



Ricerca di Sistema elettrico

## Risultati dei test di two-phase cooling su auto elettrica a batterie

G. Zummo, U. Brandimarte, S.Constà, F. Felici, L. Saraceno, L.  
Gugliermetti

Report RdS/PTR(2021)/191

RISULTATI DEI TEST DI TWO-PHASE COOLING SU AUTO ELETTRICA A BATTERIE  
G. Zummo, U. Brandimarte, S.Constà, F. Felici, L. Saraceno, L. Gugliermetti (ENEA)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Mobilità

Linea di attività: LA 2.3 *Accumuli automotive: conclusione test di abuso elettrico e invecchiamento e applicazione di sistemi per il controllo termico su veicoli sperimentale*

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

## Indice

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| SOMMARIO.....                                                                   | 4  |
| 1 INTRODUZIONE .....                                                            | 5  |
| 2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....                            | 7  |
| 2.1 DESCRIZIONE DEL VEICOLO ELETTRICO URB-E (URBE) .....                        | 7  |
| 2.2 REQUISITI DEL SISTEMA DI CONTROLLO TERMICO DEL VEICOLO ELETTRICO URBE ..... | 13 |
| 2.3 PROGETTAZIONE DEL CIRCUITO DI RAFFREDDAMENTO BIFASE .....                   | 14 |
| 2.4 INSTALLAZIONE DEL CIRCUITO DI RAFFREDDAMENTO BIFASE .....                   | 18 |
| 2.5 PROVE DEL CIRCUITO DI RAFFREDDAMENTO BIFASE .....                           | 23 |
| 3 CONCLUSIONI.....                                                              | 28 |
| 4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....                                               | 28 |

## Sommario

L'obiettivo di questa attività prevede lo sviluppo e la realizzazione di un circuito di raffreddamento di tipo bifase per il controllo termico dell'inverter e del motore elettrico del prototipo di veicolo elettrico URBE dell'ENEA. Il circuito di controllo termico del veicolo è stato sviluppato sulla base dei risultati sperimentali dell'attività svolta in laboratorio, durante il secondo anno del progetto, sul circuito sperimentale di riferimento [1] ("Test di laboratorio e manuale d'uso del dispositivo per il two-phase cooling di componenti di auto elettriche", Report RdS/PTR2020/048). Il controllo termico proposto rappresenta un innovativo sistema di raffreddamento di tipo bifase che utilizza il calore latente di evaporazione e di condensazione quale meccanismi di trasferimento del calore. Verranno descritte le attività svolte per la modifica del veicolo elettrico, l'installazione del sistema di controllo termico bifase e le prove svolte sul banco a rulli dell'ENEA.

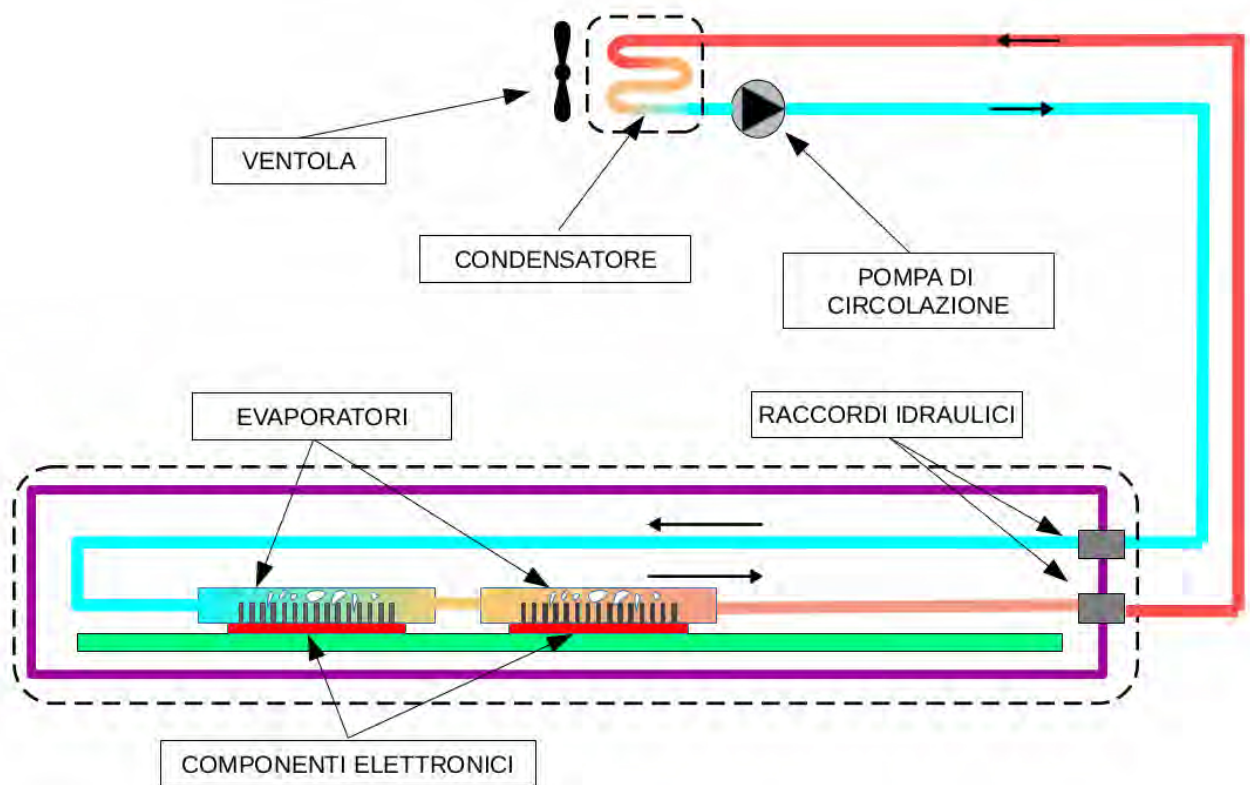
I test sono stati portati a termine con successo e hanno dimostrato l'efficacia del nuovo sistema di controllo termico bifase per un veicolo elettrico.

## 1 Introduzione

L'evoluzione dei sistemi elettronici è caratterizzata da costanti aumenti delle potenze e delle frequenze di lavoro associati a miniaturizzazioni dei componenti. La conseguenza di questa tendenza è un costante aumento della densità di potenza termica che pone sfide molto complesse per il controllo termico dei sistemi elettronici. Questa problematica negli ultimi anni ha raggiunto un elevato livello di criticità per lo sviluppo dei nuovi sistemi elettronici ad alta potenza. In particolare, per il settore dei veicoli elettrici il controllo termico dell'inverter, del motore elettrico e delle batterie è un fattore critico per lo sviluppo per questo tipo di veicoli. Tra questi componenti, l'inverter, costituito da uno o più moduli IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors), è il componente più critico da raffreddare. Nei moduli IGBT si possono raggiungere densità di potenza termica fino a  $1 - 1.5 \text{ MW/m}^2$ . Questa densità di potenza termica deve essere smaltita efficacemente per evitare surriscaldamenti eccessivi dell'elettronica. Inoltre, i moduli IGBT sono caratterizzati da una distribuzione non uniforme della temperatura con regioni con elevate concentrazioni di flusso termico con conseguente presenza di regioni a temperature diverse estremamente difficili da raffreddare con i sistemi attualmente disponibili sul mercato. Da questa situazione nasce l'esigenza di sviluppare nuovi sistemi di thermal management che consentano di raffreddare efficacemente densità di potenze molto elevate.

Per soddisfare la domanda di sistemi di controllo termico efficaci, l'ENEA da alcuni anni sta lavorando allo sviluppo di un sistema di thermal management innovativo di tipo bifase (two-phase cooling).

La Figura 1 mostra lo schema di un tipico circuito di raffreddamento bifase.



**Figura 1 – Schema di un sistema di raffreddamento bifase (two-phase cooling)**

La caratteristica innovativa del sistema di controllo termico basato sul two-phase cooling è rappresentata dall'utilizzo del trasferimento di calore tramite l'ebollizione in convezione forzata (flow boiling). Tale modalità di trasferimento del calore che utilizza il calore latente di vaporizzazione, è estremamente efficiente in termini di flusso termico che può essere trasferito da un componente elettronico al fluido di raffreddamento. Il prototipo di questo tipo di sistema di raffreddamento è stato progettato e provato su un impianto sperimentale durante il secondo anno di attività.

