



Test di laboratorio e manuale d'uso del dispositivo per il two-phase cooling di componenti di auto elettriche

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

L. Saraceno, L. Gugliermetti, A.Lattanzi, M. Morlacca, A. Scotini, L. Simonetti, G. Zummo (ENEA)

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

Work package: Mobilità

Linea di attività: 2.2 - Accumuli elettrochimici automotive: test di abuso elettrico e invecchiamento e sviluppo di sistemi per il controllo termico - avvio dei test e realizzazione del dispositivo

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.....	5
2.1 IMPIANTO SPERIMENTALE E.MO.T.I.CON.S.....	5
2.1.1 <i>Pompa volumetrica</i>	8
2.1.2 <i>Sezione di prova</i>	8
2.1.3 <i>Condensatore</i>	12
2.1.4 <i>Serbatoio</i>	13
2.2 FLUIDI DI LAVORO.....	14
2.3 MISURE E STRUMENTAZIONE	15
2.3.1 <i>Strumentazione analogica e catene di misura</i>	16
2.3.2 <i>Strumentazione digitale</i>	18
2.3.3 <i>Software di acquisizione e controllo dati</i>	19
2.4 MANUALE D'USO DI IMPIANTO E MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLE PROVE	28
2.4.1 <i>Setup del programma di acquisizione dati</i>	28
2.4.2 <i>Procedura di acquisizione</i>	29
2.5 RISULTATI SPERIMENTALI	30
2.5.1 <i>Matrice di prova</i>	30
2.5.2 <i>Risultati sperimentali dei test con acqua</i>	33
2.5.3 <i>Risultati sperimentali dei test con NOVEC7000</i>	34
2.5.4 <i>Risultati sperimentali dei test con etanolo</i>	35
2.5.5 <i>Risultati sperimentali dei test con R245FA</i>	48
3 CONCLUSIONI.....	56
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	57

Sommario

L'obiettivo del presente report è quello di analizzare sperimentalmente le prestazioni di alcune configurazioni di un sistema di raffreddamento bifase per l'elettronica di potenza di veicoli ibridi ed elettrici. La progettazione dell'impianto sperimentale utilizzato per l'esecuzione dei test è stata descritta nel rapporto "Progettazione dell'impianto sperimentale di tipo two-phase pumped loop" relativo alle attività svolte nel primo anno del Piano Triennale 2019-21 (Report RdS/PTR2019/029) [1]. L'impianto sperimentale di cui sopra ha come finalità lo studio in laboratorio della nuova tecnologia di controllo termico proposta e consente di effettuare test in condizioni variabili e controllabili di portata, temperatura e pressione del fluido di lavoro. I carichi termici tipici delle schede IGBT, presenti negli inverter dei veicoli elettrici, sono stati simulati da riscaldatori elettrici fino a potenze termiche di ca. 2000 W. Sono state testate diverse geometrie dell'evaporatore che, insieme al condensatore, rappresenta l'elemento cruciale per garantire la corretta gestione termica del componente elettronico da raffreddare. Sia l'evaporatore che il condensatore utilizzano la tecnologia dei microcanali che consente, in abbinamento al cambiamento di fase del fluido refrigerante, di raggiungere coefficienti di scambio termico estremamente elevati. L'evaporatore consente di raffreddare il componente elettronico, inverter o le batterie, mentre al condensatore avviene la cessione del calore all'aria esterna. In aggiunta, come fluidi termovettore sono stati testati alcuni refrigeranti con diverse caratteristiche termiche al fine di effettuarne un confronto prestazionale.

Il rapporto presenta infine una disamina dei risultati ottenuti: l'analisi si concentra sui valori di temperatura raggiunti dalle diverse configurazioni evaporatore-refrigerante quando viene fornito un valore prestabilito di potenza termica. Sono quindi riportati i confronti tra le varie configurazioni per evidenziarne le potenzialità e i rispettivi range di applicabilità; da questi confronti è stato possibile constatare il miglioramento nelle prestazioni portato da un sistema di raffreddamento bifase rispetto a uno monofase convenzionale.

1 Introduzione

Nel corso degli ultimi anni, a causa dell'impennata delle prestazioni dei componenti elettronici e della loro sempre maggiore miniaturizzazione, il controllo termico di tali dispositivi è diventato un problema estremamente delicato e critico in svariati ambiti dell'industria mondiale. Si pensi alle problematiche di raffreddamento dei processori dei computer ad alte prestazioni (workstation professionali), al controllo termico dei server di un Data Center HPC (High Performance Computing), fino alla gestione termica dell'elettronica di potenza dei veicoli elettrici (IGBT, batterie). Da questo quadro emerge l'esigenza di sviluppare nuovi sistemi di controllo termico che consentano di raffreddare più efficacemente densità di potenze molto elevate. I sistemi, semplici ed affidabili, finora maggiormente adottati, basati sul raffreddamento ad aria (air cooling) o a liquido (liquid cooling) sono infatti caratterizzati da una forte limitazione in termini di massima potenza termica asportabile, in particolare per le geometrie ridotte.

La progettazione di dispositivi e sistemi tecnologici, con dimensioni ridotte ma prestazioni invariate o aumentate, è divenuta quindi una delle sfide scientifiche più importanti affrontate nell'ultimo decennio: dalla capacità di asportare e trasferire calore in componenti sempre più efficienti e compatti derivano grandi vantaggi nell'ottimizzazione di tutti i prodotti finali così come nei processi industriali.

