



## Ricerca di Sistema elettrico

Contributo alla sperimentazione di un  
controllo termico bi-fase per veicoli  
elettrici: predisposizione dell'auto  
elettrica sperimentale all'integrazione del  
dispositivo di controllo termico bifase

Alessandro Lidozzi, Luca Solero, Luca Bigarelli

CONTRIBUTO ALLA SPERIMENTAZIONE DI UN CONTROLLO TERMICO BI-FASE PER VEICOLI ELETTRICI:  
PREDISPOSIZIONE DELL'AUTO ELETTRICA SPERIMENTALE ALL'INTEGRAZIONE DEL DISPOSITIVO DI CONTROLLO  
TERMICO BIFASE

Alessandro Lidozzi, Luca Solero, Luca Bigarelli (Università degli Studi ROMA TRE)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Innovazioni tecnologiche e modellistiche per la mobilità elettrica urbana

Work package: Mobilità

Linea di attività: 2.9 - *Predisposizione dell'auto elettrica sperimentale all'integrazione del dispositivo di controllo termico bifase*

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Contributo alla sperimentazione di un controllo termico bi-fase per veicoli elettrici (LA2.9)"

Responsabile scientifico ENEA: Fernando Orteni

Responsabile scientifico Università degli Studi ROMA TRE: Alessandro Lidozzi

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 PIATTAFORMA, SOFTWARE DI CONTROLLO E INVERTER DI TRAZIONE.....	6
2.2 PCB DI INTERFACCIA E ACQUISIZIONE MISURE.....	8
2.3 SOTTOSISTEMI A BORDO DEL VEICOLO.....	11
2.4 SOFTWARE DI CONTROLLO.....	12
2.5 RISULTATI SPERIMENTALI.....	12
3 APPENDICE.....	15

## Sommario

La presente attività, che si inserisce nella seconda annualità del piano triennale, è inerente ai sistemi di raffreddamento innovativi a cambiamento di fase nell'ambito degli azionamenti elettrici per applicazioni di trazione.

Verrà dimensionato, progettato e realizzato un azionamento elettrico ad alta efficienza per la movimentazione di microcar elettriche. Pertanto, si procederà alla scelta dei componenti elettronici di potenza, della piattaforma di controllo e del tool di sviluppo, definendo infine le specifiche di assemblaggio.

Il sistema di raffreddamento sarà compatibile con le specifiche del *dispositivo di controllo termico bifase*.

Il software di controllo verrà appositamente sviluppato per soddisfare le specifiche necessità dettate dalla campagna di test sul dispositivo prototipale. Questo dovrà soddisfare le particolarità relative alla regolazione della temperatura dei componenti elettronici, dell'accumulo elettrochimico e della macchina elettrica di trazione.

Verrà inoltre predisposta una apposita interfaccia di comunicazione con l'esterno per il trasferimento tempo-reale dei dati di funzionamento: velocità, coppia, temperature, pressioni, portate del fluido e i dati sull'accelerazione del veicolo.

I risultati attesi dalla presente attività saranno presenti a valle delle verifiche sperimentali. Si procederà quindi alla realizzazione di un azionamento elettrico completo per applicazioni di trazione con raffreddamento bifase. Il sistema di raffreddamento verrà caratterizzato durante diverse condizioni operative dell'azionamento elettrico di trazione. Verrà inoltre effettuato un confronto prestazionale rispetto al raffreddamento standard con liquido a ricircolo.

Il powertrain fornirà via collegamento di rete o bus di campo tutte le informazioni elettriche e meccaniche, nonché termiche relative allo stato di funzionamento consentendo un monitoraggio costante durante l'esecuzione delle varie prove.

## 1 Introduzione

La presente attività si inquadra all'interno di un insieme più vasto di attività il cui obiettivo è la progettazione e sperimentazione di tecnologie veicolari ed impiantistiche, per il raffreddamento di azionamenti elettrici per trazione con fluidi a cambiamento di fase.

L'impegno ha riguardato l'ammmodernamento di un veicolo di proprietà ENEA in modo che potesse ospitare e gestire un sistema di raffreddamento innovativo di tipo bifase. È stata aggiornata la piattaforma di controllo dell'azionamento e sono state integrate sulla scheda di controllo tutte le sezioni dedicate all'acquisizione delle misure di impianto ed alla gestione delle ventole e pompe per lo scambio termico.

Pertanto, sono state inizialmente redatte delle specifiche di progetto e definito quindi un progetto esecutivo per i diversi attori componenti il sistema, la scheda di controllo industriale, la scheda per il suo interfacciamento verso il veicolo (inverter, trasduttori, teleruttori, etc...), la tipologia delle misure da acquisire e quindi la scelta dei trasduttori, ed infine i sottosistemi da pilotare, come pompe e ventole.

L'attività progettuale ha anche riguardato, ad un livello più elevato, l'intero impianto a bordo del veicolo, dall'accumulatore elettrochimico, all'inverter di trazione. L'individuazione di un algoritmo di controllo opportuno e la sua codifica in base alle caratteristiche della piattaforma di controllo sono state parti integranti la presente annualità.

Il progetto esecutivo e completo delle varie parti, ad esclusione del software di controllo, è stato fornito poi ad azienda esterna per la realizzazione industriale.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

In questa sezione si riporta la descrizione delle attività svolte e degli output prodotti. L'allestimento del veicolo elettrico per poter utilizzare sistemi di raffreddamento bifase ha comportato diverse fasi che verranno illustrate nei vari paragrafi del presente report.

La prima parte delle specifiche ha riguardato l'individuazione delle misure necessarie alla caratterizzazione del raffreddamento a cambiamento di fase. La Tabella 1 riassume la tipologia e le principali caratteristiche dei sensori che sono stati installati a bordo del veicolo per la verifica sperimentale del sistema di raffreddamento proposto. La progettazione dedicata di una scheda di interfacciamento terrà conto delle caratteristiche proprie di questi elementi, come verrà illustrato nel seguito del presente report.