Nel terzo anno del progetto di ricerca, il prototipo di veicolo elettrico dell'ENEA, denominato URB-E (Urbe), è stato utilizzato come veicolo elettrico pilota per provare la nuova tecnologia di controllo termico. Tale veicolo è stato utilizzato in passato come dimostratore della tecnologia della trazione elettrica a batterie ed era dotato di un sistema di raffreddamento a liquido. Nel corso dell'ultimo anno di progetto, è stata eseguita un'operazione di retrofitting per sostituire il vecchio sistema di raffreddamento a liquido con il nuovo sistema bifase. Parallelamente a tale attività, è stata condotta la progettazione e la realizzazione del circuito idraulico del sistema di controllo termico. Questo circuito idraulico è stato dotato di diversi sensori per registrare i parametri fluidodinamici del circuito stesso. Tutti i sensori sono stati collegati alla scheda di controllo elettronica realizzata dall'Università Roma Tre nell'ambito dello stesso progetto di ricerca. Infine, il circuito di raffreddamento, installato sull'auto elettrica per raffreddare il motore elettrico e l'inverter, è stato provato sul banco a rulli dell'ENEA per dei test di funzionamento.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Descrizione del veicolo elettrico URB-E (URBE)

Il veicolo elettrico Urb-E (Urbe), è il prototipo di vettura a trazione elettrica a batterie, che rappresenta una tipica city car a emissioni zero (Figura 2).



Figura 2 – Veicolo elettrico URB-E

#### **Carrozzeria**

La struttura della carrozzeria del veicolo è di tipo “rolling chassis” costituita da tubi in ferro saldati, di diametro 30 mm, spessore 2 mm per la struttura principale; tubi da 20 mm per le triangolazioni di irrigidimento. Le misure di ingombro della vettura sono 2,70 m in lunghezza per 1,40 m in larghezza.

Le parti meccaniche necessarie per la marcia sono: sospensioni anteriori e posteriori a parallelogramma deformabile realizzate da un triangolo oscillante superiore e uno inferiore, con molla elicoidale e ammortizzatore coassiale.

Lo chassis è completato da mozzi ruota, cerchi e pneumatici, volante, cremagliera e tiranti dello sterzo, pompa freno e freni a disco, sedili, cinture di sicurezza.

Il telaio è stato poi compartimentato con lamiere in lega di alluminio: sul fondo dell’abitacolo (per l’appoggio dei piedi del guidatore) e in verticale (alle spalle dei passeggeri, per creare una

separazione e una protezione dalla parte motrice). Il sedile del passeggero è stato rimosso per creare lo spazio per i moduli di controllo elettronico realizzati dall'Università Roma Tre.

Infine, due robuste piastre sono state poste in orizzontale per appoggiarvi le parti meccaniche: una nell'avantreno e una nel retrotreno, nei vani realizzati dal telaio tra le ruote destre e sinistre.

### **Motore elettrico di trazione**

Il motore elettrico di trazione è stato realizzato su specifiche ENEA dalla ditta ACM.

Il motore elettrico di trazione è rigidamente assemblato ad un gruppo differenziale con riduzione finale pari a 7:1 da cui partono i semiassi per le ruote motrici.

Le principali caratteristiche tecniche del motore elettrico di trazione sono riportate nella tabella seguente (Tabella 1).

I disegni del motore elettrico sono riportati nella Figura 3. La Figura 4 mostra una fotografia del motore elettrico in cui si può notare la camicia esterna per il raffreddamento a liquido e i due raccordi idraulici per l'ingresso e l'uscita del fluido refrigerante.

**Tabella 1 – Dati del motore elettrico del veicolo elettrico Urbe**

|                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| FEM concatenata efficace       | 48 V             |
| Costante di velocità ( $K_e$ ) | 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 m $\Omega$    |
| Induttanza sincrona            | 50 $\mu$ H       |
| Coppie polari                  | 4                |
| Peso                           | 25 kg            |
| Potenza nominale               | 11.3 kW          |

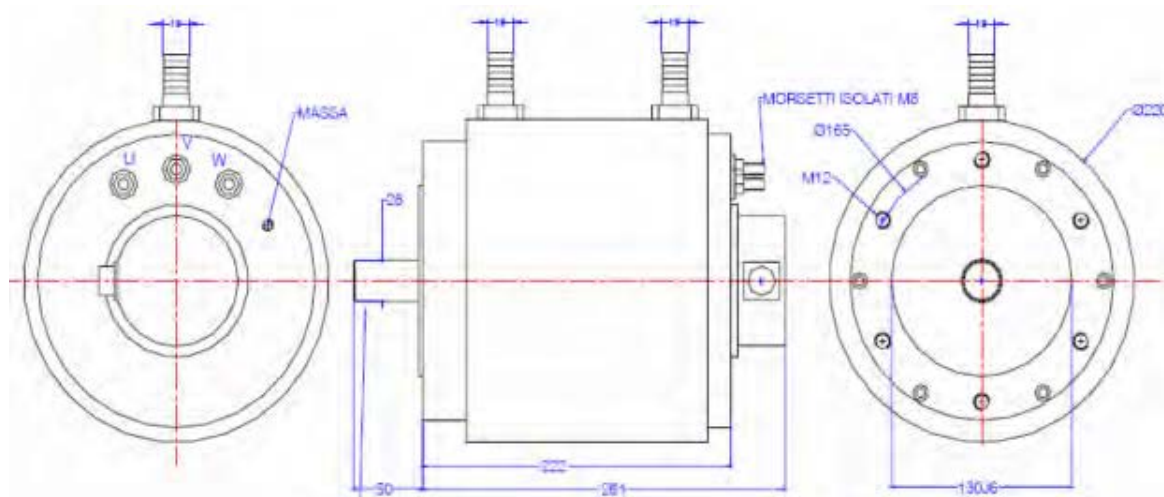


Figura 3 - Disegni del motore elettrico del veicolo URBE

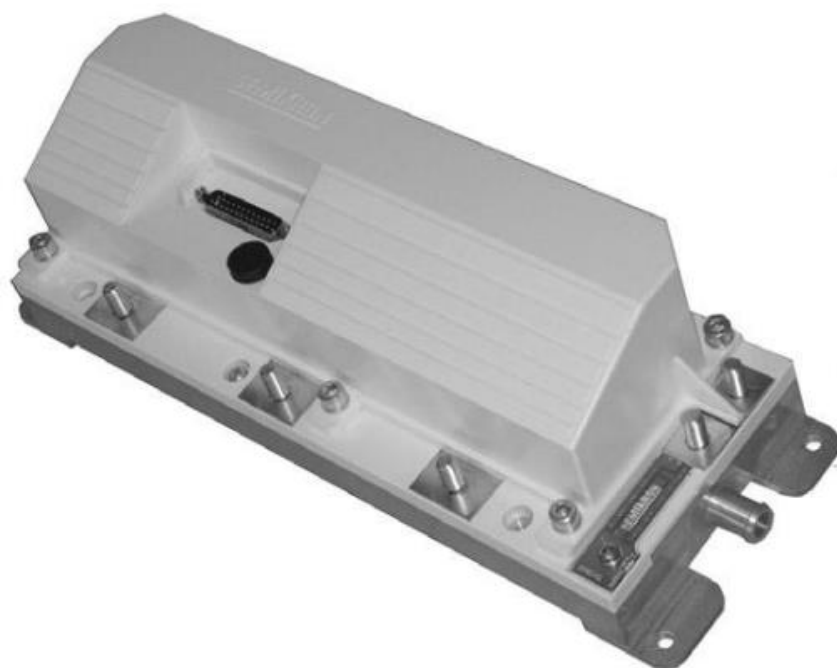


Figura 4 - Motore elettrico del veicolo elettrico Urbe

### **Inverter Semikron**

L'inverter di trazione è basato su un modulo IPM della Semikron modello SKAI-5001MD15. L'inverter ha al suo interno 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.

L'inverter, come si può osservare nella fotografia della Figura 5, è costituito da un involucro di protezione dell'elettronica ed uno scambiatore di calore integrati. Lo scambiatore di calore è stato progettato per il raffreddamento a liquido.



**Figura 5 – Inverter Semikron modello SKAI-5001MD15 del veicolo elettrico URBE**

### **Banco a rulli**

Il banco a rulli dell'ENEA è una facility sperimentale per prove di prestazioni, consumi ed emissioni su cicli di guida, standard o impostabili a piacere, di veicoli a 2 ruote.

