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

LA3.14 – Scambio termico: Prove al banco per sistema di raffreddamento bifase

Alessandro Lidozzi, Nicolas Basquera, Giulia Di Nezio, Alessandro Faro

ROMA TRE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI

RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA3.14_020

LA3.14 – SCAMBIO TERMICO: PROVE AL BANCO PER SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO BIFASE

Alessandro Lidozzi, Nicolas Basquera, Giulia Di Nezio, Alessandro Faro. Università degli Studi ROMA TRE

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: *3.14*

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Alessandro Lidozzi, Dipartimento di Ingegneria Civile, Industriale e delle Tecnologie Aeronautiche, Università degli Studi ROMA TRE

Mese inizio previsto: 1

Mese inizio effettivo: 1

Mese fine previsto: 18

Mese fine effettivo: 18

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

Responsabile scientifico ENEA: Giuseppe Zummo

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Alessandro Lidozzi

Indice

1 RISULTATI ATTESI 3
2 RISULTATI OTTENUTI 4
3 PRODOTTI ATTESI 5
4 PRODOTTI SVILUPPATI 7
5 ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI 11
6 SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 12
7 DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 13
8 CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE 27
9 PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE 28
10 EVENTI DI DISSEMINAZIONE 29

1 Risultati attesi

Dalla LA 3.14 avene titolo 'Prove al banco per sistema di raffreddamento bifase' ci si attende la progettazione e la realizzazione di un banco di test per sistemi di raffreddamento bifase che consenta una valutazione prestazionale delle capacità di asportazione del calore impiegando fluidi specifici che possano cambiare fase quando opportunamente gestiti.

1.1 *Prove al banco di un sistema di ricarica raffreddato con tecnologia bifase*

Le prove, svolte al banco opportunamente realizzato, hanno consentito la completa caratterizzazione, valutazione prestazionale e definizione delle specifiche di un sistema di raffreddamento bifase. Al banco si è potuto valutare in maniera dettagliata ed approfondita la caratteristica del sistema di raffreddamento operando con diversi fluidi e con diverse strutture di scambiatori. Portata, temperatura e pressioni sono state accuratamente monitorate e regolate e verranno impiegate da input per il futuro dimensionamento di sistemi di raffreddamento di questa tipologia. L'attività di laboratorio ha prodotto come output, sia i criteri di dimensionamento che l'algoritmo di gestione per un sistema di raffreddamento bifase, verificandone opportunamente le prestazioni e valutando le complessità realizzative.

Sono state realizzate le schede di controllo e acquisizione delle misure, unitamente al software di gestione e acquisizione.

Pertanto, questa LA ha consentito di acquisire competenze e conoscenze che potranno essere impiegate per la successiva LA e per ulteriori sviluppi futuri, portando la tecnologia di raffreddamento bifase nel settore industriale tipico dell'elettronica di potenza e degli azionamenti elettrici.

2 Risultati ottenuti

L'attività ha consentito di valutare sperimentalmente le effettive prestazioni di un sistema di raffreddamento bifase applicato ai sistemi elettronici di potenza. Pertanto, dai test effettuati si evince come la quantità di calore asportata sia decisamente maggiore rispetto ad un sistema di raffreddamento acqua-glicole standard. L'aver realizzato un sistema hardware in grado di acquisire i segnali d'interesse per l'interno impianto, e la successiva realizzazione del software di controllo, ha permesso di sviluppare un apposito algoritmo per la gestione dell'impianto bifase. Le conoscenze acquisite pertanto, consentiranno di introdurre questa tecnologia in diversi campi quali sistemi di accumulo, impianti industriali, data center così come nei settori tipici dell'aeronautica e dell'aerospazio.

Sistemi di raffreddamento bifase, seppur di evidente vantaggio nei termini di estrazione del calore dai dispositivi che necessitano di essere raffreddati, trovano un ostacolo applicativo nel complesso sistema di gestione che deve essere in grado di innescare l'evaporazione del fluido in prossimità del sistema da controllare termicamente. L'attività proposta ha consentito, oltre alla realizzazione di un banco prova completo di sensoristica e scheda di controllo, di valutare le performance nell'impiego di fluidi specifici per sistemi bifase, consentendo quindi di sviluppare un algoritmo di controllo dedicato per questi apparati.

3 Prodotti attesi

La presente LA aveva come obiettivo lo sviluppo di un sistema completo di test per raffreddamento bifase. Pertanto, i prodotti attesi sono relativi alla progettazione e realizzazione del banco prova, alla progettazione e realizzazione della scheda di interfaccia tra la sensoristica presente al banco e la scheda di controllo industriale, ed infine, l'algoritmo di controllo specifico per sistemi di raffreddamento bifase.

3.1 Banco di test per sistemi di raffreddamento bifase

È stato realizzato un banco prova per sistemi di raffreddamento bifase (un particolare dello stesso in Figura 1), dove si possono identificare la scheda di controllo e la relativa scheda di adattamento che ha consentito l'interfacciamento con la sensoristica presente che verrà descritta nel presente report; si può inoltre notare la presenza dell'inverter che è stato impiegato per le valutazioni prestazionali, dove il dissipatore è di derivazione industriale, quindi non progettato specificatamente per sistemi di raffreddamento bifase.

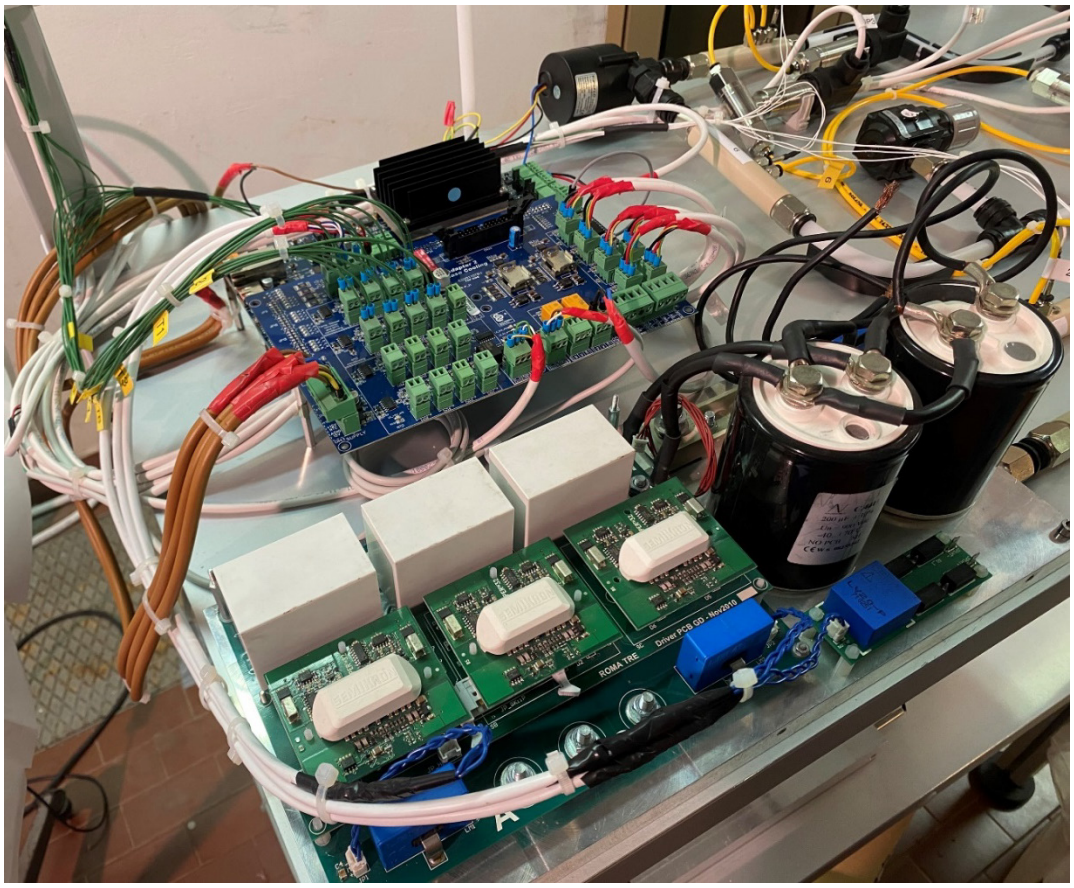


Figura 1 – Vista in dettaglio del banco prova per raffreddamento bifase: inverter e scheda di acquisizione e controllo.

3.2 Scheda di acquisizione e controllo per sistema di raffreddamento bifase

La Figura 2 mostra in dettaglio la scheda di controllo basata su un System on Module sbRIO-9651 prodotto dalla National Instruments, dove sono state inserite specifiche periferiche quali ADC, DAC, unita PWM, digital I/O, così come protocolli di comunicazione CAN-bus e RS-485. Nella parte superiore è presente una scheda di adattamento (Adapter Board) che ha consentito sia di poter alimentare la sensoristica che di ricevere i

segnali di feedback relativi a temperature, pressioni, portate, consentendo di poter regolare la velocità della pompa e delle eventuali ventole (per condensatori con scambio in aria).

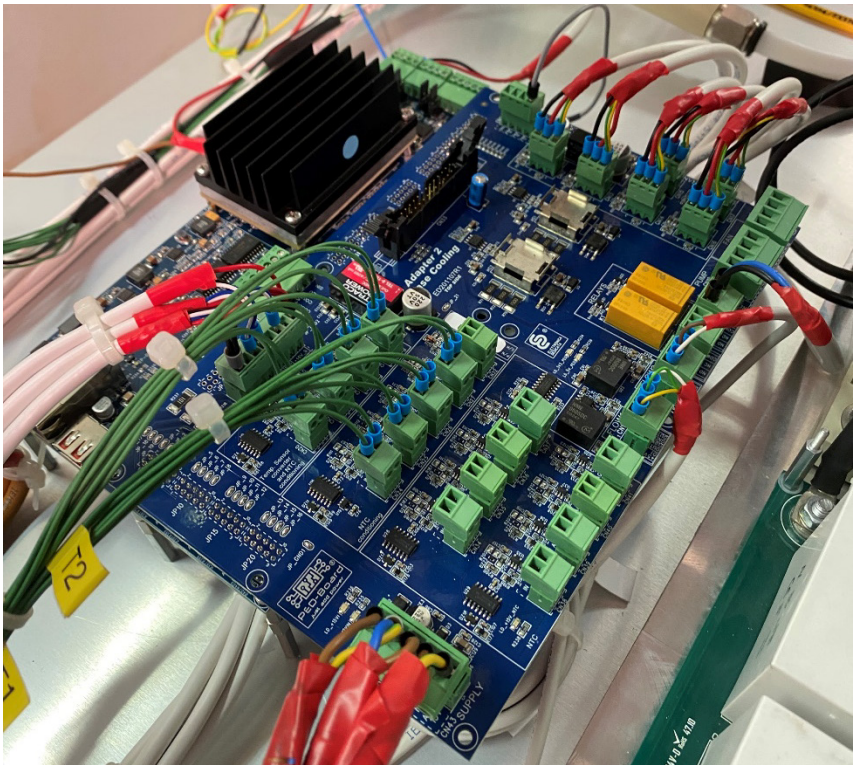


Figura 2 - Scheda di acquisizione e controllo installata nel test-rig per raffreddamento bifase.