**Tabella 1 – Caratteristiche riassuntive dei sensori installati a bordo del veicolo**

Sensore	Modello	Range	Alimentazione	Output	Quantità
Misuratore di portata	GEM FT110	0,5 – 5 l/min	5-24 V/ 8 mA	58-575 Hz (impulsi)	1
Sensore di pressione	PX3 Series Honeywell Metri-Pack 150	0-10 bar	5 V±0. 25 V	0.5-4.5 V	6
Sensore di temperatura	NTC 10 kOhm TE Connectivity GA10K3MBD1	-40°C to +125°C	5 V/2 mA	Condizionamento con circuito dedicato	9
Accelerometro triassiale	LSM6DSM		3.3 V/5 mA	Comunicazione tramite bus SPI	1

A bordo del veicolo saranno presenti, inoltre, una pompa a 12 V e consumo di circa 34W per la circolazione del fluido di raffreddamento che verrà regolata in logica PWM, e due ventole sempre a 12 V con consumo di circa 30 W ciascuna, anch'esse controllate in logica PWM in base alle condizioni operative determinate dalle varie misurazioni.

Uno scheda relativo all'allestimento del veicolo è riassunto in Figura 1. I vari componenti sono stati suddivisi in due box isolati posizionati sul pianale del veicolo stesso. Al loro interno trovano spazio la scheda di controllo e la scheda di interfaccia verso la sensoristica, gli alimentatori necessari sia per i sensori che per la parte di controllo e per l'inverter, i teleruttori in DC di manovra ed infine, i fusibili di protezione. Alcuni pulsanti di comando e protezione verranno posti sul Box 1 per l'eventuale attuazione manuale da parte dell'operatore.

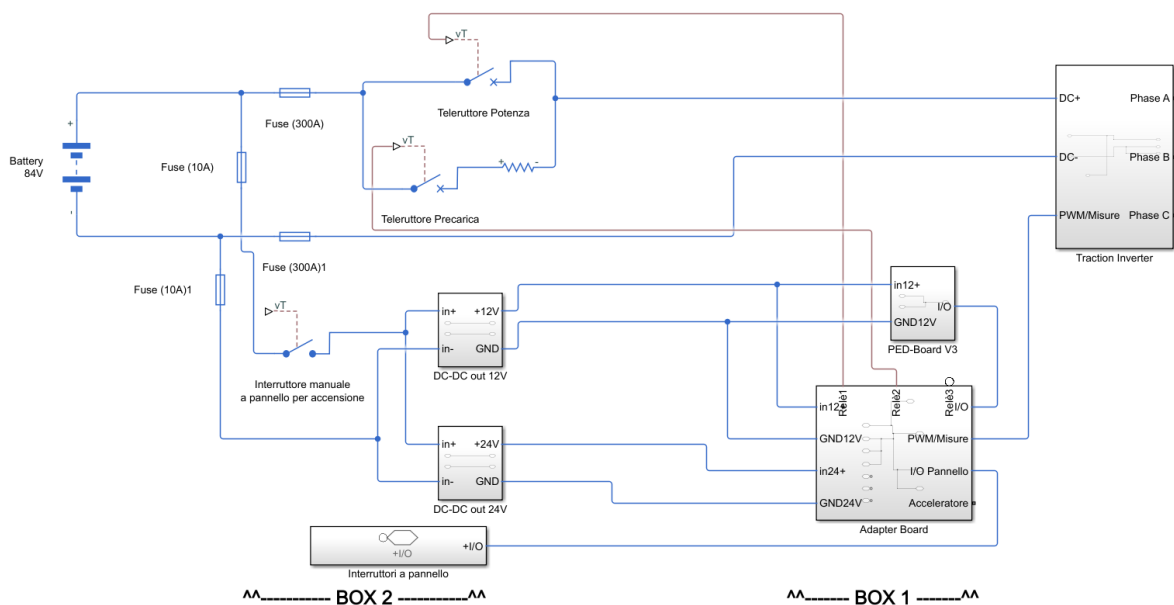


Figura 1. Schema elettrico semplificato per il sistema veicolo.

## 2.1 Piattaforma, software di controllo e inverter di trazione

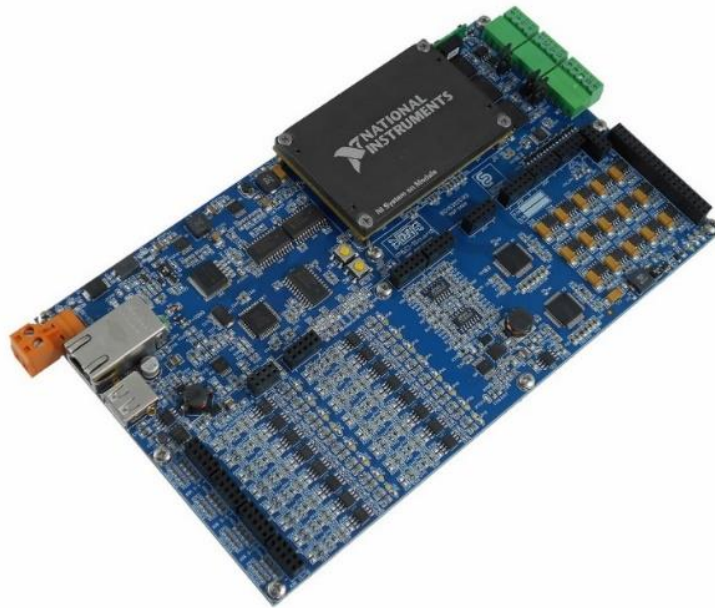
Per il controllo dell'azionamento elettrico di trazione, per l'acquisizione dei vari dati e la loro trasmissione remota, è stata scelta una piattaforma in grado di poter gestire gli apparati di conversione statica, dotata quindi della capacità di acquisizione di segnali analogici come le misure e di disponibilità di uscite digitali per controlli PWM. Inoltre, per la specifica applicazione ulteriori requisiti sono stati la possibilità di integrare una interfaccia grafica per l'utente e la disponibilità di bus di comunicazione industriale necessari per far interagire i vari sottosistemi. La scelta, quindi, è ricaduta sulla scheda PED-Board<sup>®</sup> mostrata in Figura 2, 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<sup>®</sup>.