Le Figure 6, 7, e 8 mostrano la sala prove del banco a rulli e le fasi di test con il veicolo elettrico URBE.

I componenti base dell'impianto sono i rulli, sui quali poggiano le ruote motrici del mezzo e che sono frenati da una macchina elettrica; questa, a sua volta controllata da un computer, permette le prove standard sui veicoli e la prova di "simulazione della marcia su strada".

Per le prove con veicoli elettrici si dispone di un "ciclatore" dedicato che effettua il condizionamento, la ricarica e il testing delle batterie.

L'utilizzo del banco a rulli dell'ENEA è stato determinante per effettuare i primi test di collaudo di tutto il sistema costituito dal veicolo elettrico e il sistema di controllo termico bifase. Con questo strumento di

prova è stato possibile strumentare e quindi controllare in real time l'andamento delle principali grandezze elettriche e termofluidodinamiche ed impostare le volute condizioni di marcia.



**Figura 6 – Vista d'insieme della sala prova che ospita il banco a rulli**



**Figura 7 – Il banco a rulli durante i test con il veicolo elettrico URBE**

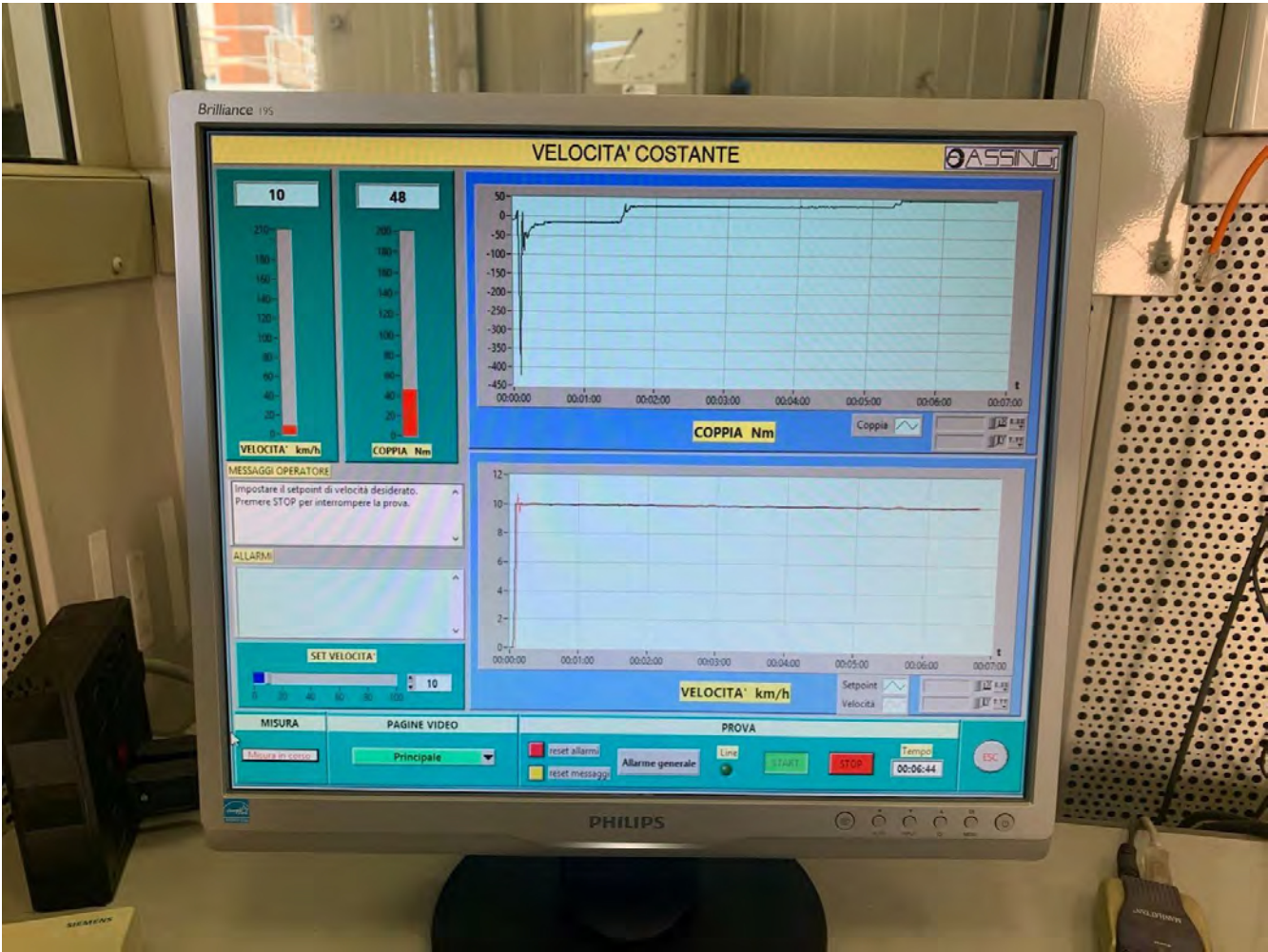


Figura 8 – Il software di controllo del banco a rulli

## 2.2 *Requisiti del sistema di controllo termico del veicolo elettrico URBE*

Un sistema di controllo termico ha lo scopo di mantenere le temperature dei vari componenti dell'elettronica entro determinati intervalli e di garantire lo smaltimento del calore prodotto nei componenti stessi verso l'ambiente esterno.

Una efficace gestione termica è necessaria per mantenere la temperatura dei componenti elettronici entro i limiti di sicurezza, evitando valori estremi della temperatura di giunzione dei semiconduttori, in genere compresa tra 95°C e 115°C per i dispositivi basati sul silicio. Il calore generato dai componenti elettronici viene ceduto all'ambiente esterno attraverso scambiatori di calore che utilizzano diversi meccanismi di trasferimento di calore verso fluidi diversi (aria e acqua, principalmente).

La gestione termica rappresenta una sfida sempre più ardua a causa della continua riduzione delle dimensioni dei componenti elettronici e il costante aumento delle potenze che inducono densità di potenza termica da smaltire sempre più elevate.

Nel veicolo URBE, il sistema di controllo termico bifase è stato utilizzato per gestire il calore in eccesso dei due componenti più potenti: l'inverter e il motore elettrico.

In particolare, il sistema utilizzato andrà a sostituire il sistema di raffreddamento a liquido utilizzato nella configurazione iniziale della vettura URBE.

La potenza termica massima da smaltire del sistema è pari a circa 2000 Watt, mentre l'intervallo di temperature di esercizio dell'elettronica va da 15°C a 100°C.

La potenza termica totale comprende il raffreddamento sia dell'inverter che del motore elettrico. In tal modo, il sistema two-phase cooling sostituirà completamente il preesistente circuito di raffreddamento ad acqua.

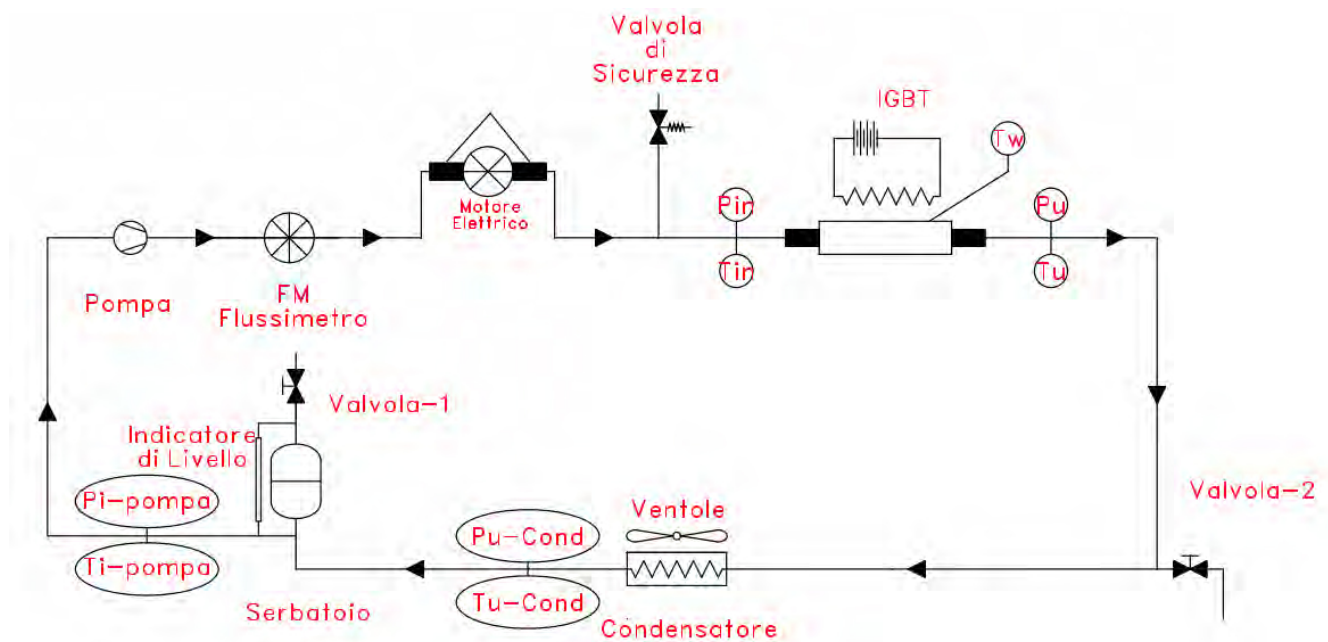
La temperatura dell'ambiente in cui verrà dissipato il calore prodotto dai componenti elettronici ed elettrici varierà tra 0°C e 40°C nelle condizioni reali di funzionamento. Per questa serie di test, la temperatura è quella rilevata nella sala di prove dove è installato il banco a rulli. Poiché la sala che ospita il banco a rulli non è climatizzata, tale temperatura varia tra 10°C e 18°C durante il periodo di prova.