3.3 Algoritmo di controllo per impianto di raffreddamento bifase

Il controllo del sistema di raffreddamento bifase è stato articolato in due fasi distinte. La prima si è resa necessaria per la caratterizzazione e la definizione dei principali parametri di regolazione, la seconda ha coinvolto lo sviluppo di un algoritmo completamente automatico. I principali dati acquisiti sono riportati graficamente in Figura 3, dove sono resi poi disponibili all'utente da parte della piattaforma di controllo. Proprio grazie a questi dati è stato possibile comprendere il funzionamento del sistema bifase e quindi individuare possibili strategie di regolazione. A titolo di esempio, in Figura 4a e in Figura 4b sono mostrati rispettivamente il codice LabVIEW FPGA per l'acquisizione delle misure di pressione ed il codice per la lettura delle temperature dagli NTC; entrambi come dati grezzi che verranno poi opportunamente scalati sul μProcessore disponibile.

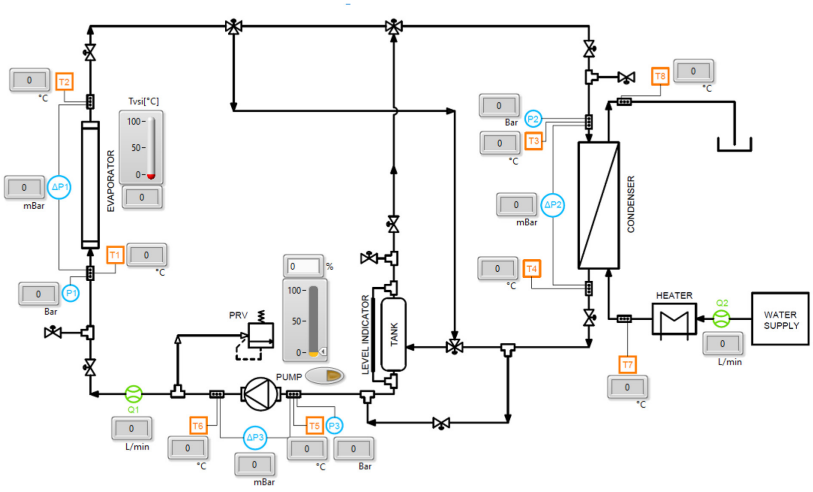
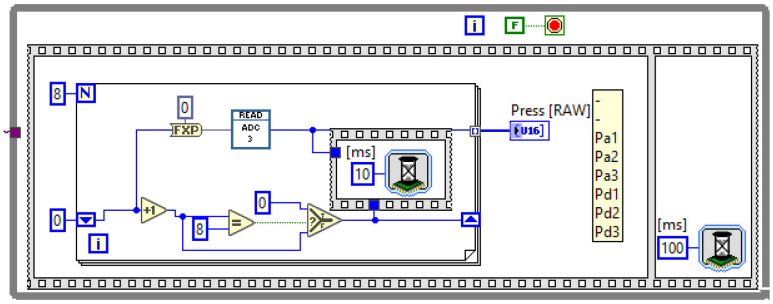
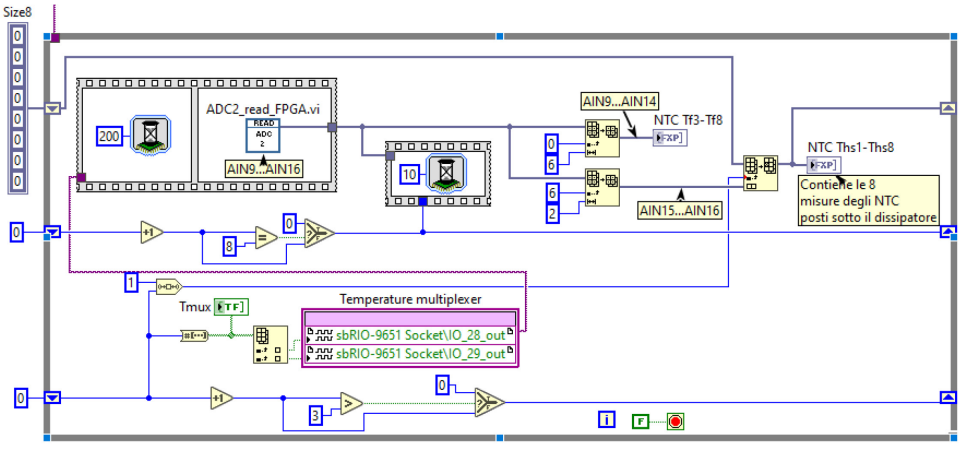


Figura 3 – Schema impianto con le principali misure disponibili (Front Panel LabVIEW).



(a)



(b)

Figura 4 - (a) Codice LabVIEW FPGA per l'acquisizione dei valori di pressione, (b) codice LabVIEW FPGA per l'acquisizione dei valori di temperatura dagli NTC.

4 Prodotti sviluppati

La presente LA ha prodotto risultati sia in termini di hardware che di software. Un banco prova per raffreddamento bifase è stato opportunamente realizzato. Il banco consente di impiegare diversi fluidi e di poter separare o meno la fase vapore dalla fase liquida, consentendo una maggiore flessibilità di impiego. È stata realizzata una scheda di interfacciamento per il controllo di un convertitore statico di potenza industriale e la gestione completa del banco prova per raffreddamento bifase, con layout mostrato in Figura 5, consentendo di acquisire tutti i segnali necessari e di controllare portata del fluido e scambio termico con

l'ambiente o con un sistema esterno. Infine, è stato realizzato il software di controllo completo per il banco prova. Questi, grazie all'impiego dell'ambiente di sviluppo LabVIEW, oltre a consentire una gestione real-time del sistema di raffreddamento, ha consentito il salvataggio dei dati ed il fine-tuning dell'architettura di controllo sviluppata. La vista complessiva del banco prova realizzato è riportato in Figura 6.

Il software di controllo può essere accessibile a qualsiasi utente, poiché sviluppato su piattaforma PED-Board® con web server per diagnostica e controllo remoto. Pertanto, con un semplice browser ed installando le librerie run-time di LabVIEW (freeware) si può facilmente visualizzare l'interfaccia utente, e configurare le operazioni per il funzionamento del sistema di raffreddamento bifase. Dalla stessa interfaccia si può abilitare la regolazione automatica, basata sull'algoritmo appositamente sviluppato, e vedere in tempo reale i vari parametri del sistema come pressioni, portate e temperature.

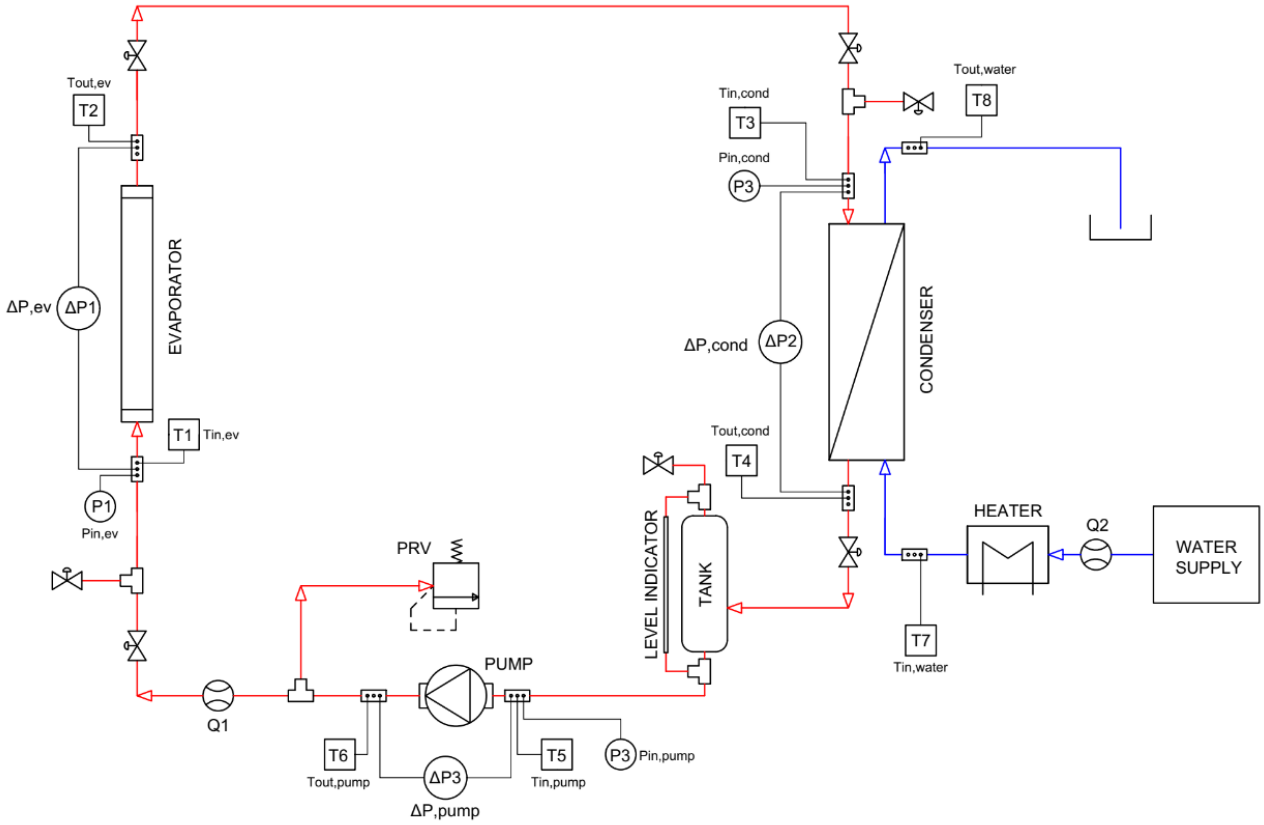


Figura 5 - Layout del banco prova per sistemi di raffreddamento bifase.