Il lavoro presentato in questo report si propone di fornire il proprio contributo alla attività di ricerca sulla tecnologia di controllo termico basata sul trasferimento di calore per ebollizione in convezione forzata in microcanali. La finalità precipua di tale investigazione risiede nella progettazione e realizzazione di un sistema innovativo di raffreddamento per dispositivi elettronici altamente performanti, con particolare attenzione al raffreddamento bifase per l'elettronica di potenza.

Nel seguito verranno quindi illustrate le attività svolte per la realizzazione e messa in opera dell'impianto E.MO.T.I.CON.S. dell'ENEA, che ha consentito l'esecuzione di alcune campagne sperimentali finalizzate a testare un innovativo sistema di controllo termico di tipo bifase opportunamente progettato per l'elettronica di potenza installata a bordo di veicoli elettrici ed ibridi dove il raffreddamento dell'inverter, del motore elettrico e delle batterie è un fattore limitante dello sviluppo. Tra questi, l'inverter, costituito da uno o più moduli IGBT, è il componente più critico da raffreddare. Nei moduli IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) degli inverter presenti a bordo dei veicoli e nelle centraline di ricarica delle batterie, si possono infatti raggiungere densità di potenza termica estremamente elevate, caratterizzate, in aggiunta, da distribuzioni non uniformi della temperatura e conseguenti elevati stress di natura termomeccanica sulle medesime superfici da raffreddare.

Nel presente lavoro saranno anche ampiamente mostrati e discussi i risultati delle prime campagne sperimentali condotte sull'impianto E.MO.T.I.CON.S. utilizzando dissipatori a microcanali con diverse geometrie, più fluidi di lavoro e condizioni operative variabili.

I risultati ottenuti saranno quindi utilizzati per la progettazione ottimale del prototipo di sistema di controllo termico che verrà realizzato nell'ambito delle attività previste nel prossimo piano annuale del PTR. Tale prototipo sarà infine installato su un prototipo di auto elettrica presente in ENEA, per la realizzazione di test sperimentali sul campo.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Impianto sperimentale E.MO.T.I.CON.S.

L'impianto sperimentale denominato E.MO.T.I.CON.S (acronimo di Electric MObility Thermal Innovative CONtrol System) (fig.1) è stato realizzato per lo studio di sistemi innovativi di tipo *"two-phase cooling"* per il raffreddamento di componenti elettronici per l'industria *"automotive"*, con particolare interesse ai sistemi di controllo di potenza delle auto elettriche ed ibride. L'impianto, in pratica, riproduce su banco il circuito di raffreddamento dei moduli IGBT di un veicolo elettrico.