**Tabella 2 – Requisiti per il sistema di controllo termico dell'elettronica di bordo del veicolo elettrico**

| Grandezza                                      | Valore minimo | Valore massimo |
|------------------------------------------------|---------------|----------------|
| Potenza termica                                | 0             | 2000 W         |
| Temperatura ambiente                           | 0°C           | 40°C           |
| Temperatura massima del componente elettronico | 15°C          | 100°C          |

### 2.3 Progettazione del circuito di raffreddamento bifase

Il sistema di raffreddamento di tipo two-phase cooling è stato progettato sulla base dei requisiti definiti nella sezione precedente che riguardano le specifiche dell'elettronica del veicolo elettrico e sulla base dei risultati dei test eseguiti in laboratorio durante il secondo anno del progetto. L'attività del secondo anno [1] ha consentito di analizzare sperimentalmente le prestazioni di diverse configurazioni e diversi fluidi di un sistema di raffreddamento bifase. In particolare, grazie a questi risultati si sono definiti i parametri di riferimento per il circuito idraulico di controllo termico del veicolo URBE: la portata di riferimento, le pressioni di lavoro, la configurazione del condensatore e la configurazione dell'evaporatore.



**Figura 9 - Schema del circuito idraulico del sistema di raffreddamento bifase per il veicolo elettrico URBE**

Il circuito di raffreddamento, riportato in Figura 9, è costituito dai seguenti componenti: pompa, misuratore di portata, valvola di sicurezza, scambiatore di calore integrato nell'inverter, un condensatore a microcanali ed un serbatoio che ha anche la funzione di vaso di espansione. La pompa è una pompa centrifuga che consente di sviluppare portate nell'intervallo da 0 a 25 l/m con prevalenze fino a 0.5 bar. La pompa è caratterizzata da un controllo PWM e l'alimentazione di 12 VCC. Il misuratore di portata è un sensore a turbina con portate fino a 5 l/m. Lo scambiatore di calore è quello fornito di serie con l'inverter della Semikron. Tale scambiatore di calore è costituito da un unico canale che segue una geometria a serpentina. Il fluido evapora lungo questa serpentina trasferendo il calore dalla scheda elettronica al fluido. Il condensatore è costituito da microcanali raffreddati ad aria da 4 ventole.

L'operazione di retrofitting del circuito di raffreddamento preesistente è stata caratterizzata da alcuni vincoli impossibili da rimuovere. Tali vincoli hanno condotto a scelte progettuali e di installazione

opportune per adattare il circuito bifase ai componenti esistenti non modificabili. I due componenti non modificabili sono il motore (Figura 4) e l'inverter della Semikron (Figura 5).

Il motore è stato realizzato con una camicia esterna di contenimento, all'interno della quale circola il fluido refrigerante. In questo caso i raccordi idraulici non sono modificabili e ci si è dovuti adattare a questi nella fase di realizzazione. Inoltre, non si sono potuti realizzare i condotti interni di raffreddamento ottimizzati per il raffreddamento bifase.

Lo stesso approccio è stato utilizzato per l'inverter della Semikron. Questo è stato realizzato con uno scambiatore di calore per raffreddamento a liquido, senza cambiamento di fase, integrato nella struttura dell'inverter e posto a contatto con i chip da raffreddare, immersi in un composto termico denominato Silgel. Il composto termico è il materiale che viene posto all'interfaccia tra lo scambiatore di calore e il componente elettronico da raffreddare.

La sostituzione dello scambiatore di calore avrebbe compromesso il funzionamento dei moduli IGBT dell'inverter. Pertanto si è deciso di utilizzare lo scambiatore di calore esistente, nonostante avesse una geometria non ottimizzata per lo scambio termico in evaporazione. I canali di questo scambiatore sono caratterizzati da una geometria a serpentina con un diametro idraulico dell'ordine dei 12-16 mm. Da alcuni test preliminari sul circuito di prova in laboratorio, si è potuto verificare che lo scambiatore non ottimizzato riusciva a raffreddare efficacemente l'inverter anche con il fluido in evaporazione. Pertanto, si è deciso di utilizzare l'inverter con lo scambiatore fornito dalla Semikron.

Per consentire la registrazione dei parametri fluidodinamici lungo il circuito sono stati installati diversi sensori. La Figura 4 mostra la dislocazione dei sensori.

La Tabella 3 mostra l'elenco dei sensori utilizzati e il campo di misura.

I parametri fluidodinamici misurati sono la portata, la temperatura del fluido e quella ambiente, la pressione del fluido.

Per la misura della portata è stato utilizzato un sensore di portata a turbina a effetto Hall della Gems Sensors, con un range di misura della portata di liquido da 0,5 L/min a 5L/min.

Per la misura della temperatura è stato utilizzato un sensore termistore NTC del tipo con cavo flessibile da 10 kOhm della Muarata.

Per la misura della pressione sono stati utilizzati i trasduttori per impieghi pesanti serie PX3 della Honeywell da 10 bar di fondo scala.

Per la sicurezza del sistema, il circuito è dotato di una valvola di sicurezza per garantire che in ogni caso non si superi la pressione massima prevista. La valvola è tarata per una pressione massima di 5 bar.

Tabella 3 – Elenco dei sensori utilizzati per il circuito di controllo termico bifase sul veicolo URBE

| Parametro misurato | range           | Tipo di sensore               |
|--------------------|-----------------|-------------------------------|
| Portata            | 0,5 – 5 l/min   | Sensore di portata a turbina  |
| Pressione          | 0-10 bar        | Sensore di pressione assoluta |
| Temperatura        | -40°C to +125°C | Termistore NTC                |

Il fluido utilizzato per il circuito bifase è il Novec 7000 della 3M [2] (Novec e 3M sono marchi registrati della 3M).

Il Novec 7000 (1-Metossieptafluoropropano) è un liquido termovettore ignifugo, a basso potenziale di riscaldamento globale (LWP), in grado di raggiungere temperature minime di -120 °C. È anche impiegato come refrigerante nei cicli a espansione diretta.

Il fluido 7000 3M Novec viene utilizzato, nel settore dei semiconduttori, per le apparecchiature da test automatizzate (ATE) e le apparecchiature per la lavorazione di wafer che richiedono temperature estremamente basse. Il fluido 7000 3M™ Novec™ è caratterizzato da un basso potenziale di riscaldamento globale (GWP) e produce ridotte emissioni di gas serra rispetto ai refrigeranti PFC.

Una delle caratteristiche interessanti del Novec 7000 riguarda le eccellenti proprietà dielettriche. Questo fluido è caratterizzato da una bassissima costante dielettrica che ne fa un materiale isolante, non conduttore di elettricità. Questa caratteristica fornisce una sicurezza intrinseca per i sistemi di raffreddamento dell'elettronica. Infatti, in caso di fuoriuscita accidentale dai condotti del circuito di raffreddamento, il fluido a contatto con i circuiti sotto tensione non provoca corti circuiti e non danneggia i componenti elettronici.

