	10	0.9
T_{Skiip} @ 63 °C (steady state)		
	Acqua con circa 20% glicole	2Phase Cooling
Tambiente* [°C]	\approx 24.8	\approx 44.8

*Stessa temperatura di esercizio del modulo di potenza con raffreddamento ad acqua ma a temperatura ambiente più elevata. Nel caso di raffreddamento ad aria, il miglioramento prestazione è ancora più evidente.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

La Linea di Attività non ha impiegato consulenze esterne.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta

- N. Basquera, A. Lidozzi, G. Zummo, L. Saraceno, F. Riccardi, F. Ortenzi, M. di Benedetto, L. Solero, "Advances in Two-Phase Cooling for Next Power Electronics Converters," in *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 5, pp. 381-390, 2024, doi: 10.1109/OJIA.2024.3451990.
- G. Di Nezio, N. Baschera, A. Lidozzi, M. di Benedetto, L. Saraceno, F. Ortenzi, L. Solero, Giuseppe Zummo, "Neural Network Enhanced Control of Two-Phase Cooling Systems for Power Electronics Converters," *IEEE Open Journal of Industry Applications* (under review)

10 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione eventualmente scaturiti dall'attività svolta