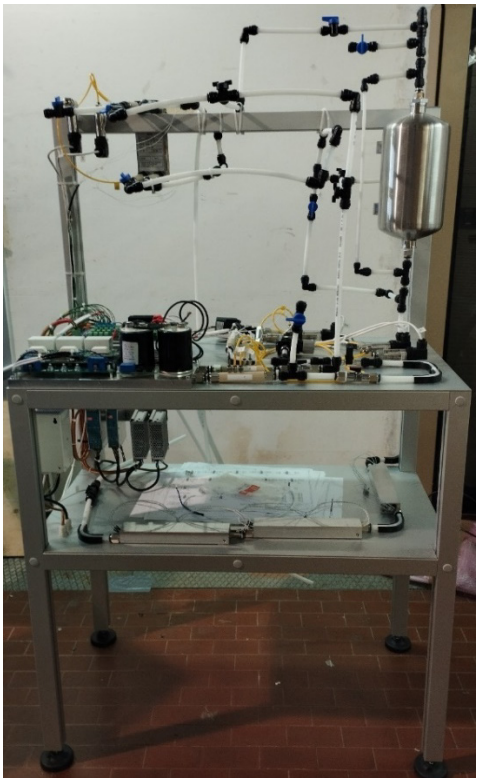


Figura 6 - Vista complessiva del banco prova per raffreddamento bifase (messa in servizio non ultimata).

In Tabella 1 è riportata 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. Mentre, una lista della principale componentistica utilizzata per la realizzazione del banco prova è riportata in Tabella 2.

Tabella 1 – Sensoristica impiegata per il banco prova.

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

Tabella 2 - Principale componentistica per banco prova.

Componente	Modello	Caratteristiche
Evaporatore a microcanali	Custom	Dissipatore per modulo di potenza Semitop 4
Serbatoio (tank)	FESTO CRVZS 5	Pressione di esercizio: 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
Controllo tiristori per cartucce riscaldatore	PR1-E-6KW	Potenza nominale: 6 kW Corrente nominale: 25 A Temperatura max: 65 °C
Cartucce riscaldatore	(RS Pro) Codice: 860-6937	Potenza: 250W Tensione: 220 Vrms 12.5 mm x 100 mm
Riscaldatore acqua circuito secondario	Custom	In alluminio con due cartucce per riscaldatore
Fluido 1 – R245FA		GWP alto
Fluido 2 – R1233ZD		GWP basso
Resina epossidica per sigillatura	Temperature range: -40 ÷ +120°C	Rigidità dielettrica: 12 kV/mm

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Le principali criticità riscontrate hanno riguardato la realizzazione di componentistica meccanica custom, quali l'evaporatore a micro-canali, il riscaldatore per il fluido del circuito secondario ed i porta-sensori impiegati per supportare meccanicamente i trasduttori di pressione e di temperatura. I ritardi di realizzazione sono stati gestiti opportunamente non causando impatti significativi sulle tempistiche del progetto.

6 Sintesi delle attività svolte

La presente Linea di Attività ha riguardato la valutazione delle prestazioni per sistemi di raffreddamento bifase nell'ambito della conversione statica dell'energia elettrica e degli azionamenti elettrici. Pertanto, è stato progettato e realizzato un banco di test dedicato, completo della sensoristica necessaria per la caratterizzazione funzionale e prestazionale. È stata identificata un'idonea scheda di controllo industriale ed è stata progettata e realizzata la specifica scheda di adattamento per l'interfacciamento con la sensoristica presente al banco. È stato quindi sviluppato l'apposito software di gestione e controllo per garantire l'idonea evaporazione del fluido all'interno del sistema di dissipazione. Per la scrittura del codice di controllo è stato usato l'ambiente LabVIEW prodotto dalla National Instruments. L'algoritmo di controllo è stato diviso tra i target disponibili sulla scheda, la parte con timing critico è stata posta su FPGA mentre la parte di analisi gestione dell'interfaccia utente e salvataggio dati è stata posta sul microprocessore. I risultati ottenuti hanno mostrato l'efficacia di questi sistemi nell'asportare il calore prodotto dalle perdite all'interno dei dispositivi. Soprattutto, dai test sperimentali è emerso che sono necessarie portate del fluido molto basse, circa un ordine di grandezza in meno rispetto a quanto richiesto con sistemi convenzionali basati su una miscela di acqua e glicole.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Introduzione

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.

I due fluidi candidati ad essere utilizzati per l'evaporazione all'interno del circuito principale sono l'R-245fa (pentafluoropropano) e l'R-1233zd (trifluoropropano), le cui proprietà principali sono riassunte in Tabella 3.2. Come si vede dalla tabella, entrambi i fluidi hanno caratteristiche tecniche molto simili anche se, per motivi ambientali e di futura reperibilità sul mercato, a parità di prestazioni, si preferirà l'utilizzo dell'R-1233zd per il suo basso GWP (Global Warming Potential) rispetto all'R-245fa. I dati principali sono riportati in Tabella 3.

Compatibilmente con la temperatura ambiente, al di sotto del quale non è possibile raffreddare con un sistema di tipo pumped two-phase, si cercherà di mantenere il modulo IGBT in un range di temperature comprese tra 25 e 70 °C ed il vano batterie in un range compreso tra 15 e 45 °C. Occorrerà dunque, in funzione della temperatura ambiente e delle condizioni operative dell'inverter, regolare la pressurizzazione del circuito in modo da variare la temperatura di saturazione del fluido refrigerante e fare in modo che i gradienti di temperatura siano tali da far avvenire la sua evaporazione.

Tabella 3 - 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/m3
Densità del vapore a 25 °C	8.55 kg/m3
GWP	1030
R-1233zd (Trifluoropropano)	
Punto di ebollizione a 1 atm	18.3 °C
Temperatura critica	165.5 °C
Pressione critica	35.7 bar
Densità del liquido a 0 °C	1321.3 kg/m3
Densità del vapore a 25 °C	7.2 kg/m3
GWP	1

7.2 Progettazione e realizzazione di un banco prova per Two-Phase Cooling

In questa sezione si descriverà limitatamente ai caratteri a disposizione la fase di progettazione preliminare del banco prova. Tale fase si è composta essenzialmente di due step: il primo ha riguardato sulla base delle

specifiche di progetto, la scelta dei componenti commerciali e la realizzazione di alcuni componenti ad hoc necessari per la realizzazione industriale. Successivamente, per guidare l'azienda esterna nell'assemblaggio, è stato realizzato un modello 3D dell'intero sistema attraverso il software CAD Autodesk Fusion 360®.

Dopo aver individuato i componenti che andranno a costituire il circuito di raffreddamento, si è ragionato su come posizionarli su un piano di lavoro per realizzare un vero e proprio banco prova. A tale scopo, è stato realizzato un modello CAD dell'intero sistema che mostra il posizionamento dei componenti e degli elementi di collegamento.

In Figura 7 è riportata una panoramica del banco prova realizzato al CAD. Si tratta di una struttura costituita da profilati in acciaio a sezione quadrata da 50 x 50 mm. Si è scelto di posizionare i componenti relativi al circuito evaporativo nella parte superiore del banco, per essere più facilmente accessibili dall'operatore che effettuerà le prove. Al piano inferiore invece, è stato posizionato il circuito di raffreddamento del condensatore e i relativi riscaldatori per l'acqua.

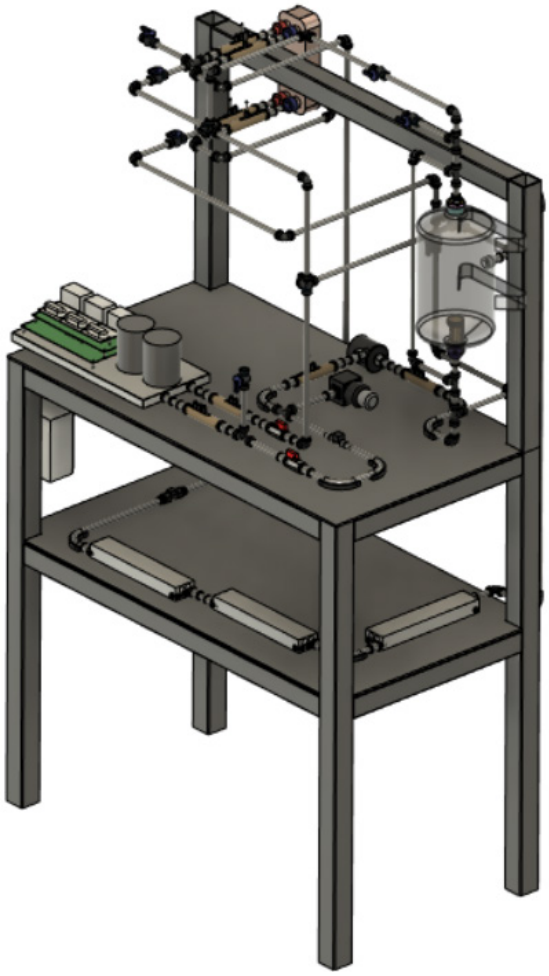


Figura 7 - Modello 3D del banco prova realizzato al CAD.