Pertanto, l'algoritmo di controllo è stato diviso tra i due target disponibili,  $\mu P$  e FPGA. Gli anelli di regolazione e le protezioni sono stati implementati su FPGA, mentre la macchina stati, la struttura di comunicazione e l'interfaccia grafica sono stati fatti eseguire al microprocessore.

L'interfacciamento della scheda di controllo, con i vari sistemi presenti a bordo veicolo e con i vari trasduttori di misura, è stato possibile grazie alla realizzazione di una PCB di interfaccia dedicata alla specifica applicazione oggetto di questa annualità.

L'inverter di trazione è basato su un modulo IPM della Semikron modello SKAI-5001MD15, Figura 3. Al suo interno si trovano i dispositivi MOSFET da 150V-500A, i gate driver, i trasduttori di corrente lato AC, il

trasduttore di tensione lato DC ed i condensatori del DC-link. Il modulo è già predisposto per il raffreddamento a fluido.



**Figura 2. Piattaforma di controllo PED-Board® selezionata per i vari sottosistemi della stazione di ricarica.**



**Figura 3. Modulo IPM Semikron SKAI-5001MD15.**

La macchina elettrica che verrà collegata all'inverter mostrato in Figura 3 è un sincro a magneti permanenti isotropo e con raffreddamento a liquido. Le principali caratteristiche sono mostrate in Tabella 2.

**Tabella 2 – Dati della macchina elettrica di trazione**

FEM concatenata efficace	48 V
Costante di velocità (Ke)	0.00112 Vpk/rpm
Coppia continuativa	30 Nm (@ ~136 A)
Velocità nominale	3500 rpm
Coppia massima per 300 s	62 Nm
Coppia di picco per 5 s	120 Nm
Resistenza statorica fase-fase	10 mΩ
Induttanza sincrona	50 μH
Coppie polari	4
Peso	25 kg
Potenza nominale	11.3 kW

Le dimensioni della macchina di trazione, prodotta dalla ACM-Engineering, ed un suo disegno realizzativo sono mostrate nella Figura 4. Il sensore di posizione è integrato nella parte posteriore della macchina ed è un resolver ad un lobo con eccitazione pari a 7 Vrms e 10 kHz. Le sue caratteristiche sono riassunte in Tabella 3.