Infine, il Novec 7000 non è tossico e può essere maneggiato senza particolari precauzioni.

La tabella 4 riporta le principali proprietà del Novec 7000, mentre la figura 10 ne riporta il diagramma di Mollier.

La scelta del Novec 7000 è stata determinata dalla semplicità di utilizzo, grazie alla sua temperatura di ebollizione non troppo bassa, la sua sicurezza e le prestazioni interessanti in termini di capacità di raffreddamento.

**Tabella 4 – Proprietà del Novec 7000 della 3M**

| <b>Proprietà</b>                                            | <b>Valore del Novec 7000 (3M)</b> |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>CAS Number</b>                                           | <b>375-03-1</b>                   |
| <b>Peso molecolare (g/mole)</b>                             | <b>200</b>                        |
| <b>Temperatura di ebollizione a pressione ambiente [°C]</b> | <b>34</b>                         |
| <b>Temperatura di congelamento [°C]</b>                     | <b>0</b>                          |
| <b>Densità del liquido [kg/m<sup>3</sup>]</b>               | <b>1400</b>                       |
| <b>Viscosità cinematica [cSt]</b>                           | <b>0</b>                          |
| <b>Coefficiente di espansione [1/K]</b>                     | <b>0</b>                          |
| <b>Punto critico, densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>            | <b>533</b>                        |
| <b>Pressione critica [Bar]</b>                              | <b>0</b>                          |
| <b>Temperatura critica [°C]</b>                             | <b>165</b>                        |
| <b>Costante dielettrica</b>                                 | <b>0</b>                          |
| <b>Punto di Flash</b>                                       | <b>0</b>                          |
| <b>Calore latente di evaporazione [KJ/kg]</b>               | <b>142</b>                        |
| <b>Calore specifico [J/kg-K]</b>                            | <b>1300</b>                       |
| <b>Tensione superficiale [dynes/cm]</b>                     | <b>0</b>                          |
| <b>Conducibilità termica [W/m-K]</b>                        | <b>75</b>                         |
| <b>Tensione di vapore [kPa]</b>                             | <b>0</b>                          |
| <b>Global Warming Potential (GWP)</b>                       | <b>420</b>                        |
| <b>Ozone Depletion Potential (ODP)</b>                      | <b>0</b>                          |
| <b>Atmospheric lifetime [anno]</b>                          | <b>0</b>                          |