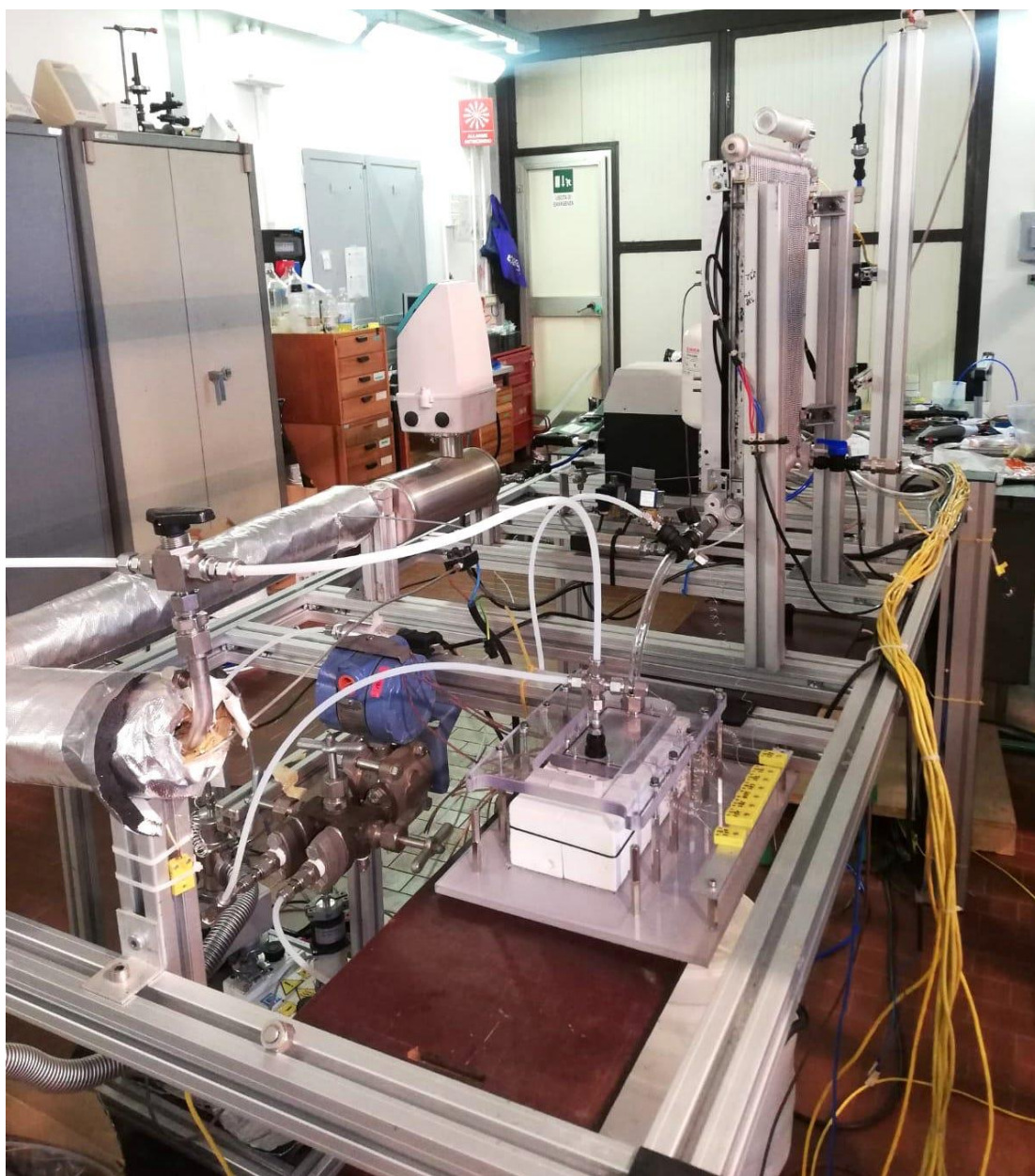


Figura 1. Impianto E.MO.T.I.CON.S.

La potenza termica sviluppata da un modulo IGBT durante il suo funzionamento è simulata attraverso un riscaldatore elettrico posizionato sotto un evaporatore multicanale a microcanali all'interno del quale avviene il cambiamento di fase del liquido refrigerante e che rappresenta, quindi, il dissipatore del sistema di raffreddamento.

L'impianto consente di valutare i coefficienti di scambio termico associati alle suddette applicazioni attraverso l'acquisizione dei dati relativi a temperature, pressioni e portata vigenti nel circuito di raffreddamento e nel riscaldatore, in modo da caratterizzare in toto il comportamento termofluidodinamico del fluido di lavoro al variare delle condizioni di lavoro testate.

I principali elementi presenti nel circuito sperimentale sono (fig.2):

- pompa volumetrica;

- sezione di prova (evaporatore + riscaldatore);
- condensatore (comprensivo di ventole);
- serbatoio di espansione;
- tubazione di collegamento.

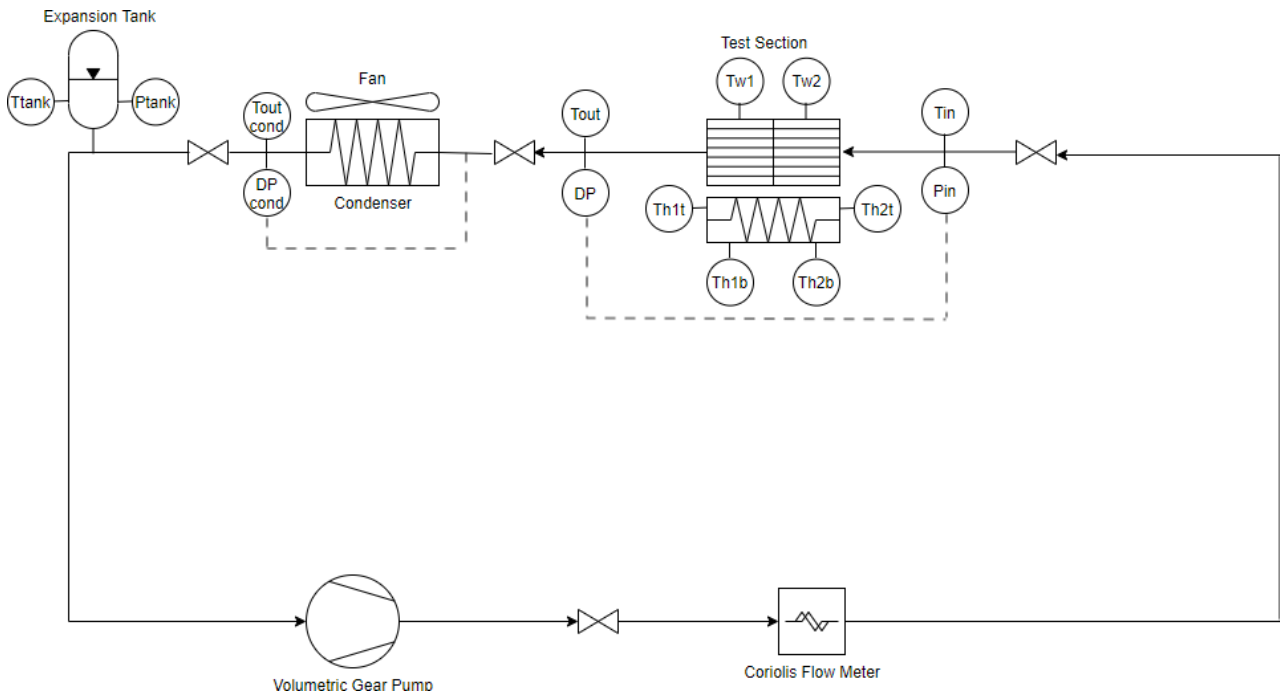


Figura 2. Layout impianto E.MO.T.I.CON.S. (configurazione con evaporatore 100x50)

La sezione di prova è composta da un riscaldatore e un evaporatore con coperchio trasparente per consentire la visualizzazione della parte interna e una possibile acquisizione, a mezzo di telecamera veloce, dei flow pattern del fluido alle diverse condizioni operative imposte.