Il posizionamento dei componenti relativi al circuito evaporativo è intuibile dalla vista riportata in Figura 8. Oltre agli assiemi con i relativi alloggiamenti per i sensori, sono presenti le valvole di intercettazione che consentono l'eventuale smontaggio dei componenti. Come spiegato in precedenza, queste valvole hanno la funzione di isolare i settori relativi all'evaporatore o al condensatore per permettere il loro svuotamento attraverso una pompa da vuoto. Questo consentirebbe, in caso di necessità, di sostituire un componente o uno dei sensori. Oltre alle valvole di intercettazione, è anche presente una valvola limitatrice di pressione, posta a valle della pompa.

Per permettere l'acquisizione delle grandezze di ingresso-uscita da ognuno dei componenti: evaporatore, pompa e condensatore, sono stati posizionati gli alloggiamenti per i sensori a monte e a valle di questi. Vi sono inoltre due misuratori di portata, uno a valle della pompa e uno a monte dei riscaldatori. Questi permettono di conoscere la portata istantanea del fluido che circola nei due circuiti.
Una vista frontale in dettaglio del banco di test è mostrata in Figura 9 dove si possono individuare al piano inferiore i preriscaldatori per il circuito secondario, e al piano superiore sia l'inverter in prova che le canalizzazioni idrauliche. La Tabella 4 riporta quantità e designator dei sensori impiegati ed installati sul banco di test.

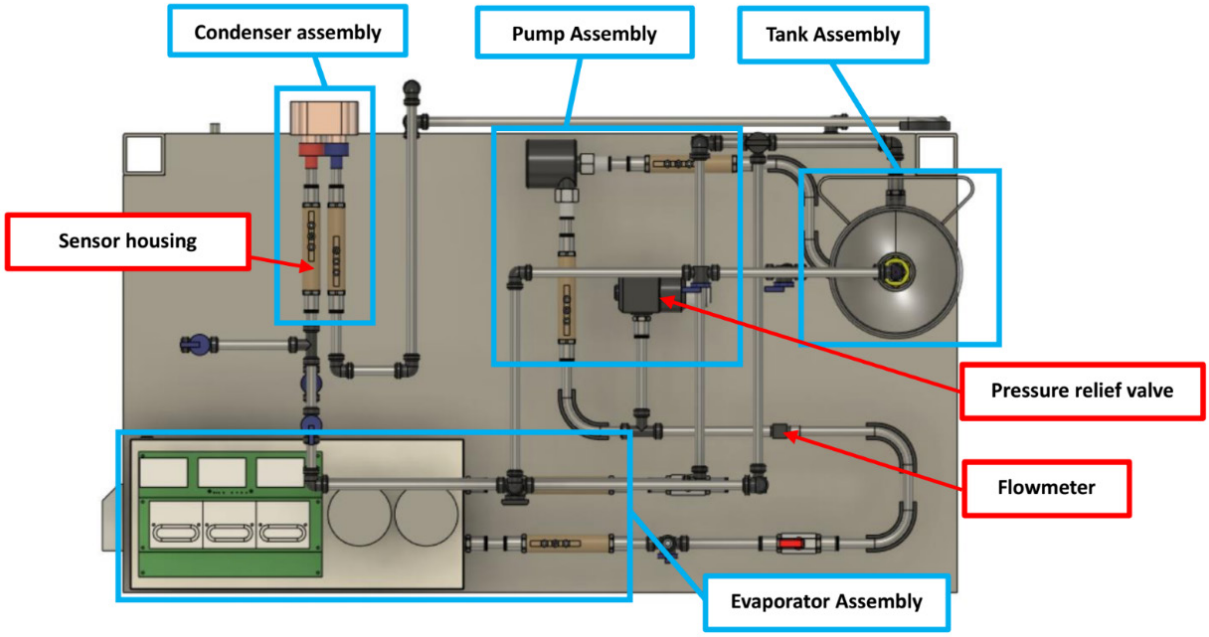


Figura 8 - Vista del piano superiore del banco prova.

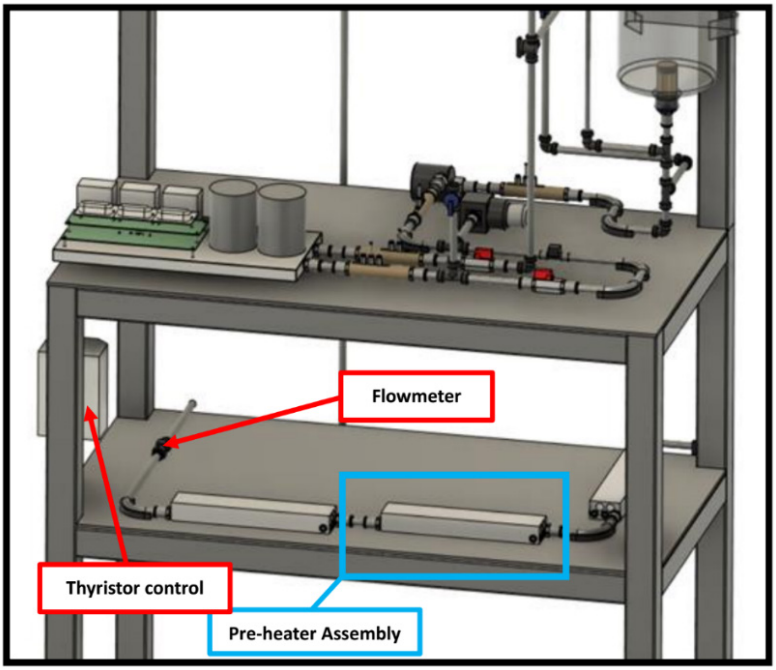


Figura 9 - Vista del piano inferiore del banco prova.

Tabella 4 – Caratteristiche e designator dei trasduttori utilizzati.

Trasduttore	Caratteristiche	Quantità	Indicatore
Misuratore portata (fluido evaporativo) GEM FT -210	Range: da 0,1 a 2.5 l/min Output: 37-917Hz	1	Q1
Misuratore portata (acqua) GEM FT-110	Range da 0,5 to 5 l/min Output: 58-575 Hz	1	Q2
Trasduttore di pressione assoluta GE-UNIK 5000 PTX5072 TC-A2-CA-H0-PA	Range: da 0 a 5,0 bar Output: 4-20 mA	3	P1, P2, P3
Trasduttore di pressione differenziale GE-UNIK 5000 PTX5072-TC-A3-CB-H0-PA	Pressure range: da 0 a 350 mbar Output: 4-20 mA	3	ΔP1, ΔP2, ΔP3,
Termistore NTC immersione fluido TE Connectivity, GA10K3MBD1	Resistenza 10 kΩ a 25°C Temp. Range da -40 a +125 °C	8	T1, …T8

Per il controllo dell'azionamento elettrico di trazione 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 10, 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®.

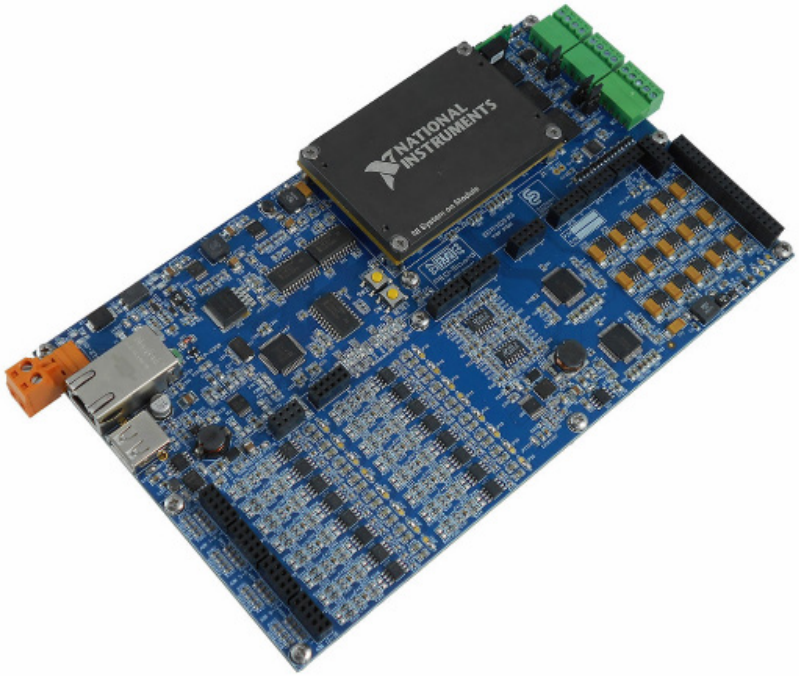


Figura 10 - Piattaforma di controllo PED-Board V4.

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. Il layout della scheda di interfacciamento poi realizzata è mostrato in Figura 11 dove la serigrafia sul top-layer mostra le funzionalità delle varie parti. L'Adapter Board 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 12 mostra la scheda di adattamento realizzata ed assemblata.

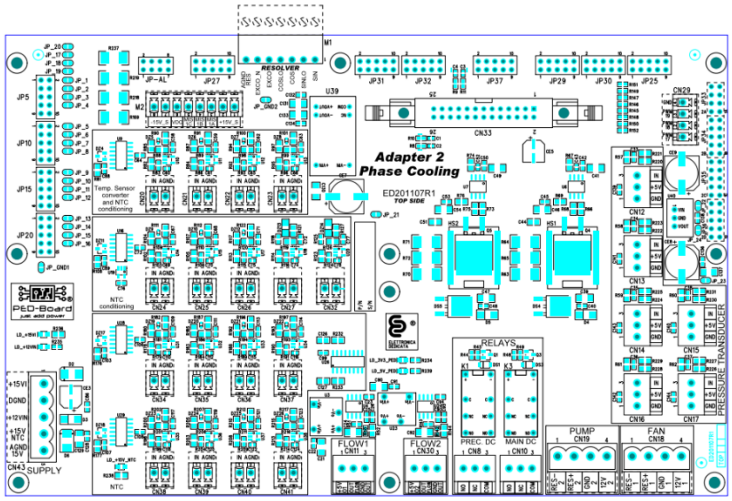


Figura 11 - Layout dell'Adapter Board di interfaccia.