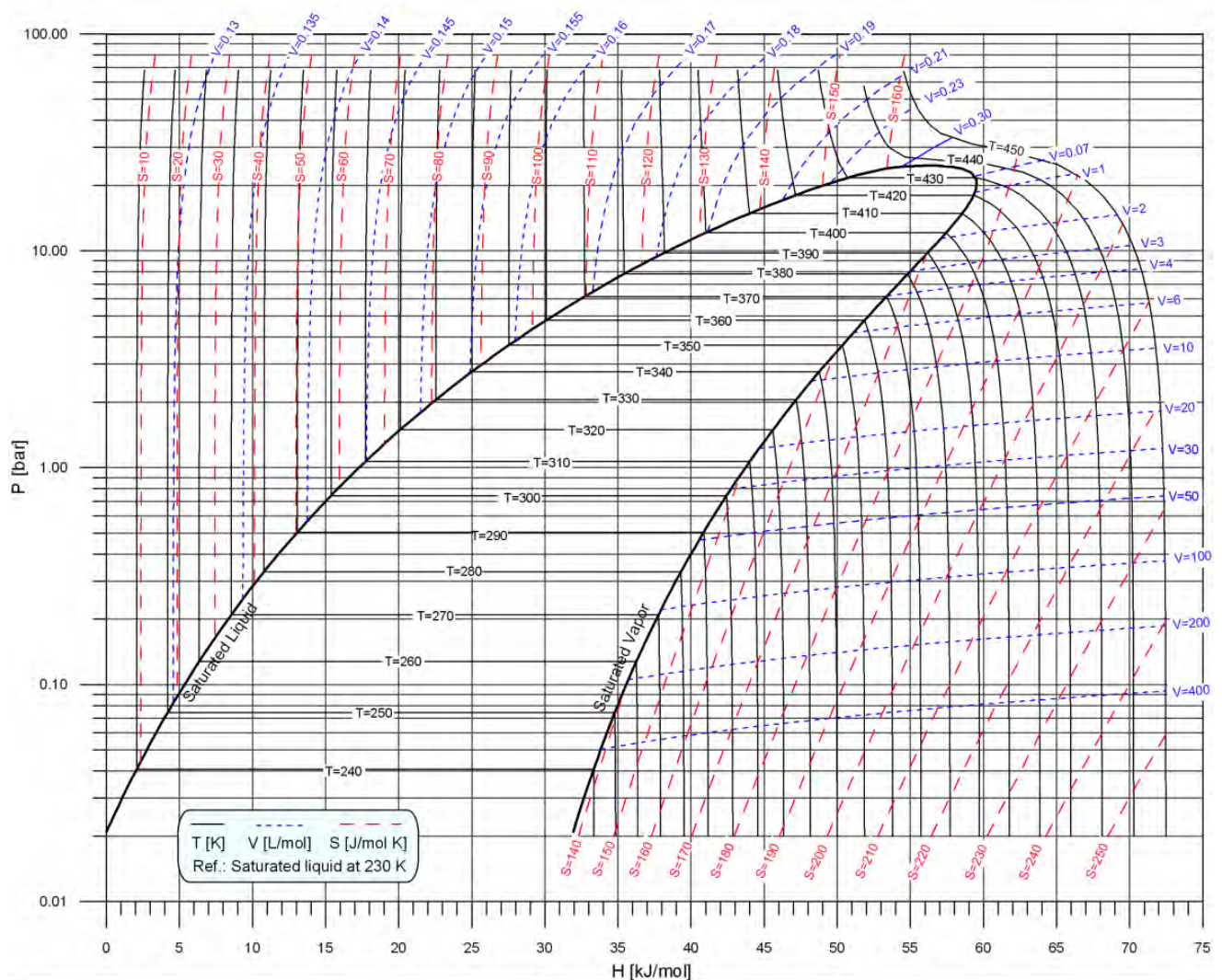


Figura 10 – Diagramma di Mollier, entalpia- pressione, del Novec 7000

## 2.4 Installazione del circuito di raffreddamento bifase

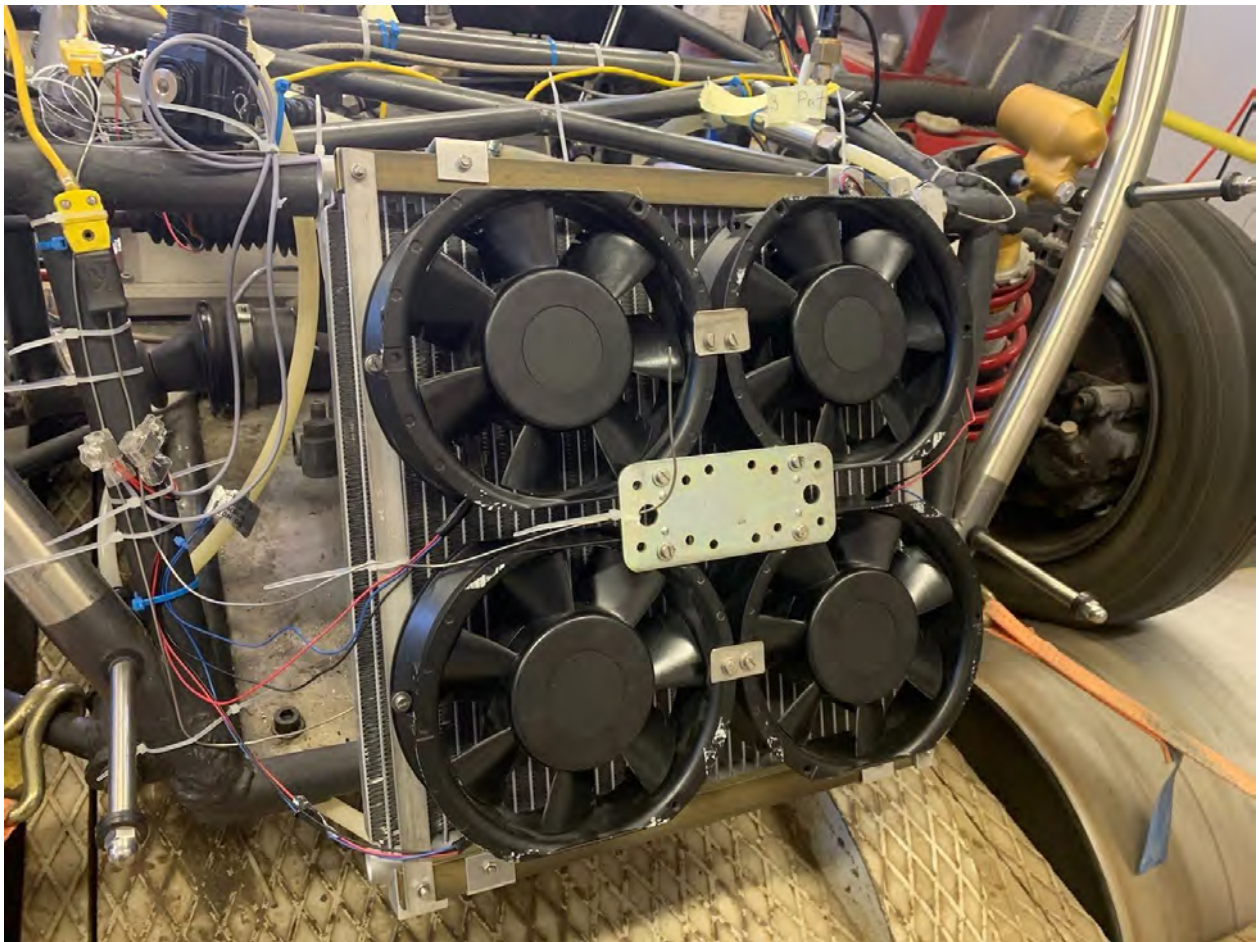
La realizzazione e l'installazione del circuito di raffreddamento bifase sono stati preceduti dalla rimozione del circuito di raffreddamento a liquido presente sul veicolo elettrico URBE. Tutti i componenti del circuito di raffreddamento a liquido (pompa, tubazioni, radiatore) sono stati rimossi, con l'eccezione del motore elettrico e dell'inverter. Questi ultimi sono stati ricondizionati per eliminare i depositi di calcare e di altro materiale dai condotti interni degli scambiatori di calore.

Le Figure 11 – 14 mostrano i dettagli dei componenti principali del circuito di raffreddamento bifase installati: il condensatore con le quattro ventole, il motore elettrico con i condotti di ingresso e uscita del fluido refrigerante, il serbatoio (Figura 14) in acciaio e l'inverter.

Anche l'impianto elettrico del veicolo è stato sottoposto ad una revisione completa ed è stato installato un nuovo pacco batterie (Figura 15).

In concomitanza della revisione dell'impianto elettrico, si è proceduto ad installare il sistema di acquisizione dati e il sistema di controllo realizzati dall'Università Roma Tre nell'ambito dello stesso progetto [3] (Report RdS/PTR(2020)/053). La Figura 16 mostra le scatole elettriche contenenti le schede dei sistemi di acquisizione dei sensori e di controllo della pompa e delle ventole. Tali scatole elettriche sono state posizionate sul fondo dell'abitacolo nello spazio ottenuto dalla rimozione del sedile del passeggero.

Il sistema di controllo, la cui schermata è riportata nella Figura 17, ha consentito di controllare in tempo reale l'andamento delle principali grandezze elettriche e fluidodinamiche e di impostare le volute condizioni di marcia.



**Figura 11 – Gruppo condensatore-ventole installati sul veicolo URBE**

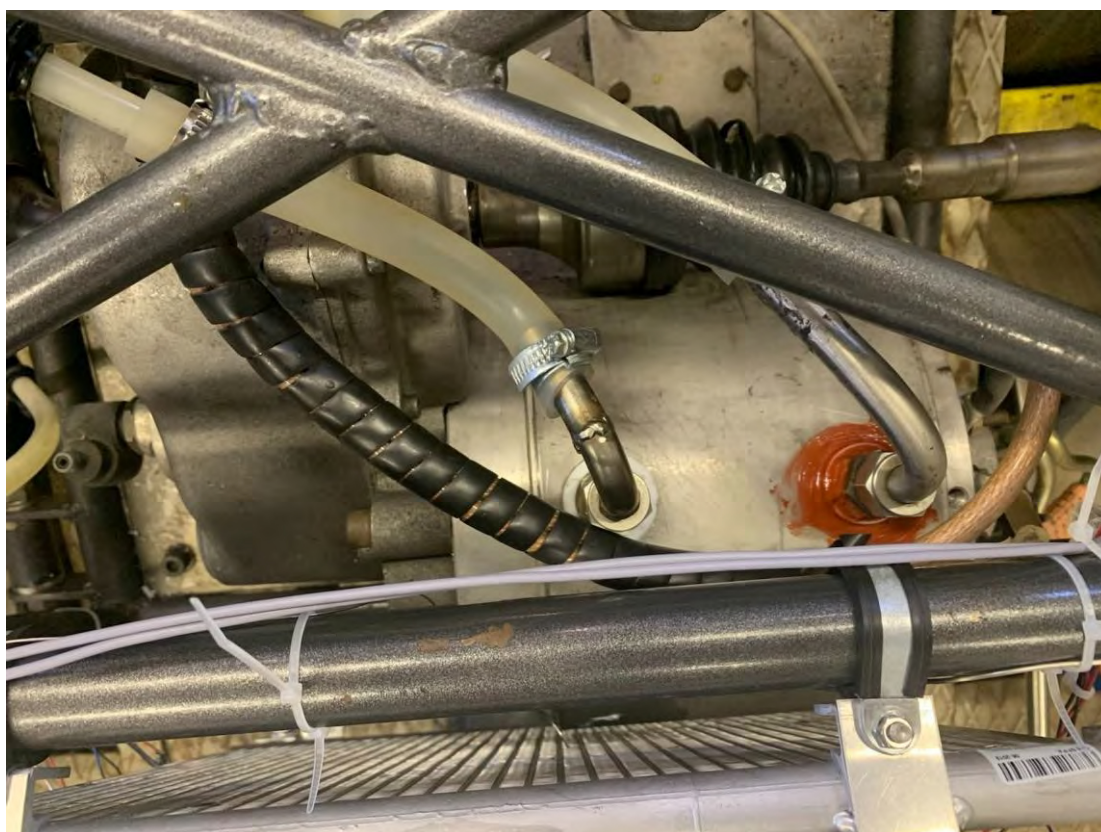


Figura 12 – Dettaglio dei condotti di ingresso e uscita del sistema di raffreddamento del motore elettrico