La portata massica del refrigerante e la potenza termica del riscaldatore sono impostate dall'operatore; in particolare, la portata viene controllata grazie a un sistema automatico di regolazione della pompa. La pressione del sistema viene regolata tramite un sistema di regolazione automatica che consente di poterla mantenere a un valore costante durante l'esecuzione di una serie di test ovvero di consentire che essa vari liberamente. I valori di pressione nel circuito sono rilevati in corrispondenza del serbatoio (P_{tank}) e all'ingresso della sezione di prova (P_{in}) mentre due trasduttori di pressione differenziali misurano le perdite di carico nella sezione di prova (DP) e nel condensatore (DP_{cond}).

La temperatura del fluido viene misurata nel serbatoio, all'ingresso e all'uscita della sezione di prova e all'uscita del condensatore; inoltre, due termocoppie sono poste nell'evaporatore per misurare la temperatura di parete in ingresso (T_{w2}) e in uscita (T_{w1}), mentre altre quattro termocoppie sono poste all'interno del riscaldatore per misurare le temperature della parte superiore e inferiore del medesimo in corrispondenza della sezione di ingresso (Th_{2t} , Th_{2b}) e di uscita (Th_{1t} , Th_{1b}) dell'evaporatore.

La tubazione di raccordo tra i vari componenti è stata realizzata sia con tubi metallici in acciaio inox che con tubi plastici in PA11 (Nylon11). Per le connessioni sono stati impiegati sia raccordi metallici di tipo Swagelok/Parker che raccordi plastici ad innesto rapido DMfit o RS-Pro.

Nel seguito una descrizione più dettagliata dei componenti dell'impianto.

2.1.1 Pompa volumetrica

La pompa scelta per l'apparato sperimentale è una pompa ad ingranaggi a trascinamento magnetico con controllo a microprocessore, modello ISMATEC MCP-Z standard [2] (fig.3), che può fornire una portata da 2,4 a 230 l/h. La pompa è azionata da un motore a corrente continua che assorbe una potenza fino a 150 W e, a seconda della testa della pompa montata, può fornire un'ampia varietà di portate.

Gli ingranaggi della pompa sono in PTFE (Politetrafluoroetilene) e fibra di carbonio; possono resistere a temperature fino a 121 °C e sono compatibili con i fluidi di lavoro utilizzati per gli esperimenti.

La portata viene controllata via software dal sistema di controllo e acquisizione a mezzo di un regolatore PID che acquisisce istantaneamente il valore di portata del refrigerante misurato dal flowmeter e agisce tramite seriale variando il numero di giri della pompa affinché la portata rimanga costante e pari al valore inizialmente impostato.



Figura 3. Pompa volumetrica ad ingranaggi

2.1.2 Sezione di prova

La sezione di prova è composta da due elementi: il riscaldatore e l'evaporatore (fig.4).

Come precedentemente accennato, il riscaldatore viene utilizzato per simulare la potenza termica prodotta da un modulo IGBT di un veicolo elettrico; è un riscaldatore modulare, quindi è facile modificare la potenza massima generata aggiungendo o rimuovendo un modulo (fig.5), da un minimo di uno ad un massimo di tre.

Un singolo modulo è costituito da un blocco di alluminio di 50 x 50 mm, nel quale sono stati praticati tre fori passanti; all'interno di questi tre fori sono allocati tre riscaldatori a cartuccia cilindrici. Le cartucce cilindriche hanno un diametro di 9,5 mm e sono lunghe 50,8 mm (fig.6); ciascuna di esse può produrre una potenza massima di 400 W, con una tensione di alimentazione pari a 230 V. Per regolare la tensione, e

quindi la potenza erogata dalle cartucce, viene utilizzato un autotrasformatore Variac. Nel caso in cui tutti e tre i blocchi siano montati, la potenza massima prodotta sarà quindi pari a 3600 W.