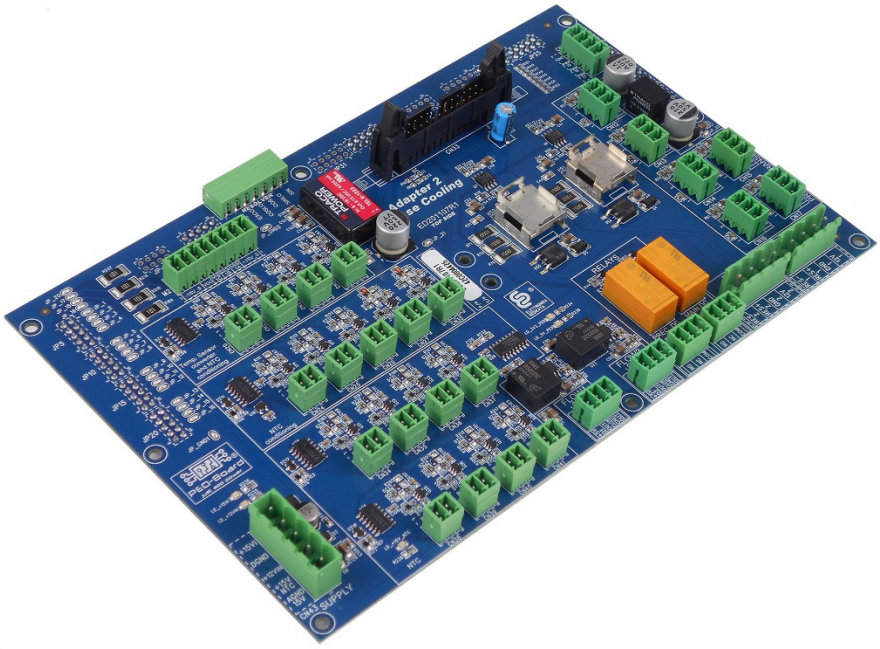


Figura 12 - Scheda di adattamento realizzata ed assemblata.

In Tabella 5 sono infine riportate le caratteristiche di alimentazione e output dei trasduttori ed il canale di interfacciamento sull'Adapter Board, che effettua il routing direttamente sull'FPGA presente nella scheda di controllo.

Tabella 5 – Interfacciamento tra sensoristica e scheda di controllo.

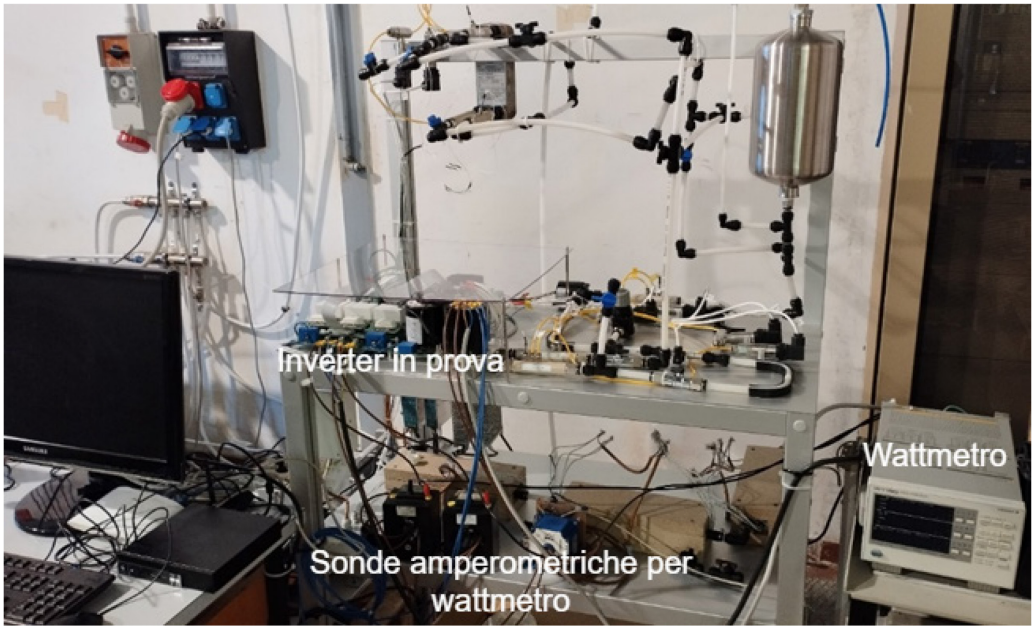
		Output	Adapter-Board Channel
Inverter	Modulo IGBT (6 switch)	PWM	PWM1, PWM2 PWM3, PWM4 PWM5, PWM6
	Correnti di fase (I_a,I_b,I_c)	Corrente	AIN1, AIN2 AIN3
	Tensione DC-link	Tensione	AIN7
	Termistore NTC (integrato)	Ω	AIN4
Trasduttori	Flowmeter	Frequenza	I/O 14 I/O 15
	Trasduttori di pressione assoluta	Corrente	AIN19, AIN20 AIN21
	Trasduttori di pressione differenziale	Corrente	AIN22, AIN23 AIN24
	Termistori NTC (circuito)	Ω	AIN5, AIN6, AIN9 AIN10, AIN11, AIN12 AIN13, AIN14
Sottosistemi	Ventola	PWM	PWM14
	Pompa centrifuga	PWM	PWM15

1. **Realizzazione dello schema idraulico in base alle specifiche**
2. **Scelta dei componenti commerciali e realizzazioni "custom made"**
3. **Creazione di un modello 3D e degli schemi di assemblaggio**
4. **Integrazione della sensoristica col sistema di acquisizione**

Figura 13 - Assemblaggio del banco prova per raffreddamento bifase.

La Figura 13 riassume le varie fasi progettuali che hanno portato alla definizione di un progetto esecutivo che ha consentito la realizzazione del banco prova mostrato durante la sua fase di assemblaggio presso una azienda esterna.

Successivamente, in Figura 14a e in Figura 14b sono mostrate due immagini del sistema completo dove si può notare oltre al banco di test, il wattmetro per la stima delle perdite del device under test, gli alimentatori e le due macchine elettriche sincrone in accoppiamento diretto, una collegata all'inverter in prova, mentre la seconda ad un secondo inverter che ha consentito di poter caricare opportunamente il primo durante i test.



(a)

(b)

Figura 14 – Viste dell'impianto completamente realizzato ed installato presso il Centro Ricerche ENEA della Casaccia.

7.3 Software di acquisizione e controllo

Il software di controllo e acquisizione è stato realizzato in LabVIEW. I task necessari sono stati divisi tra i due target disponibili: µProcessore e FPGA. L'FPGA è responsabile dell'acquisizione delle misure analogiche di temperatura e pressione, dell'acquisizione dei segnali digitali per la valutazione delle portate, nonché del controllo della velocità della pompa e della potenza termica del circuito di preriscaldamento secondario. Il µProcessore ha compiti volti ad una opportuna conversione delle misure trasferite dall'FPGA sottoforma di dati grezzi, della loro visualizzazione e memorizzazione della gestione dell'interfaccia utente ed infine di coordinare le varie operazioni per la gestione automatica del sistema di raffreddamento che è stata affidata al target Real-Time (i.e. il microprocessore) lasciando all'FPGA i compiti temporalmente più critici. La Figura 15 mostra una delle schermate per la gestione ed il monitoraggio sia dell'inverter in prova che del sistema di raffreddamento bifase. Lo scope presente nel main tab è sincrono con l'FPGA, mostrando ogni campione che viene acquisito. Il monitoraggio in tempo reale delle grandezze di impianto è possibile tramite il pannello mostrato in Figura 16 che riporta anche la posizione delle varie misure relativamente all'allestimento. La configurazione, l'impostazione delle protezioni, l'abilitazione o lo spegnimento di specifiche funzionalità sono mostrate nel tab relativo riportato in Figura 17.

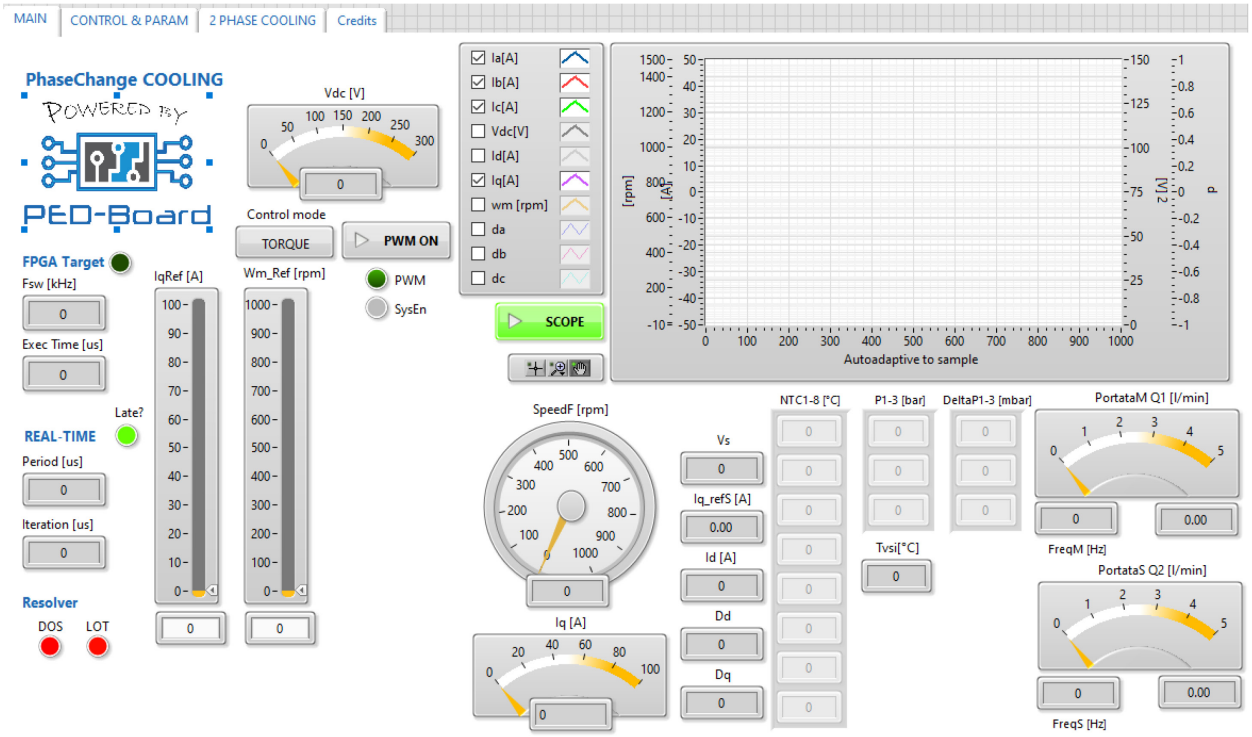


Figura 15 – Main tab dal Front Panel LabVIEW del software di acquisizione e controllo.