Figura 13 – Dettaglio dell'abitacolo del veicolo elettrico

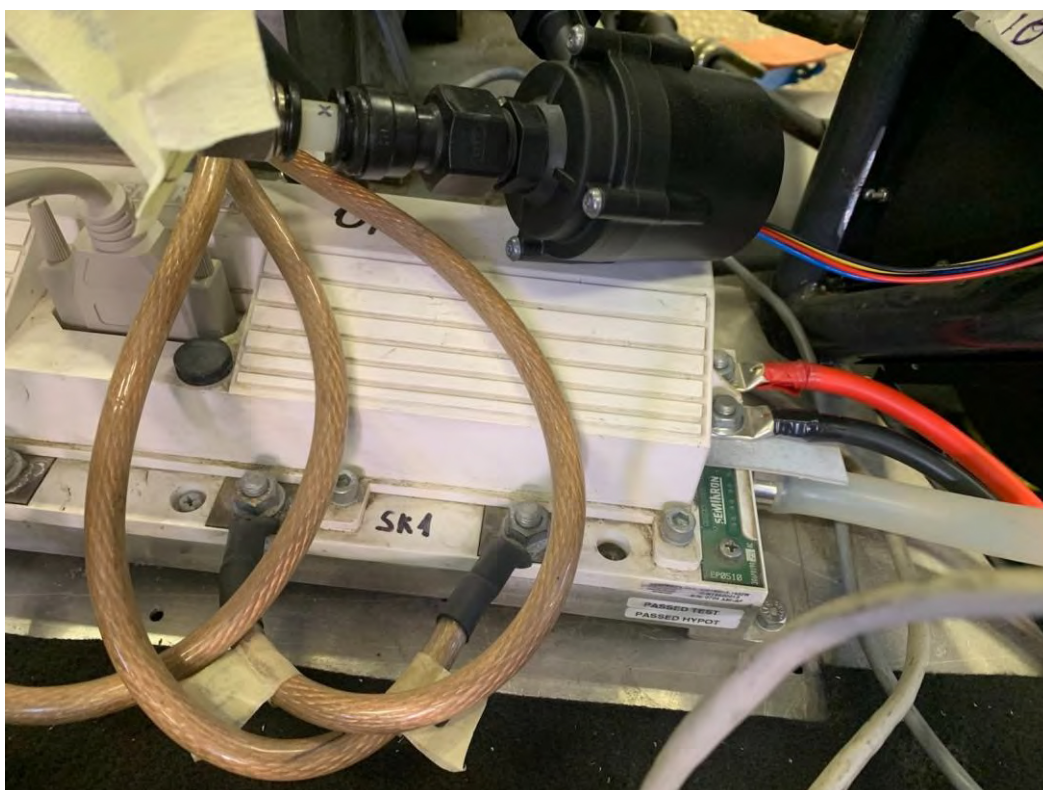


Figura 14 – Dettaglio del condotto di ingresso dello scambiatore dell'inverter della Semikron.



Figura 15 - Pacco batterie del veicolo elettrico URBE



Figura 16 – Sistema di controllo e di acquisizione dati installati a bordo del veicolo elettrico URBE

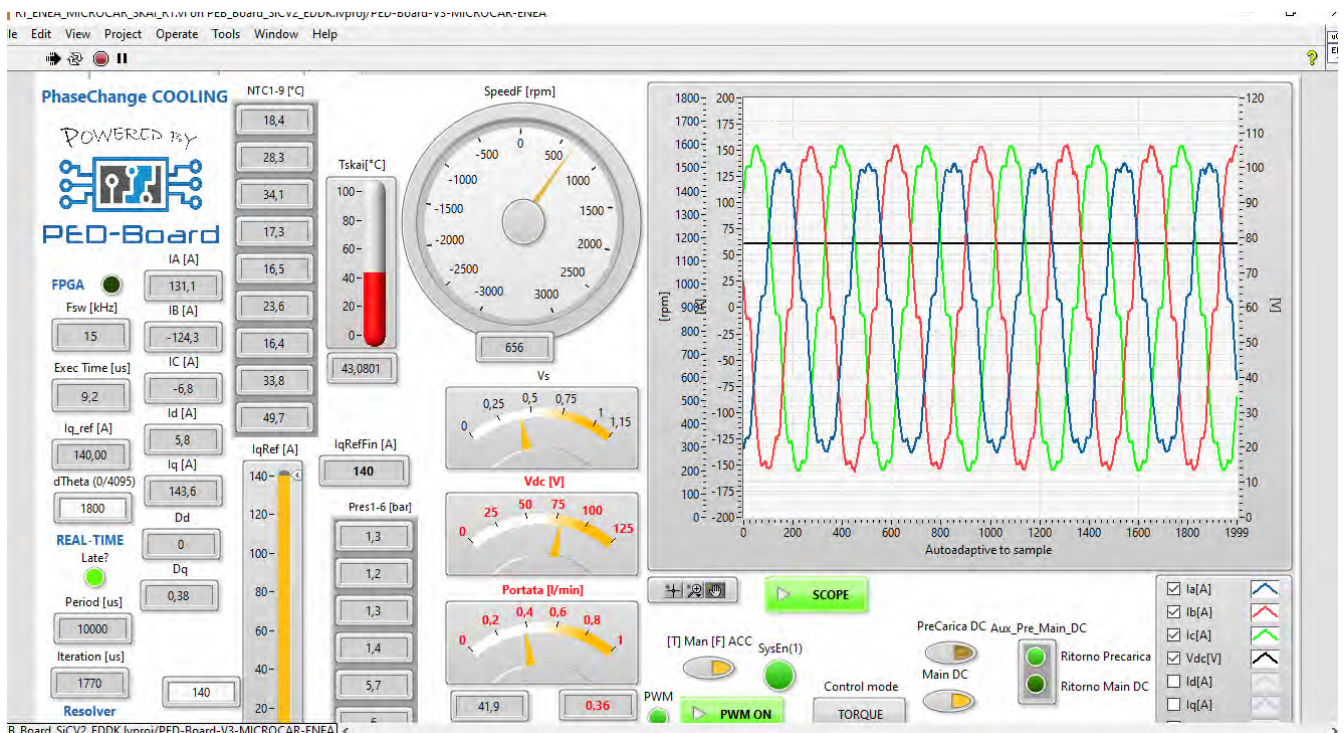


Figura 17 – Schermata del sistema di acquisizione e controllo

## 2.5 Prove del circuito di raffreddamento bifase

Di seguito vengono descritte brevemente le prove sperimentali che sono state condotte sul sistema di raffreddamento bifase installato sul veicolo elettrico URBE. Queste prove sono state condotte nella sala del banco a rulli dell'ENEA (Figure 18, 19, 20 e 21).

E' stata eseguita una serie di test iniziali di verifica del sistema elettrico e del sistema di raffreddamento bifase. Le verifiche sono state condotte a bassa potenza, facendo circolare nel circuito di raffreddamento il fluido refrigerante in regime monofase, quindi senza cambiamento di fase (evaporazione e condensazione); quindi si è testato il sistema ad alta potenza nelle condizioni di ebollizione in convezione forzata (flow boiling).

Il sistema di raffreddamento bifase ha superato con successo i test iniziali per verificare il funzionamento di tutti i sistemi: elettrico, di raffreddamento, di controllo e di acquisizione dati. Durante questi test si è posta una particolare attenzione sulle massime temperature di funzionamento dell'inverter e del motore elettrico. Il sistema di cooling ha dimostrato una notevole stabilità di funzionamento sia in condizioni stazionarie che dinamiche.

Successivamente ai test iniziali di verifica sono state condotte alcune prove per valutare il sistema di cooling in condizioni reali sfruttando la capacità del banco a rulli di simulare le condizioni di marcia su strada. E' stato provato il tipo di funzionamento più semplice, ossia a velocità costante su strada in salita con diverse

pendenze. In questo modo si è potuto verificare il comportamento a diverse potenze termiche da smaltire sia dal motore che dall'inverter.

I test sul banco a rulli sono stati condotti con velocità costante di 10 km/h con una coppia frenante di 10 Nm ed una temperatura ambientale di 16 °C. In queste condizioni la corrente circolante nell'inverter era di 140 A con una potenza termica da smaltire di 1092 W. Sono state provate varie portate del fluido refrigerante nel circuito di raffreddamento: 0.33 l/m, 0.60 l/m e 1 l/m. Per queste portate si sono registrate le seguenti temperature nell'inverter: 43.0 °C, 40.8 °C e 31.3 °C.

Il sistema di raffreddamento bifase si è ben comportato con diversi carichi termici da dissipare mantenendo la temperatura dell'elettronica ben al di sotto dei limiti tecnici. Come atteso, il parametro che influenza maggiormente il comportamento termico del sistema è rappresentato proprio dalla portata di refrigerante. A parità di carico termico imposto ovvero dissipato, all'aumentare della portata si riscontrano temperature minori dell'inverter.

La temperatura ambientale ha sicuramente un impatto significativo sul sistema. Per queste prime prove la temperatura ambientale era di 16 °C. La sala del banco a rulli, non essendo climatizzata, non ha consentito la regolazione della temperatura ambientale. Si prevedono ulteriori test nel prossimo periodo estivo per verificare la capacità di smaltimento alle temperature più elevate intorno a 40°C.