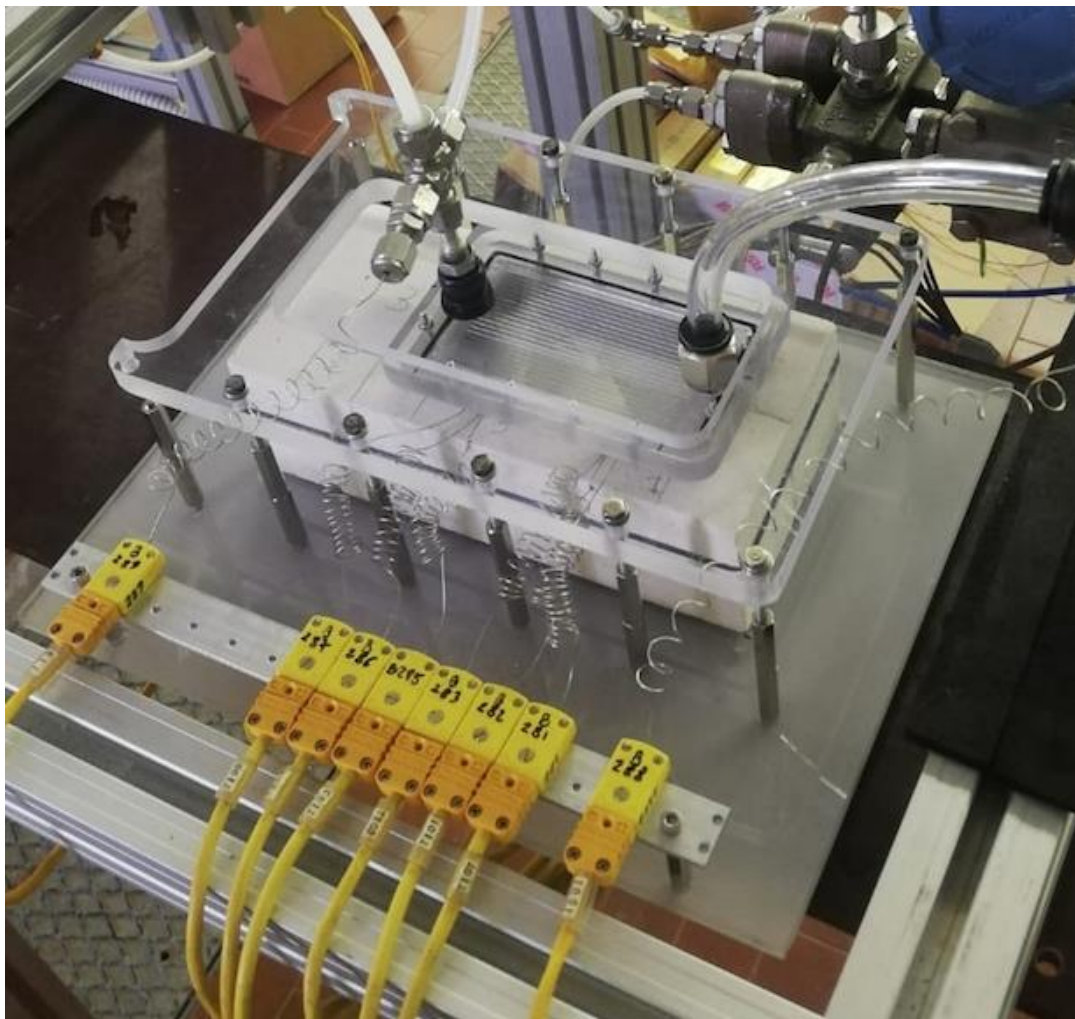


Figura 4. Sezione di prova



Figura 5. Riscaldatore modulare



Figura 6. Elemento riscaldante a cartuccia

L'evaporatore è costituito da una piastra alettata in alluminio, con due collettori (in ingresso e in uscita) ricavati alle due estremità della parte centrale alettata. La superficie di scambio termico è costituita quindi da canali rettangolari separati da alette di piccolo spessore. Questo tipo di scambiatore di calore consente di avere superfici di scambio termico molto elevate in rapporto al volume complessivo dello scambiatore.

La parte superiore dell'evaporatore è chiusa grazie ad un tappo in policarbonato trasparente che permette la verifica diretta delle condizioni del fluido e del corretto funzionamento del componente.

Nella parte inferiore dell'evaporatore sono ricavati longitudinalmente dei minicanali per l'inserimento di termocoppie per la misura delle temperature di parete in corrispondenza delle sezioni di ingresso e uscita dell'evaporatore, a una distanza di circa 25 mm dall'estremità (lato corto) dell'evaporatore.

È possibile testare tre diverse geometrie di evaporatore con area alettata (lunghezza x larghezza) di 50x50 mm, 100x50 mm e 150x50 mm (fig.7) sfruttando la modularità del riscaldatore adattabile all'evaporatore utilizzando rispettivamente uno, due o tre blocchi di alluminio.