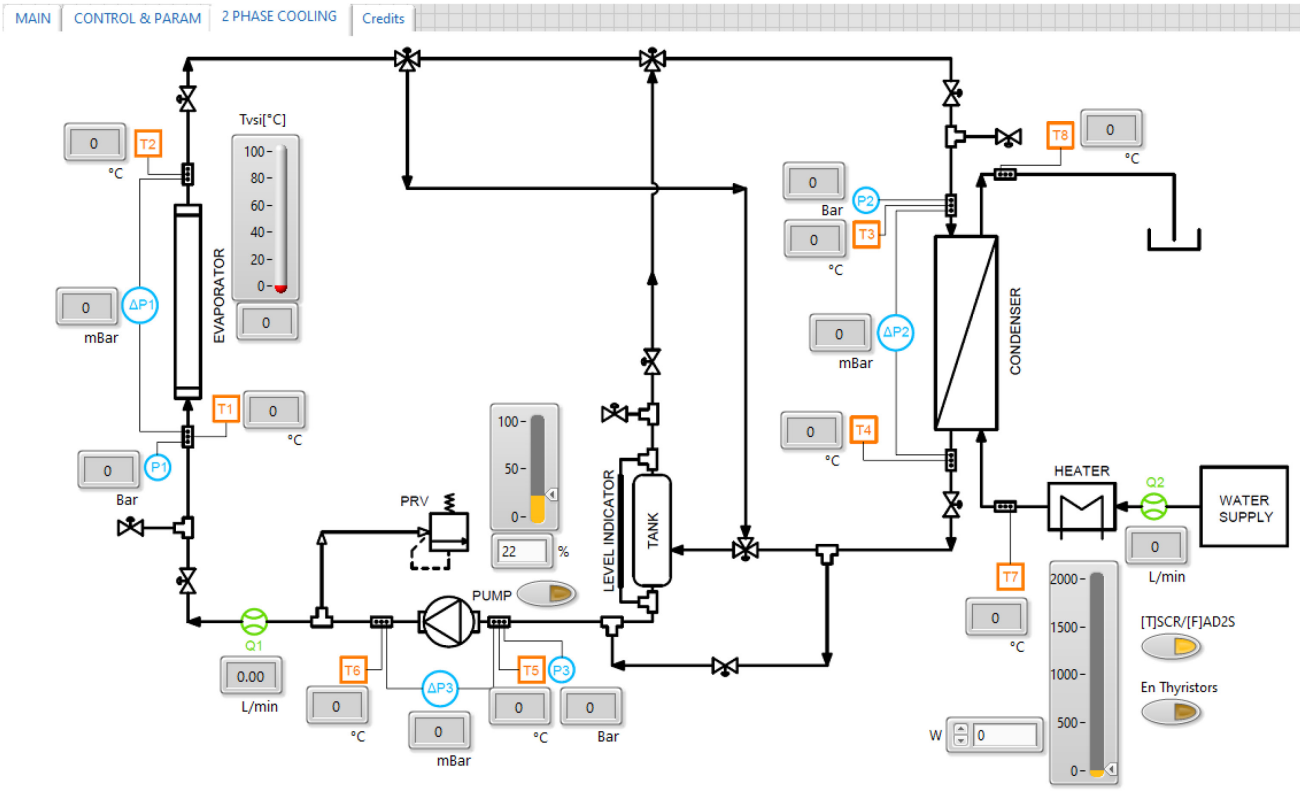


Figura 16 – 2-Phase Cooling tab dal Front Panel LabVIEW relativo al software di acquisizione e controllo.

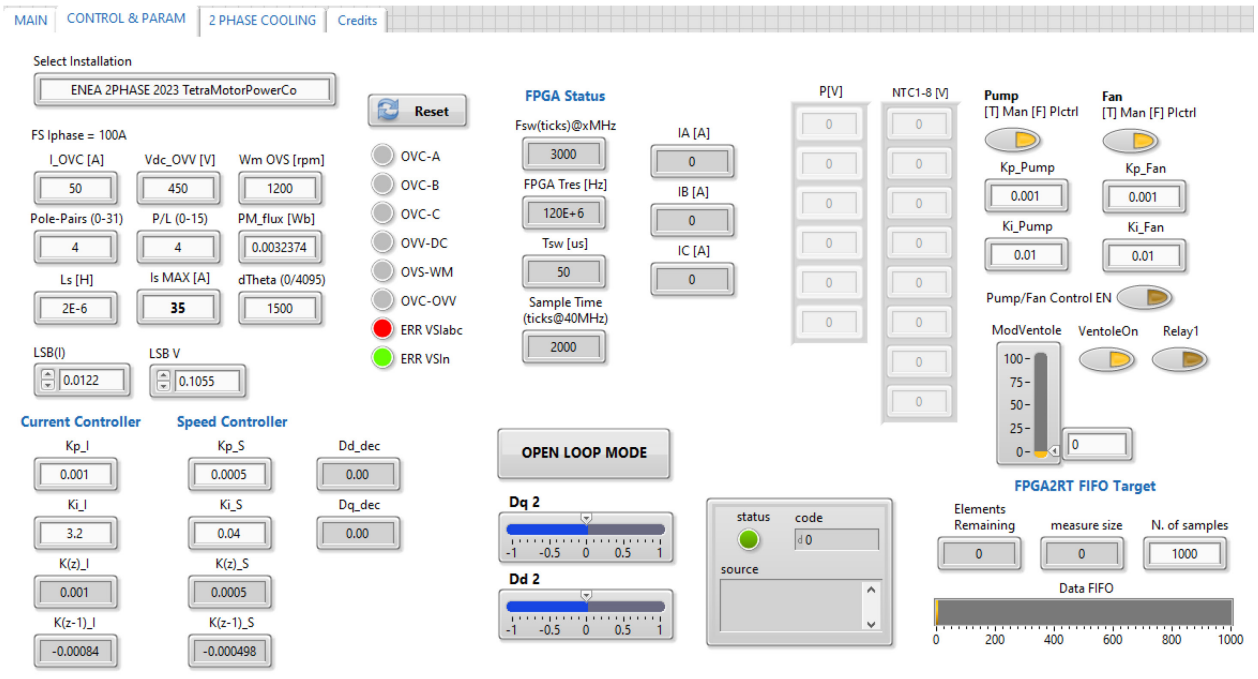


Figura 17 – Control & Parameters tab del Front Panel LabVIEW per software di acquisizione e controllo.

7.4 Risultati sperimentali (fluido R-245fa)

La Figura 18 mostra il transitorio termico di primo riscaldamento dell'inverter trifase. La corrente di uscita è stata regolata a circa 20 A RMS, mentre la tensione del DC-bus è stata mantenuta costante per mezzo di una

serie di alimentatori a circa 400 V. La frequenza di switching dell'inverter è stata impostata a 20 kHz. Le perdite complessive misurate tramite wattmetro in inserzione Aron lato AC e Volt-Amperometrico lato DC, sono pari a circa 450 W. La pompa al 22% della potenza ha consentito di innescare l'evaporazione del fluido di raffreddamento consentendo di ottenere un regime termico di circa 38 °C.

La portata del fluido di raffreddamento in ingresso al dissipatore dell'inverter era pari a 0.52 l/min. Portate di questo tipo sono praticamente impossibili con sistemi di raffreddamento tradizionali acqua-glicole, dove si lavora mediamente con portate di un ordine di grandezza maggiori fino ai circa 10…12 l/min.

La Figura 19 mostra l'andamento termico che si ottiene con perdite costanti e pari a circa 450W, quando viene variata la portata del fluido di raffreddamento. Dopo un regime termico ottenuto con una portata decisamente modesta parti a circa 0.55 l/min, la portata è stata aumentata agendo sulla pompa fino ad arrivare appena oltre i 3 l/min. Successivamente la portata del fluido di raffreddamento è stata diminuita con conseguente aumento della temperatura dell'inverter. Si potrà notare che poco prima dei 500 s, in presenza di una portata modesta, la temperatura dell'inverter presenta una variazione marcata con pendenza negativa, tipica dell'inizio del funzionamento del sistema in bifase. Pertanto, si può concludere che prima di tale tempo e quindi per portate maggiori, il sistema stesse operando in modalità prevalente a fase singola come 'liquid cooling' e non in bifase.

Il confronto tra diversi transitori di primo riscaldamento è riportato in Figura 20. Ogni test è partito con il sistema in regime termico con l'ambiente. Inoltre, la temperatura e la portata del fluido nel circuito secondario è stata mantenuta costante e pari rispettivamente a circa 3.2 l/min e 20 °C. Mentre, le portate del fluido refrigerante all'interno del dissipatore dell'inverter sono state variate dal valore inferiore di 0.5 l/min al valore massimo di 3.2 l/min. Si può vedere come ad un aumento di portata non corrisponda necessariamente una diminuzione della temperatura di regime termico. Si noterà inoltre come la curva ottenuta a 0.5 l/min mostri chiaramente l'innesco del passaggio da raffreddamento a singola fase al sistema bifase, che causa una brusca diminuzione della temperatura dell'inverter, dimostrandosi inoltre, la soluzione più efficace tendendo ad una temperatura di regime inferiore agli altri casi. Questo, unitamente al fatto che la potenza impiegata dalla pompa, portata per pressione, è nettamente inferiore agli altri casi.

La Figura 21 mostra l'andamento della temperatura dell'inverter al variare della portata del fluido di raffreddamento. Il fluido del circuito secondario è stato posto a circa 26.5 °C. Si può notare come non necessariamente ad un aumento della portata del fluido corrisponda una riduzione della temperatura operativa dell'inverter. Questo perché l'aumento di portata può portare ad una riduzione della fase vapore facendo tendere il sistema di raffreddamento alla modalità single-phase.