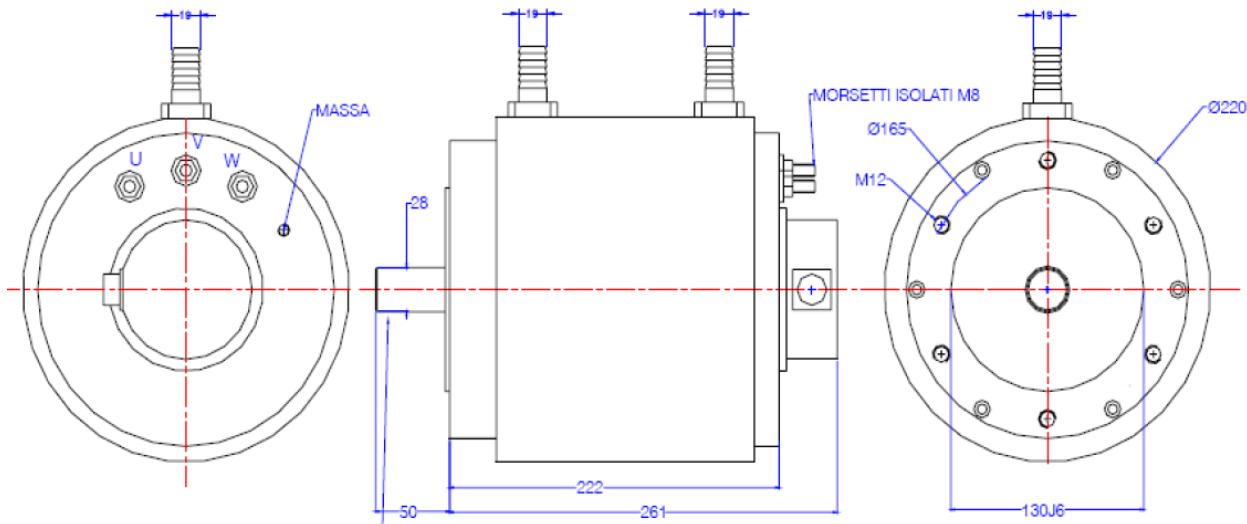


Figura 4. Viste meccaniche della macchina elettrica di trazione

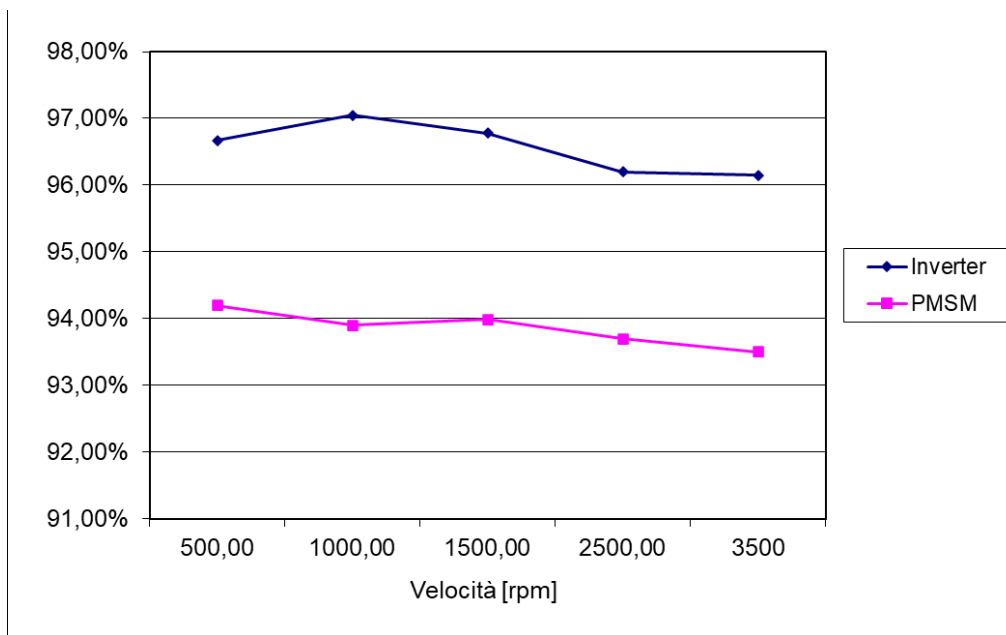
Tabella 3 – Dati del cavo resolver fornito con la macchina elettrica

COS-	Arancio/Bianco
COS+	Arancio
SIN-	Blu/Arancio
SIN+	Blu
EXE-	Marrone/Bianco
EXE+	Marrone
PTC	Nero
PTC	Nero

Da verifiche effettuate al banco prova, si sono determinati i rendimenti dell’inverter di trazione e della macchina elettrica sincrona. Questo ha consentito di stimare le perdite che dovranno essere gestite dal circuito di raffreddamento. Le prove sono state eseguite operando a coppia nominale ed i risultati sono riassunti in Figura 5.

Un’immagine della macchina elettrica sincrona è mostrata in Figura 6, dove si può vedere anche il suo ancoraggio sul telaio del veicolo. Infine, il veicolo completo è mostrato in Figura 7.





**Figura 5. Curve di rendimento per la macchina elettrica e l'inverter di trazione.**



**Figura 6. Macchina elettrica sincrona di trazione.**



**Figura 7. Immagine della Microcar oggetto della presente attività di ricerca.**

## 2.2 PCB di interfaccia e acquisizione misure

La PCB di adattamento si è resa necessaria per poter acquisire e condizionare i vari segnali provenienti dai trasduttori installati a bordo del veicolo e per pilotare l'inverter di trazione. Il collegamento tra i trasduttori e la PCB avverrà tramite dei connettori dedicati a sgancio rapido con fissaggio a vite. Il layout della scheda realizzata è mostrato in Figura 8 dove la serigrafia sul top-layer mostra le funzionalità delle varie parti. La presente scheda gestirà anche i servizi a bordo del veicolo come l'acceleratore, i comandi di start/stop, marcia avanti/indietro ed infine il classico 'fungo' per l'emergenza. In appendice è riportato lo schema elettrico completo della scheda che è stata poi fatta realizzare da azienda esterna.

La scheda realizzata è mostrata in Figura 9 dove possono notarsi il connettore DB25 verso l'inverter e i connettori per la ricezione delle misure con integrata l'alimentazione richiesta. I relè posizionati sulla scheda si sono resi necessari per controllare i teleruttori di potenza a bordo del veicolo.

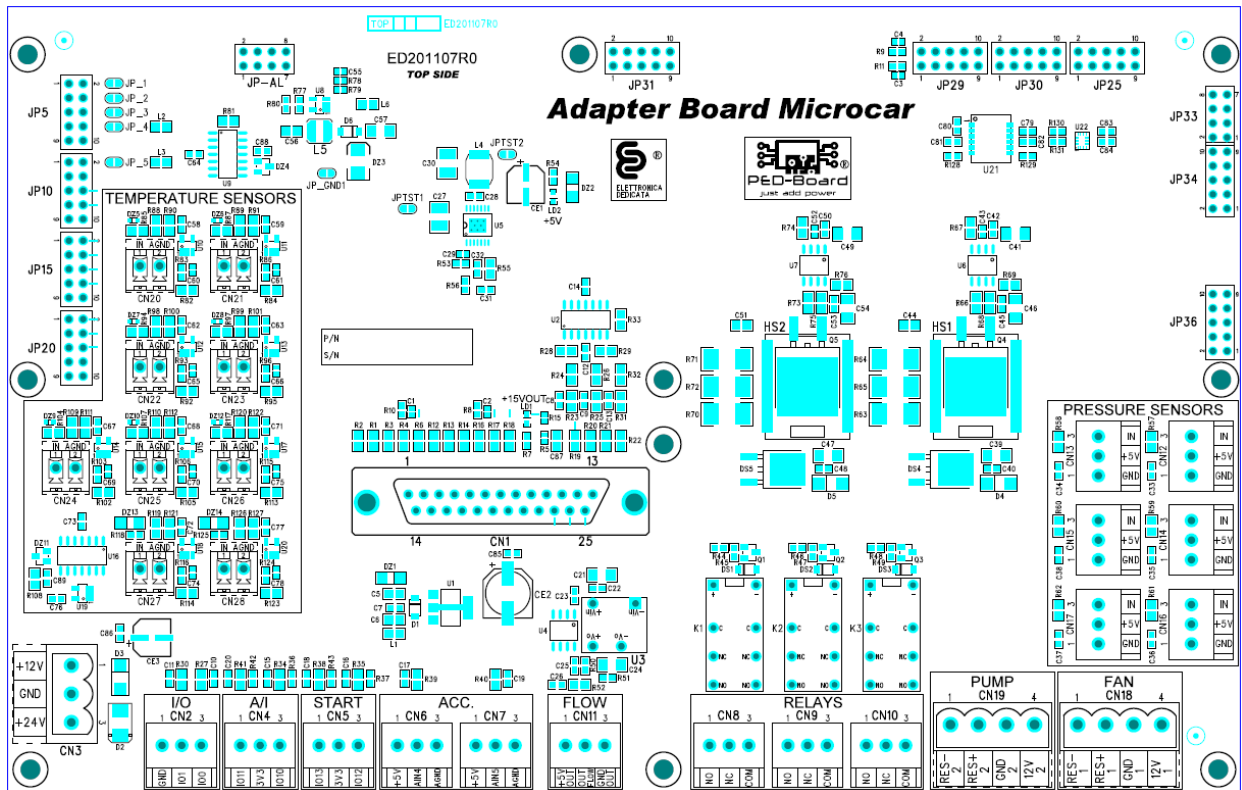


Figura 8. Layout della scheda di interfaccia.