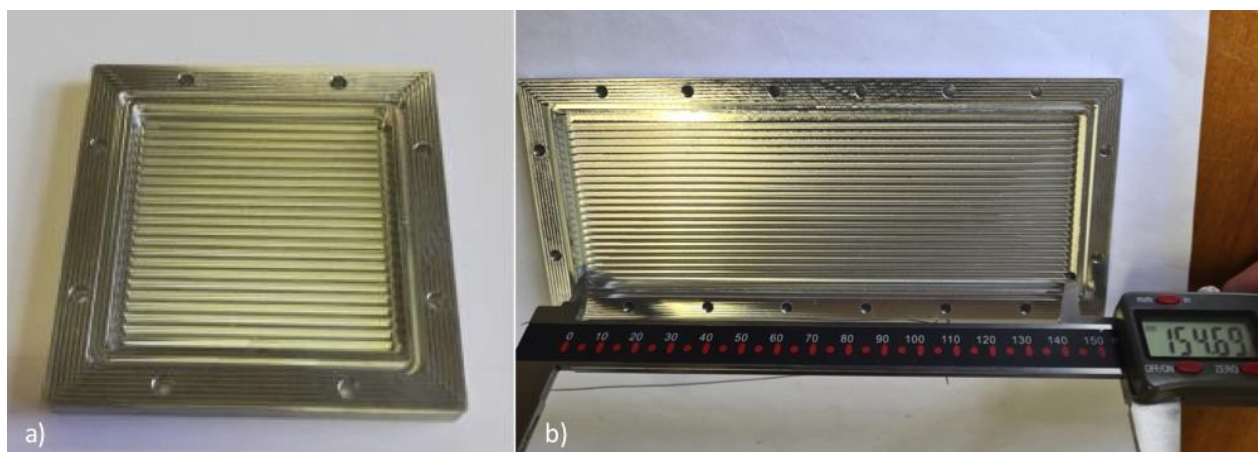


Figura 7. a) evaporatore 50x50 mm; b) evaporatore 150x50 mm

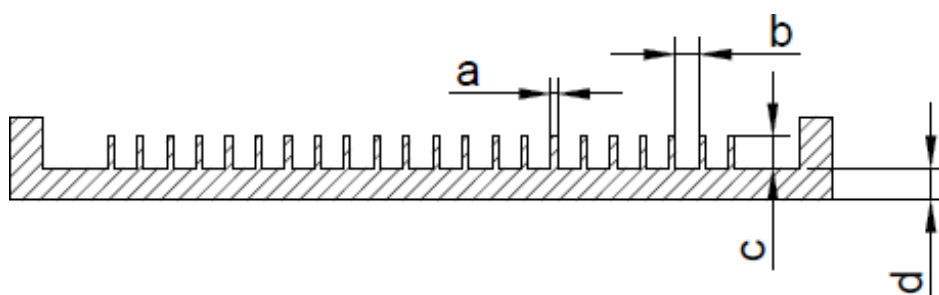


Figura 8. Sezione trasversale dell'evaporatore

In figura 8 viene mostrato un disegno schematico dell'evaporatore dove:

- a [mm] spessore alette;
- b [mm] larghezza canali;
- c [mm] altezza alette;
- d [mm] spessore base evaporatore.

I valori dei parametri a , b , c e d possono variare per ciascuna delle tre geometrie dell'evaporatore di cui sopra.

Nella campagna sperimentale oggetto del presente report sono state testate quattro diverse configurazioni di evaporatore: si tratta di due evaporatori 100x50 con diversi valori di a , b e c , in cui il gap tra la sommità delle alette e il coperchio in polycarbonato è stato o meno eliminato inserendo sottili fogli di polycarbonato (codice NG per le configurazioni senza gap). Nel seguito si farà riferimento a tali due evaporatori come A100 e A100-2 (fig.9): la A100-2 presenta una superficie di scambio termico maggiore della A100.

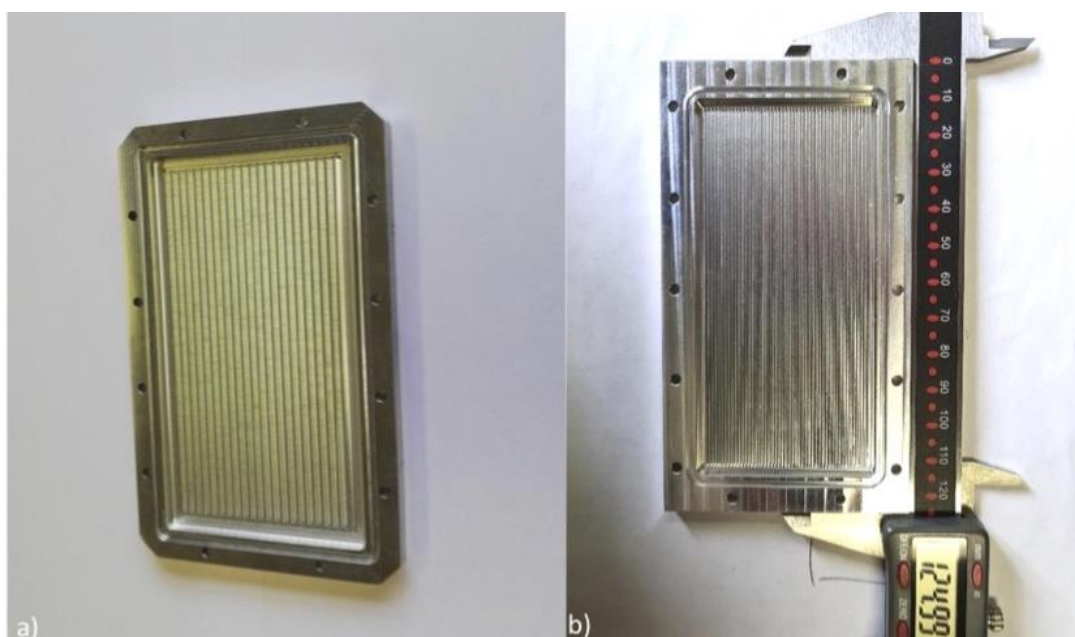


Figura 9. Evaporatori 100x50: a) A100; b) A100-2

Una criticità riscontrata nei test sperimentali, presente anche nelle applicazioni reali, è rappresentata dal collegamento dell'evaporatore ai riscaldatori: la giunzione deve essere resistente e in grado di ridurre al minimo la resistenza termica. Per assolvere a questo compito è stato utilizzato uno strato sottile di pasta termoconduttiva con una conducibilità termica di 10 W/m K; in questo modo si elimina il gap di aria dovuto alle microscopiche imperfezioni delle superfici dell'evaporatore e del riscaldatore e si riduce al minimo la conseguente resistenza termica. È importante interporre la giusta quantità di grasso tra i riscaldatori e l'evaporatore: se il grasso termico non è sufficiente non coprirà tutta la superficie e la conduzione sarà compromessa; se invece il grasso termico è eccessivo la resistenza termica aumenterà e quindi, anche in questo caso, la trasmissione del calore risulterà compromessa.