Figura 18 – Il veicolo elettrico URBE posizionato sul banco a rulli dell'ENEA

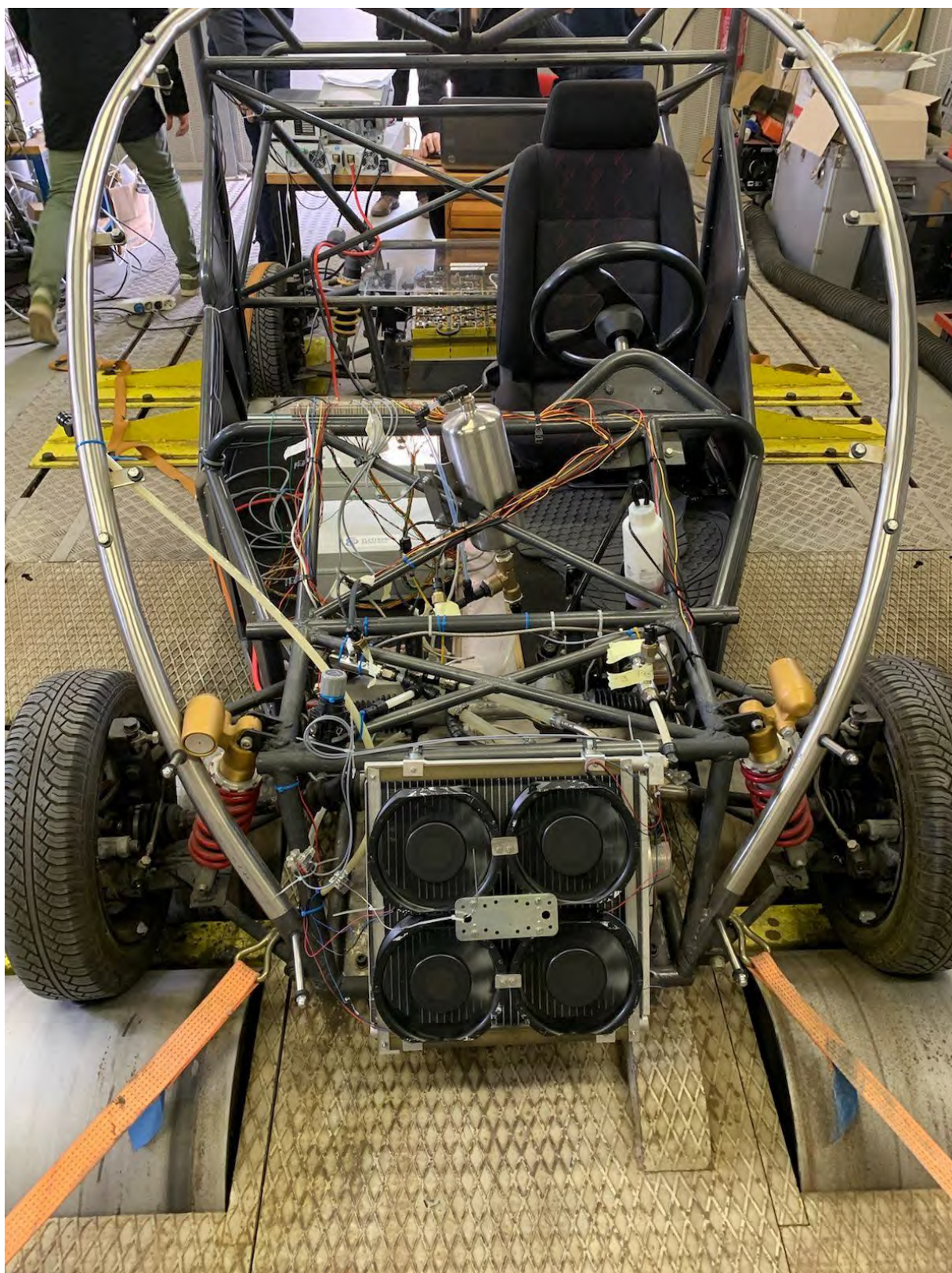


Figura 19 – Vista frontale del veicolo elettrico URBE posizionato sul banco a rulli dell'ENEA

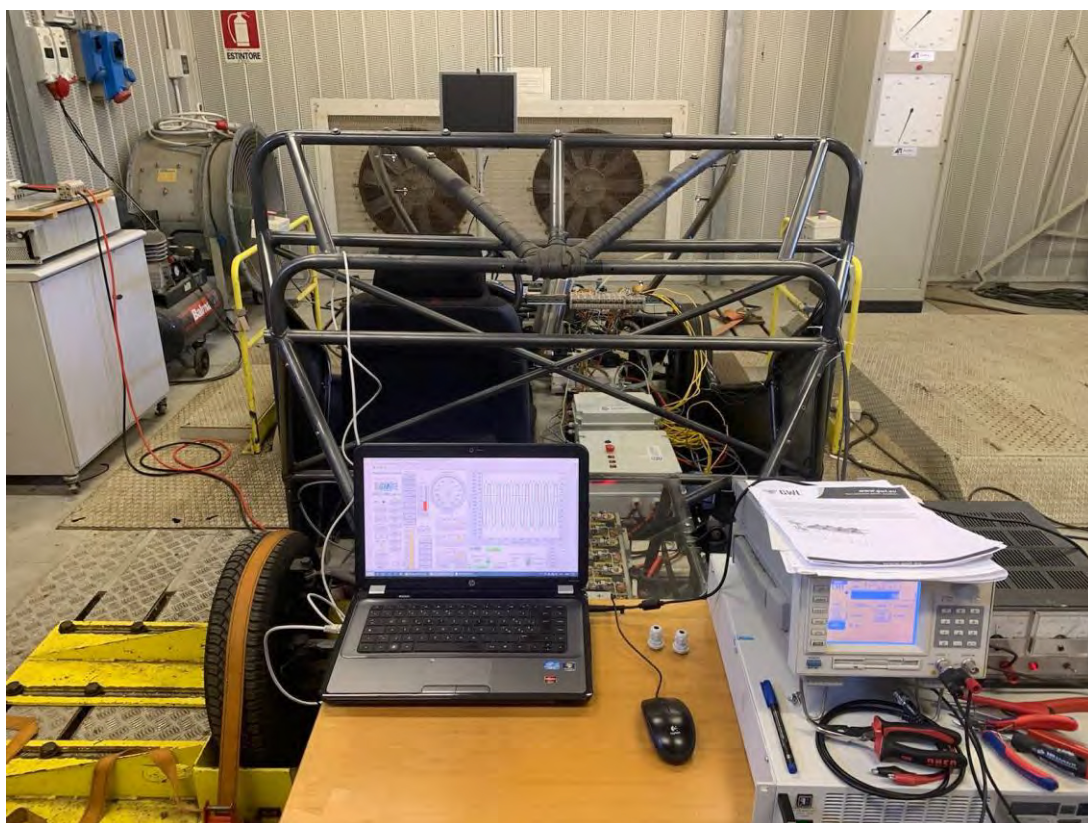


Figura 20 – Vista posteriore del veicolo elettrico URBE posizionato sul banco a rulli dell'ENEA



Figura 21 – Il veicolo elettrico URBE durante i test sul banco a rulli

### 3 Conclusioni

Nel presente rapporto è stato presentato il lavoro di modifica del veicolo elettrico dell'ENEA, denominato URBE. Gli obiettivi di tale lavoro hanno riguardato l'installazione di un sistema di raffreddamento innovativo di tipo bifase, la revisione dell'impianto elettrico e l'installazione di un nuovo pacco batterie. Il veicolo modificato ha consentito l'esecuzione di una campagna sperimentali finalizzate a testare il sistema di controllo termico di tipo bifase per l'elettronica di potenza installata a bordo di veicoli elettrici.

Nella campagna sperimentale sul banco a rulli le prove sono state condotte con velocità costante di 10 km/h con una coppia frenante di 10 Nm ed una temperatura ambientale di 16 °C. Il sistema di controllo termico ha dimostrato di garantire il raffreddamento dell'inverter a livelli di temperatura abbondantemente al di sotto dei limiti tecnici imposti dal costruttore (Semikron). Inoltre, il sistema ha consentito di dimostrare che la nuova tecnologia può essere considerata una valida alternativa ai sistemi di raffreddamento attualmente impiegati sui veicoli elettrici.

Infine, per le future applicazioni si prevedono ulteriori test in condizioni climatiche estreme: temperature estive (fino a 40 °C) e invernali (dell'ordine di 0°C) e test su strada.

### 4 Riferimenti bibliografici

1. L. Saraceno, L. Gugliermetti, A.Lattanzi, M. Morlacca, A. Scotini, L. Simonetti, G. Zummo, "Test di laboratorio e manuale d'uso del dispositivo per il two-phase cooling di componenti di auto elettriche", Report RdS/PTR2020/048
2. 3M, "3M Novec 7000 engineered fluid product information," no. November, 2005.
3. Alessandro Lidozzi, Luca Solero, Luca Bigarelli (Università degli Studi ROMA TRE), "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", Report RdS/PTR(2020)/053