La Figura 22 riporta la temperatura dell'inverter al variare della portata del fluido 2-phase e per tre diverse temperature del fluido secondario. La temperatura del fluido secondario è stata variata agendo sul riscaldatore a tiristori presente sul banco di test realizzato. Si può vedere come la temperatura dell'inverter non dipenda essenzialmente dalla portata del fluido di raffreddamento grazie alla presenza delle due fasi.

La Figura 23 mostra la temperatura del fluido di raffreddamento misurata in ingresso ed in uscita dallo scambiatore dell'inverter per tre diversi valori di portata, rispettivamente 0.5 l/min, 1 l/min e 1.5 l/min. Le curve sono state ottenute per diversi valori delle perdite associate all'inverter. Si può notare come la temperatura ingresso-uscita del fluido si mantenga pressoché costante al variare della potenza termica.

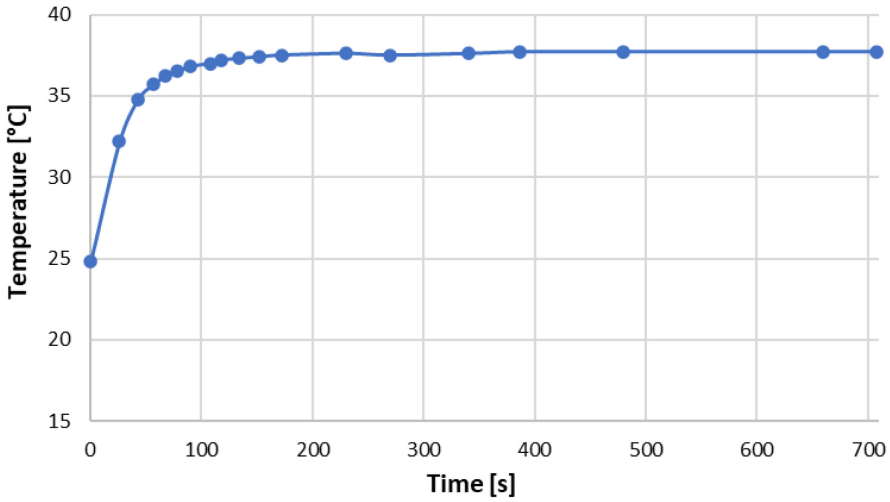


Figura 18 – Andamento della temperatura dell'inverter per perdite complessive pari 450W e portata del fluido refrigerante (R-245fa) a circa 0.52 litri/min. Temperatura fluido circuito secondario circa 20 °C.

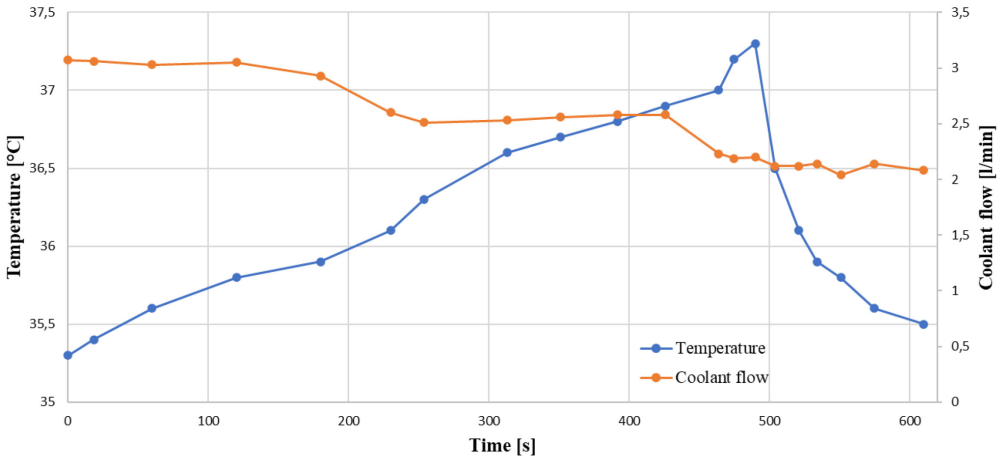


Figura 19 – Temperatura dell'inverter e portata del fluido di raffreddamento per perdite complessive pari a circa 450 W.

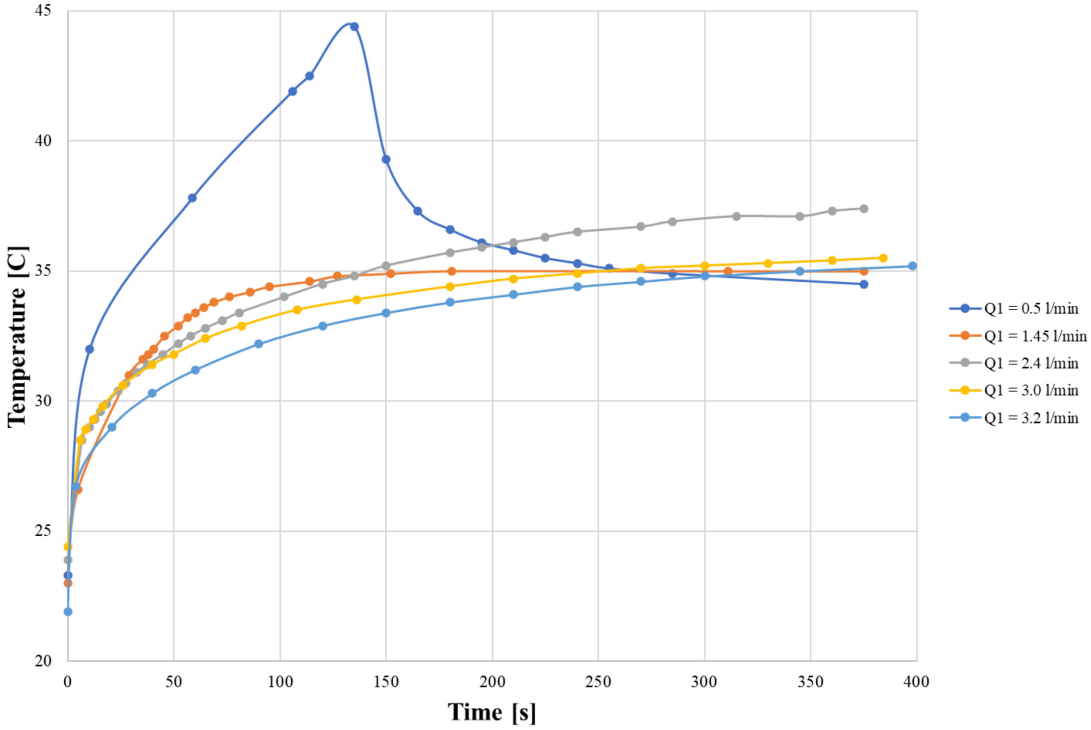


Figura 20 – Transitorio di primo riscaldamento e valori a regime per diverse portate del fluido di raffreddamento.

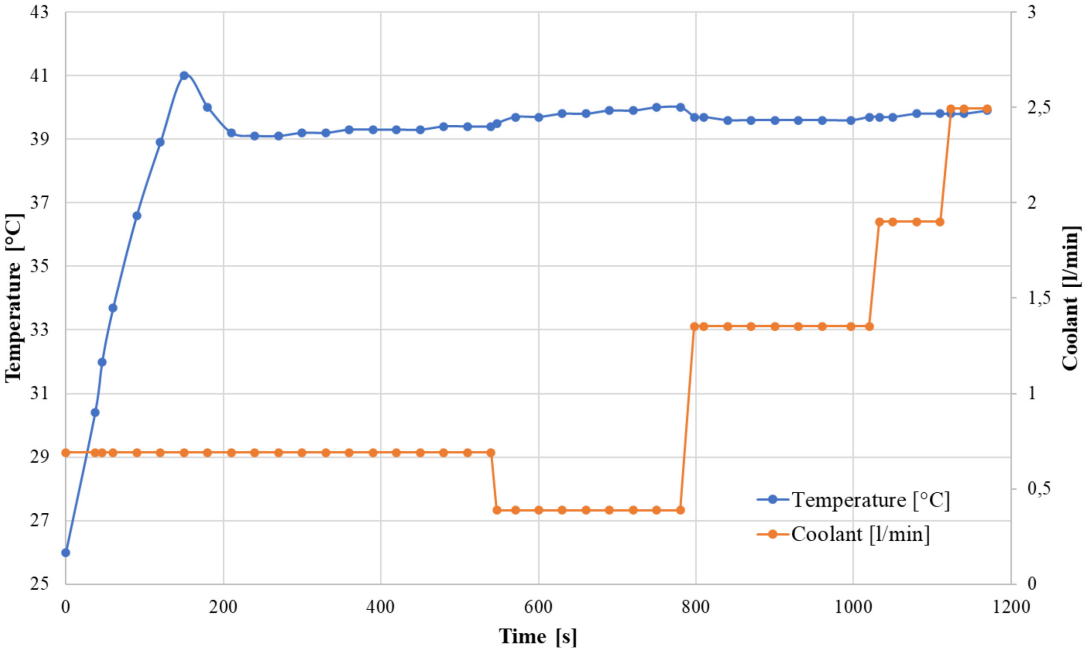


Figura 21 - Andamento temperatura inverter rispetto al tempo e al variare della portata del fluido.