Il riscaldatore è inserito in un contenitore in mattoni refrattari isolanti (fig.10), in modo da ridurre al minimo le dispersioni termiche verso l'ambiente; questi mattoni possono resistere a temperature di circa 1400°C e vengono lavorati mediante asportazione di materiale.

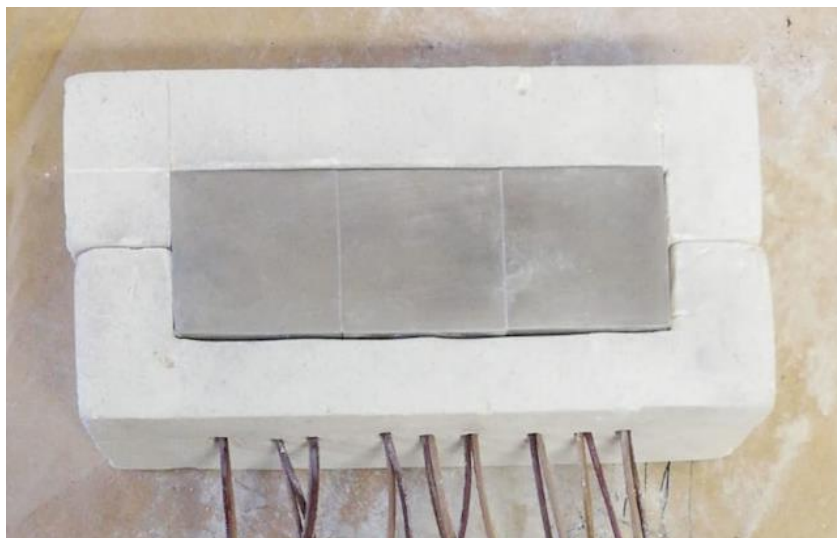


Figura 10. Sistema isolante in mattone refrattario

2.1.3 Condensatore

Il condensatore è posto a valle della sezione di prova e consente di smaltire verso l'ambiente esterno (pozzo termico) il calore "prelevato" dal fluido che cambia di fase all'interno dell'evaporatore. Il refrigerante entra nel condensatore quindi come miscela liquido-vapore per poi fuoriuscirne in fase liquida dirigendosi in aspirazione alla pompa. Nella campagna sperimentale effettuata sono stati testati due condensatori, entrambi del tipo a batteria alettata. Il primo condensatore, C1, è stato utilizzato per alcuni test comparativi con studi precedenti con il fluido NOVEC7000. Tale condensatore è dotato di sei ventole montate anteriormente alla zona alettata, in grado di fornire una portata d'aria massima di $340 \text{ m}^3/\text{h}$; la larghezza del condensatore è di 435 mm, l'altezza è di 352 mm e lo spessore è di 20 mm (fig.11). Le ventole sono alimentate a 24 V e hanno una regolazione on/off.



Figura 11. Condensatore C1

Il condensatore C1 era dotato di un filtro nella sezione di ingresso, elemento che introduceva delle perdite di carico indesiderate, per cui si è deciso di sostituirlo con un secondo, più grande e senza il filtro in ingresso (C2).

Il secondo condensatore a batteria alettata è dotato di quattro ventole utilizzate per forzare un flusso d'aria nel condensatore e raffreddare il fluido di lavoro; anche in questo caso non è possibile controllare la velocità di rotazione delle ventole (regolazione on/off) ma è possibile alimentare separatamente due ventole per volta in maniera tale da parzializzare, quando necessario, la portata d'aria attraverso il condensatore.

Le dimensioni principali del secondo condensatore utilizzato per la prova sono:

Altezza della zona alettata: 368,3 mm

Larghezza dell'area alettata: 330,2 mm

Diametro tubo di ingresso: 10 mm

Diametro tubo di uscita: 8 mm

Altezza alette: 7,75 mm

Larghezza alette: 0,1 mm

Distanza tra due alette: 3 mm

I ventilatori forniscono la portata massima alla tensione di 24 V; per posizionarli davanti al condensatore e coprirne l'intera superficie è stato realizzato un supporto costituito da due tondini di alluminio e lo spazio vuoto all'interno dei ventilatori è stato chiuso con polistirolo per ottenere un flusso più uniforme. Sul condensatore è stata eseguita una prova di tenuta utilizzando azoto alla pressione di 4 bar e non sono state riscontrate perdite significative. Sono state inoltre inserite due valvole in ingresso ed uscita al condensatore per consentirne la sostituzione senza perdita eccessiva di refrigerante dal resto del circuito.

2.1.4 Serbatoio

Lo scopo del serbatoio (fig.12) posto all'uscita del condensatore è quello di regolare la pressione dell'impianto agendo sulla superficie libera del fluido.

Per impostare la pressione si utilizza un sistema di pressurizzazione collegato ad una bombola di azoto e regolato con due elettrovalvole controllate via software: quando è necessario aumentare la pressione si apre la valvola di ingresso e l'azoto compresso entra nel serbatoio; quando invece si deve diminuire la pressione, si apre la valvola di scarico, e l'azoto (ed eventualmente parte di vapore del refrigerante) fuoriesce dal serbatoio.

Il sistema di controllo regola automaticamente la pressione mantenendola nel *range* $P_{set} \pm DP$, dove P_{set} è il valore di pressione desiderato e DP è un valore di offset per evitare la continua apertura e chiusura delle valvole; il valore di DP può essere variato dall'operatore. È possibile inoltre all'occorrenza bypassare il sistema automatico di controllo della pressione ed effettuare una regolazione manuale.