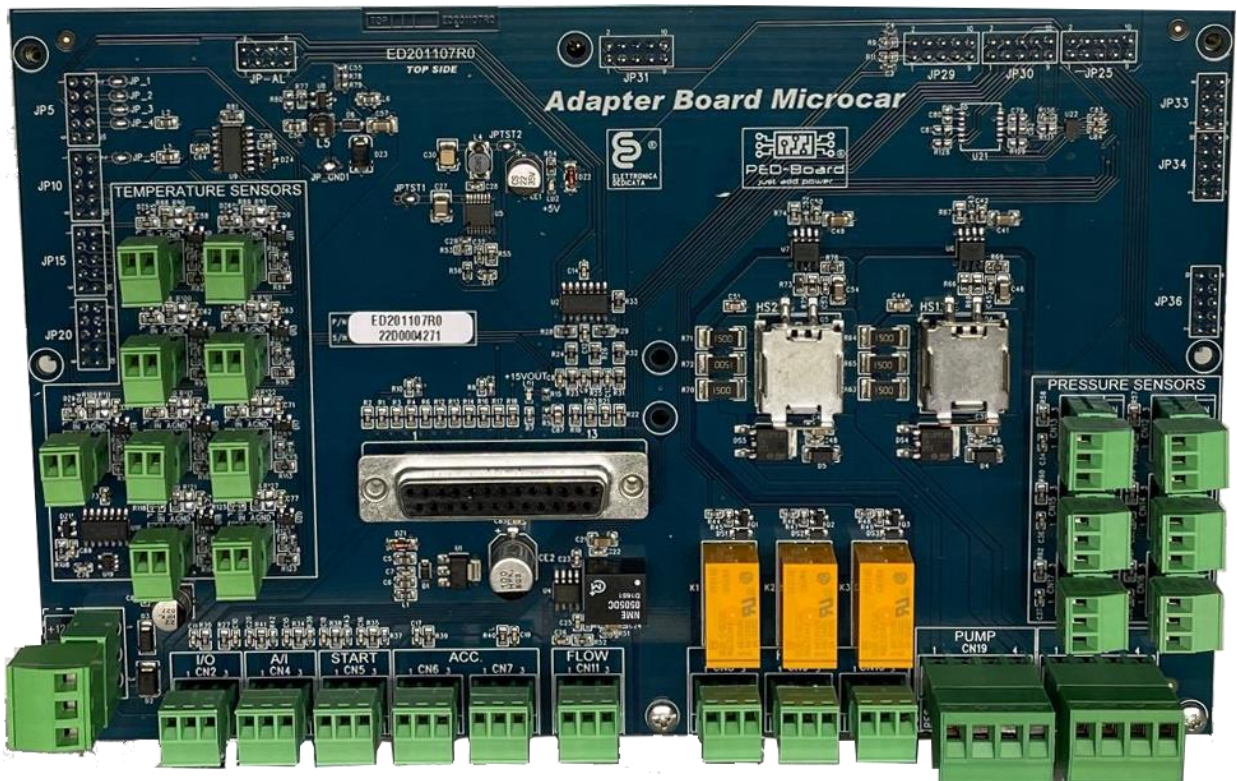


Figura 9. Vista dall'alto della scheda di interfaccia.

### 2.3 Sottosistemi a bordo del veicolo

Per l'assemblaggio è stata prevista la realizzazione di due sottosistemi che possano essere installati a bordo del veicolo. Il box di controllo (Box 1) è mostrato in Figura 10, all'interno del quali sono state collocate la scheda di controllo e la relativa scheda di interfaccia. Il box di alimentazione e manovra (Box 2) è mostrato in Figura 11 dove sono stati collocati gli alimentatori, i teleruttori di potenza ed i fusibili di protezione. Il Box 2 ha al suo interno anche una serie di interruttori e di comandi accessibili tramite il pannello frontale mostrato in Figura 12. Il comando di 'start/stop' attua la partenza o l'arresto dell'azionamento di trazione, il comando di 'marcia' è utilizzato per la selezione della marcia avanti o indietro, il comando 'ventola' abilita la regolazione di velocità del sistema di ventilazione associato allo scambiatore in aria, il comando 'pompa' abilita il funzionamento della pompa per la circolazione del fluido di raffreddamento ed infine, il sezionatore 'ped' attiva la scheda di controllo e le alimentazioni ausiliarie. La ventola e la pompa di raffreddamento sono controllate in velocità da appositi anelli implementati sulla scheda di controllo, in base alle condizioni di esercizio dell'azionamento e quindi della potenza termica da smaltire.