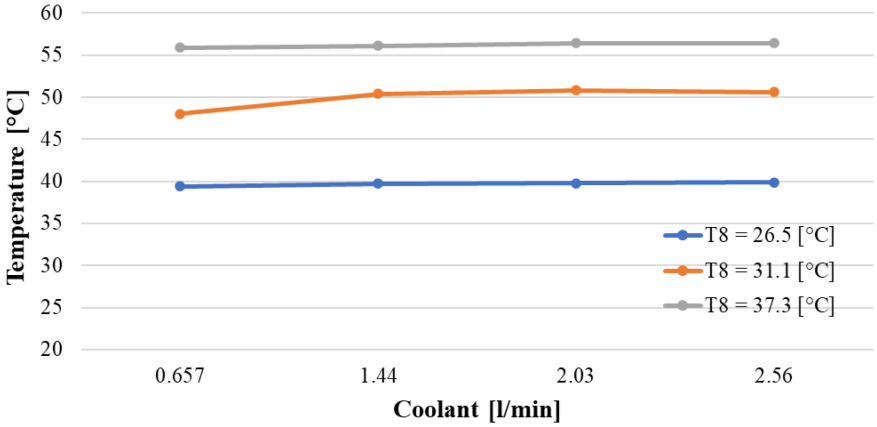
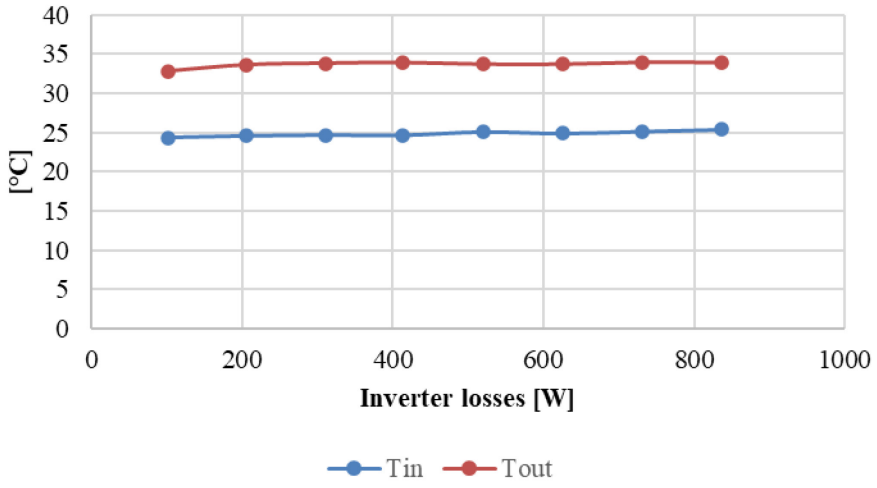
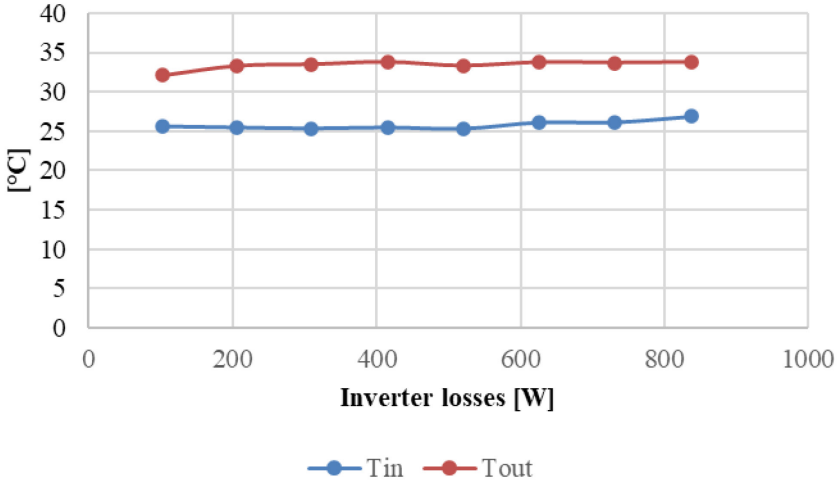


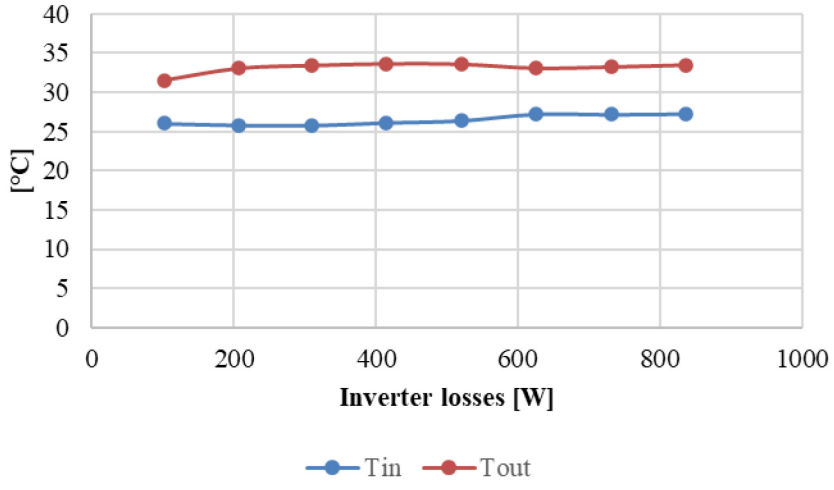
Figura 22 - Temperatura dell'inverter al variare della portata del fluido primario e per differenti temperature del fluido secondario (T8).



(a)



(b)



(c)

Figura 23 – Andamento della temperatura del fluido di raffreddamento in ingresso e in uscita dallo scambiatore dell'inverter, per tre diverse portate.

7.5 Risultati sperimentali (fluido R-1233zd)

Il secondo fluido impiegato è stato l'R-1233zd, questo, grazie al suo minore 'impatto ambientale', viene accettato più facilmente. Sono stati eseguiti test analoghi a quanto già illustrato per l'R-245fa ed i risultati sono mostrati nella seguente figura in relazione al transitorio di primo riscaldamento e valori a regime. La Figura 24 mostra per il fluido R-1233zd i risultati che sono stati ottenuti per il transitorio di riscaldamento e l'andamento a regime termico, cercando di replicare nella maniera più fedele quanto fatto ed esposto in Figura 20, come ad esempio gli istanti di lettura, la temperatura di partenza, etc…

Come si può vedere, anche per il secondo fluido in prova, i risultati sono stati molto incoraggianti e del tutto simili a quelli ottenuti per il primo fluido. Pertanto, avendo l'R-1233zd un GWP di circa tre ordini di grandezza inferiore rispetto al R245fa, sarebbe preferibile l'impiego di quest'ultimo al fine di ridurre l'impatto complessivo nell'adozione di questa tecnologia di raffreddamento. Ulteriori risultati sono stati omessi non mostrando particolari differenze rispetto all'R-245fa.

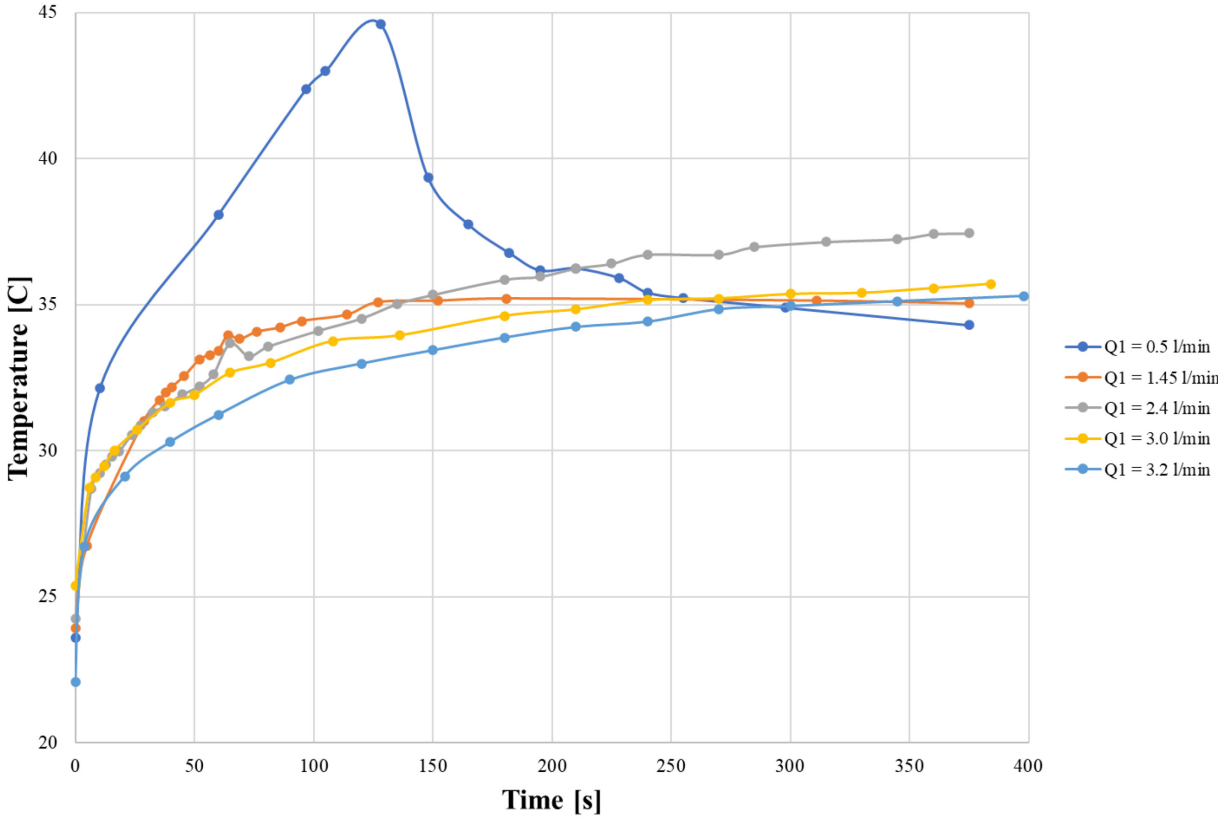


Figura 24 - Transitorio di primo riscaldamento e valori a regime per diverse portate del fluido di raffreddamento.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

L'attività proposta non ha usufruito di consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

F. Riccardi, L. Saraceno, L. Gugliermetti, F. Ortenzi, G. Caruso, G. Zummo, M. Di Benedetto, A. Lidozzi, “Performance Analysis of Liquid Cooling and Two-Phase Flow Cooling for Thermal Management of Power Electronics Systems,” PCIM Conference 2024, under review.

N. Basquera, A. Lidozzi, G. Zummo, L. Saraceno, F. Riccardi, F. Ortenzi, M. di Benedetto, L. Solero, “Two-Phase Cooling for Advanced Power Electronics Converters,” to be submitted for publication to IEEE Open Journal of Industry Applications.

10 Eventi di disseminazione

La partecipazione alla conferenza ed exhibition Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe) è prevista per giugno 2024 a Norimberga.