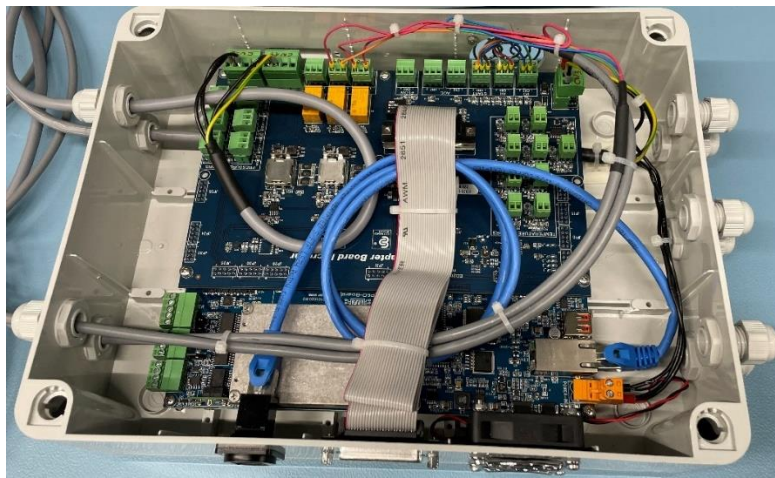


Figura 10. Sistema di controllo (Box 1).

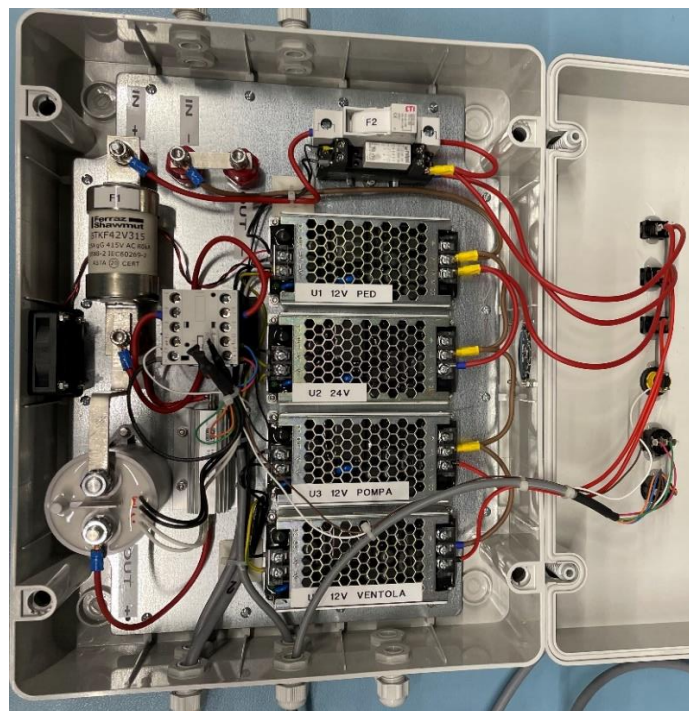


Figura 11. Sistema di manovra ed alimentazione (Box 2).

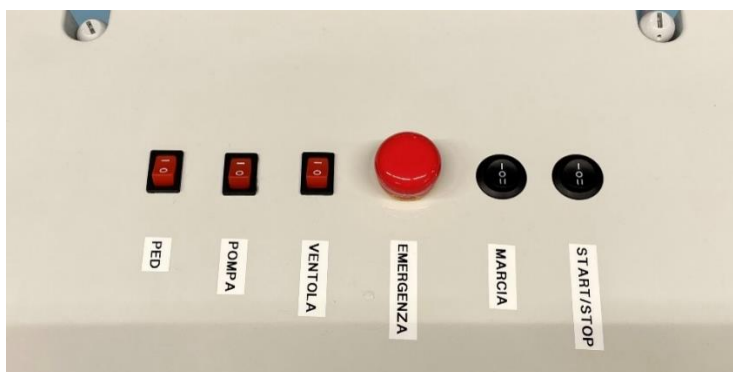


Figura 12. Vista superiore del Box 2.

### 2.4 Software di controllo

Il software di controllo è stato realizzato in LabVIEW® e diviso tra i due target disponibili, microprocessore e FPGA. L’FPGA ha il compito di acquisire i vari segnali, chiudere gli anelli di regolazione per l’azionamento di trazione e gestire le protezioni da sovracorrente, sovratensione e sovratemperatura. Il target Real-Time gestisce nel complesso l’intero sistema, quindi il suo codice contiene una macchina a stati e tutta la parte di interfaccia utente e gestione della comunicazione verso il soggetto esterno ricevitore dei dati.

La Figura 13 mostra il Front Panel realizzato in LabVIEW che è stato poi reso accessibile durante l’esecuzione delle prove sperimentali. Il pannello è composto da più ‘tab’ all’interno dei quali trovano ubicazione i vari elementi come controlli ed indicatori. Come è mostrato, il Front Panel mostra sul ‘main’ la velocità di rotazione della macchina elettrica, il valore della temperatura dell’inverter ed il suo indice di modulazione, e la tensione del DC-bus. È inoltre presente un visualizzatore di forme d’onda in grado di visualizzare in modo sincrono, senza perdita di dati, ogni campione acquisito dall’FPGA con una frequenza pari a 15 kHz.

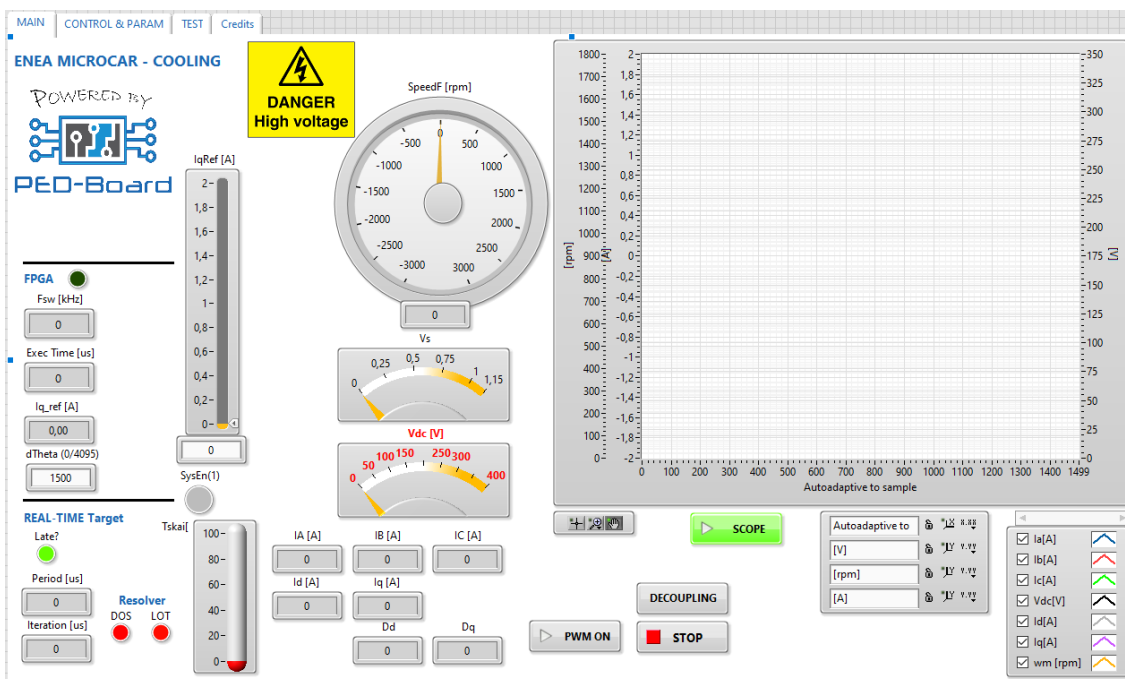
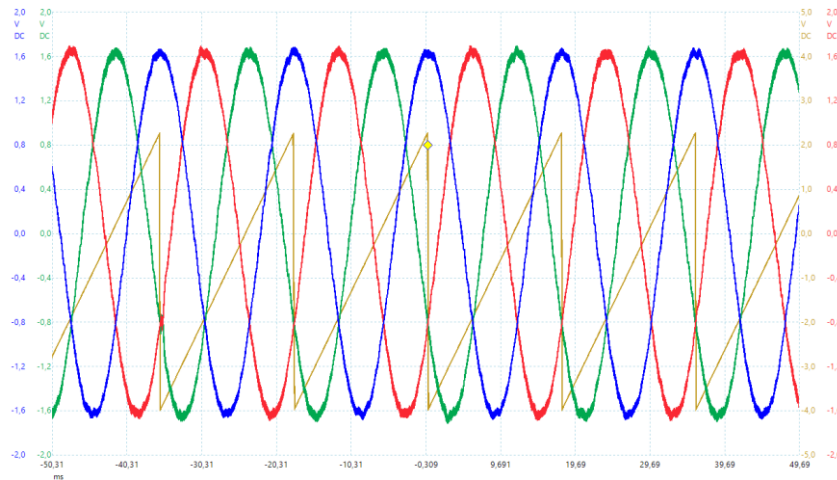


Figura 13. Font-Panel realizzato in LabVIEW.

### 2.5 Risultati sperimentali

Di seguito sono descritte brevemente le prove sperimentali che sono state effettuate sul sistema realizzato. La Figura 14 mostra le correnti in uscita dall’inverter e quindi entranti nella macchina con sovrapposto

l'angolo elettrico stimato. L'angolo elettrico è ottenuto tramite un sensore di posizione di tipo resolver ed un circuito di interfaccia presente sulla scheda di controllo. L'uscita è stata resa disponibile tramite una delle uscite digitali-analogiche della scheda stessa.



**Figura 14. Correnti relative alla macchina elettrica di trazione e angolo elettrico.**

Sono stati eseguiti test di controllo termico utilizzando il dissipatore a liquido integrato nel convertitore elettronico di potenza utilizzato per la gestione dell'azionamento elettrico di trazione. Le verifiche di riferimento sono state condotte facendo circolare nel circuito di raffreddamento acqua in regime monofase (liquid cooling); quindi si è testato un innovativo sistema di raffreddamento bifase a convezione forzata (flow boiling) detto anche two-phase cooling system. Caratteristica peculiare del two-phase cooling è quella di consentire l'asportazione di elevati flussi termici dalla superficie da raffreddare grazie alla variazione dell'entalpia associata con il cambiamento di fase, detta anche calore latente di evaporazione.

Il sistema di raffreddamento bifase è costituito da una pompa volumetrica che fa circolare un fluido refrigerante, generalmente bassobollente, all'interno di uno scambiatore a microcanali (evaporatore) a contatto con la superficie da raffreddare: all'interno dell'evaporatore avviene l'ebollizione del fluido con conseguente asportazione di calore dalla superficie scaldante. La miscela liquido-vapore viene quindi convogliata all'interno di un secondo scambiatore, anch'esso generalmente a microcanali (condensatore) dove avviene la condensazione della fase vapore, con conseguente rilascio all'ambiente circostante (pozzo freddo) del calore precedentemente rimosso dalla superficie calda. Infine, il fluido condensato transita attraverso un serbatoio che funge da separatore/ricevitore per poi essere inviato in aspirazione alla pompa in fase totalmente liquida. Anche la fase di condensazione, del resto, presenta un'elevata efficienza nel trasferimento del calore in quando viene "sfruttato" il calore latente di condensazione. Infine, è da sottolineare come l'impiego di un sistema di raffreddamento bifase sia atto a garantire temperature più uniformi della superficie del dispositivo da raffreddare, in quanto la temperatura del fluido refrigerante durante il cambiamento di fase rimane pressoché costante e pari alla temperatura di saturazione corrispondente alla pressione di esercizio.

La Figura 15 riporta i risultati dei test di liquid cooling. Il grafico riporta i valori della potenza termica netta  $W_{net}$  dissipata dal modulo IPM a MOSFET in funzione di una temperatura di riferimento,  $\Delta T_{rif}$ ; la temperatura di riferimento è pari alla differenza tra la temperatura media dell'interfaccia dissipatore-MOSFET e la temperatura ambiente (temperatura del pozzo freddo). In particolare, in questi test di riferimento, sono state effettuate prove a potenza crescente, avendo fissato per ciascuna serie la pressione d'esercizio e la portata di acqua (refrigerante). Le pressioni testate sono state 1.2 e 2.0 bar mentre le portate 23 e 50 kg/h.

Come atteso, gli andamenti sono perfettamente lineari, tipica caratteristica di un sistema di scambio termico in regime monofase. E altresì evidente come non vi sia alcuna influenza della pressione, a parità di portata mentre il parametro che influenza maggiormente il coefficiente di scambio termico è rappresentato

proprio dalla portata di refrigerante. A parità di carico termico imposto ovvero dissipato, all'aumentare della portata si riscontrano temperature minori del componente elettronico raffreddato. Parimenti, a parità la stessa temperatura di riferimento, una portata maggiore è in grado di smaltire potenze più elevate.

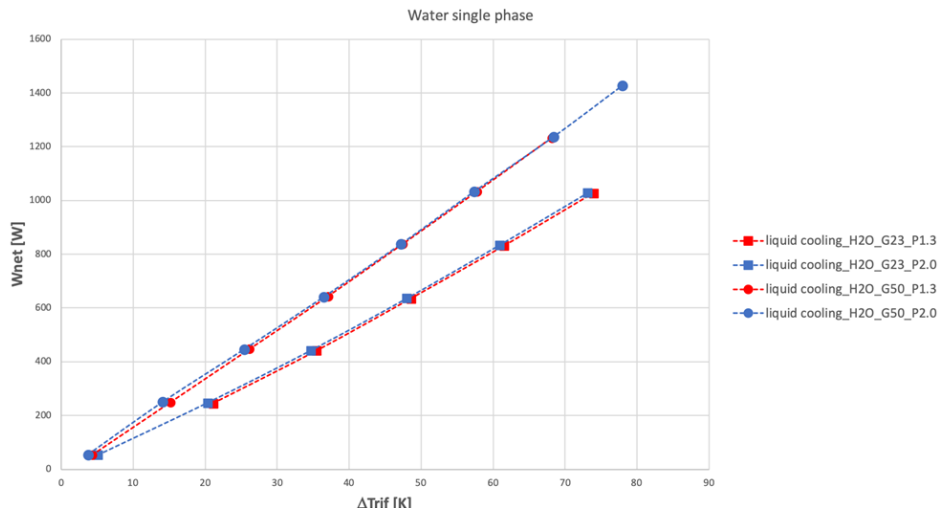


Figura 15. Risultati dei test di liquid cooling.

La Figura 16 mostra in maniera diretta il confronto tra liquid cooling e two-phase cooling. Le prove sul sistema di raffreddamento bifase sono state eseguite con valori di portata compresi nel medesimo range dei precedenti test di liquid cooling e con pressioni d'esercizio sia costanti per ciascuna serie di test ovvero con pressioni liberamente variabili in funzione della potenza dissipata (variazioni legate alla presenza di una fase vapore via via più cospicua).

Le curve riportate nel grafico di Figura 16 sono relative a due serie di prove con differente portata massica nei due casi: 50 kg/h per il sistema monofase e 40,3 kg/h per il sistema bifase. Anche la corrispondente portata volumetrica elaborata dalla pompa è differente, essendo pari a 0,83 l/min per il liquid cooling e 0,5 l/min per il two-phase cooling.

Inoltre, portate minori corrisponde una minore potenza di pompaggio richiesta al sistema e quindi da quanto sopra si evince chiaramente come il sistema bifase consenta una rimozione più efficiente del calore prodotto dal dispositivo elettronico durante il suo funzionamento, consentendo infatti di mantenere quest'ultimo a temperature operative inferiori (alla medesima temperatura ambiente) a parità di potenza termica da dissipare e quindi sostanzialmente a parità di prestazioni. Senza trascurare, infine, che mantenere il componente elettronico a temperature più basse ne riduce i tassi di guasto e ne allunga quindi la vita media.

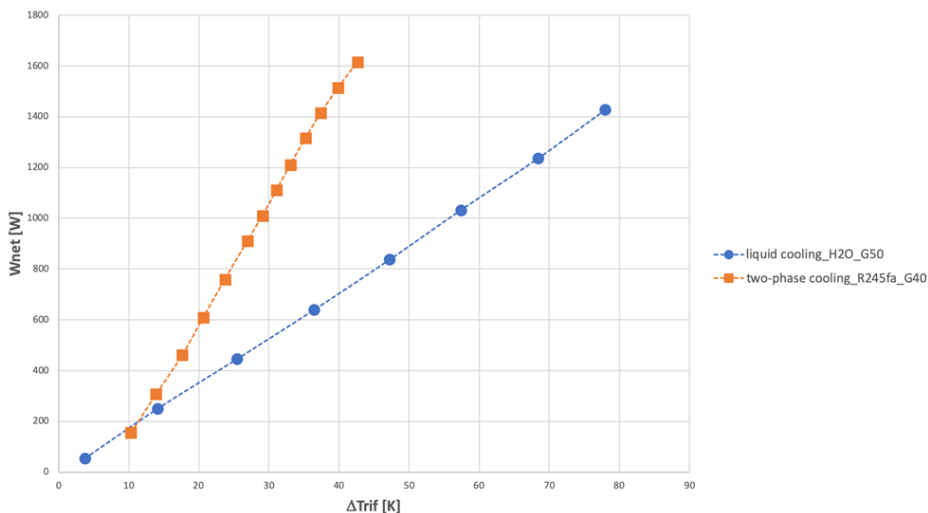


Figura 16. Confronto tra raffreddamento a liquido e bifase.

### 3 Appendice

In appendice sono riportati gli schemi elettrici della scheda di adattamento realizzati da un'azienda esterna su progetto eseguito dall'unità dell'Università degli Studi ROMA TRE.