Un'altra importante funzione del serbatoio è quella di separare la parte di fluido eventualmente non condensata e quindi ancora in fase vapore, dalla parte in fase liquida. Per far sì che ciò accada, il tubo proveniente dal condensatore entra nel serbatoio ad un'altezza pari a circa la metà dell'altezza complessiva; il tubo di uscita dal serbatoio è posto altresì in fondo al serbatoio: in tal guisa si è certi che la pompa, posizionata a circa 1 m al di sotto del serbatoio, aspiri solamente la fase liquida evitando quindi indesiderati fenomeni di cavitazione.

Per effettuare i test con una pressione inferiore a 1 bar (pressione atmosferica), la valvola di uscita non è stata più collegata all'ambiente, ma è stato implementato un serbatoio secondario: utilizzando una pompa

a vuoto la pressione nel serbatoio secondario poteva essere ridotta fino al valore di 0,01 mbar ca.; aprendo opportunamente la valvola di cui sopra, è stato possibile ridurre la pressione nel serbatoio primario e, quindi, in tutto il circuito.



Figura 12. Serbatoio

2.2 Fluidi di lavoro

Sono stati testati diversi fluidi per identificare il miglior liquido di raffreddamento per l'applicazione oggetto del presente report.

Il primo fluido utilizzato è stato il NOVEC 7100 (C₄F₉OCH₃) [3], un fluido trasparente e inodore sviluppato per sostituire le sostanze con un alto potenziale di riduzione dell'ozono (ODP) e con un elevato potenziale di riscaldamento globale (GWP). Il suo punto di ebollizione (61 °C a 1 atm) e la bassa tensione superficiale rendono questo fluido particolarmente adatto per essere utilizzato come detergente o solvente in molte applicazioni industriali. Questo fluido non tossico è stato utilizzato principalmente per pulire e calibrare il circuito; alcuni test sono stati effettuati per valutare le dispersioni termiche nella sezione di prova verso l'ambiente circostante e valutare quindi per ogni potenza elettrica imposta al riscaldatore la potenza netta trasferita all'evaporatore e quindi al fluido refrigerante.

Il secondo fluido utilizzato è stato il NOVEC 7000 (C₃F₇OCH₃) [4]: un fluido non infiammabile a basso GWP sviluppato come fluido di raffreddamento per reattori chimici e per il settore dei semiconduttori. Questo fluido è caratterizzato da una temperatura di ebollizione di 34 °C (a 1 atm), una densità in fase liquida di 1400 kg/m³ e un calore latente di vaporizzazione di 142 kJ/kg; è un fluido atossico, non corrosivo, con eccellenti proprietà dielettriche. Ciò lo rende adatto alle applicazioni di controllo termico di dispositivi elettronici, in quanto, in caso di guasto del sistema e perdite, non si avrebbero danni da corto circuito sulla componentistica.

Alcune prove sono state effettuate utilizzando acqua demineralizzata in monofase; in questo modo è stato possibile confrontare i risultati di un classico sistema di raffreddamento monofase con il nuovo sistema bifase in fase di sviluppo.

Il quarto fluido utilizzato è stato una miscela di etanolo ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) e acqua (96% di etanolo e 4% di acqua in massa). Utilizzando il software REFRPROP è possibile ottenere le proprietà della miscela a diverse condizioni: il punto di ebollizione a 1 atm è $78,3^\circ\text{C}$, la densità della fase liquida è 746 kg/m^3 mentre il calore latente di vaporizzazione si attesta a valori prossimi a 900 kJ/kg .

L'ultimo fluido testato è l'R245FA (Pentafluoropropano, $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CHF}_2$): è un fluido incolore, non infiammabile, atossico e non nocivo per l'ozono, tipicamente utilizzato come fluido di lavoro per la climatizzazione industriale e residenziale. I principali svantaggi di questo fluido sono il suo GWP che è 1030 (in ogni caso è inferiore al valore soglia di 1500) e il costo maggiore rispetto ad altri refrigeranti. La temperatura di ebollizione è $15,3^\circ\text{C}$ a 1 atm, la densità della fase liquida (a 0°C) è 1338 kg/m^3 , il calore specifico della fase liquida è $1,36\text{ kJ/kgK}$ e il calore latente di vaporizzazione è $196,05\text{ kJ/kg}$.

Nella tabella 1 sono riassunte le principali caratteristiche dei fluidi di lavoro utilizzati nella campagna sperimentale.

Tabella 1: Principali caratteristiche dei fluidi di lavoro

Fluid	Boiling Point (1 atm) [$^\circ\text{C}$]	Latent heat of vaporisation [kJ/kg]	Specific heat [kJ/kgK]	GWP [-]	ODP [-]
NOVEC7000	34	142	1,24	530	0
Ethanol/Water	78,3	910	3,06	-	-
R245FA	15,3	196,05	1,36	1030	0

2.3 Misure e strumentazione

I processi termoidraulici che evolvono nelle varie zone costituenti l'impianto, sono "controllati" e "sentiti" tramite la misura, in punti opportuni, delle variabili di processo ovvero temperatura, pressione, portata e potenza applicata. Ciascun punto di misura costituisce una grandezza a cui è associata una catena di strumentazione: a quest'ultima viene affidata la sola funzione di rilevare i valori della grandezza misurata.

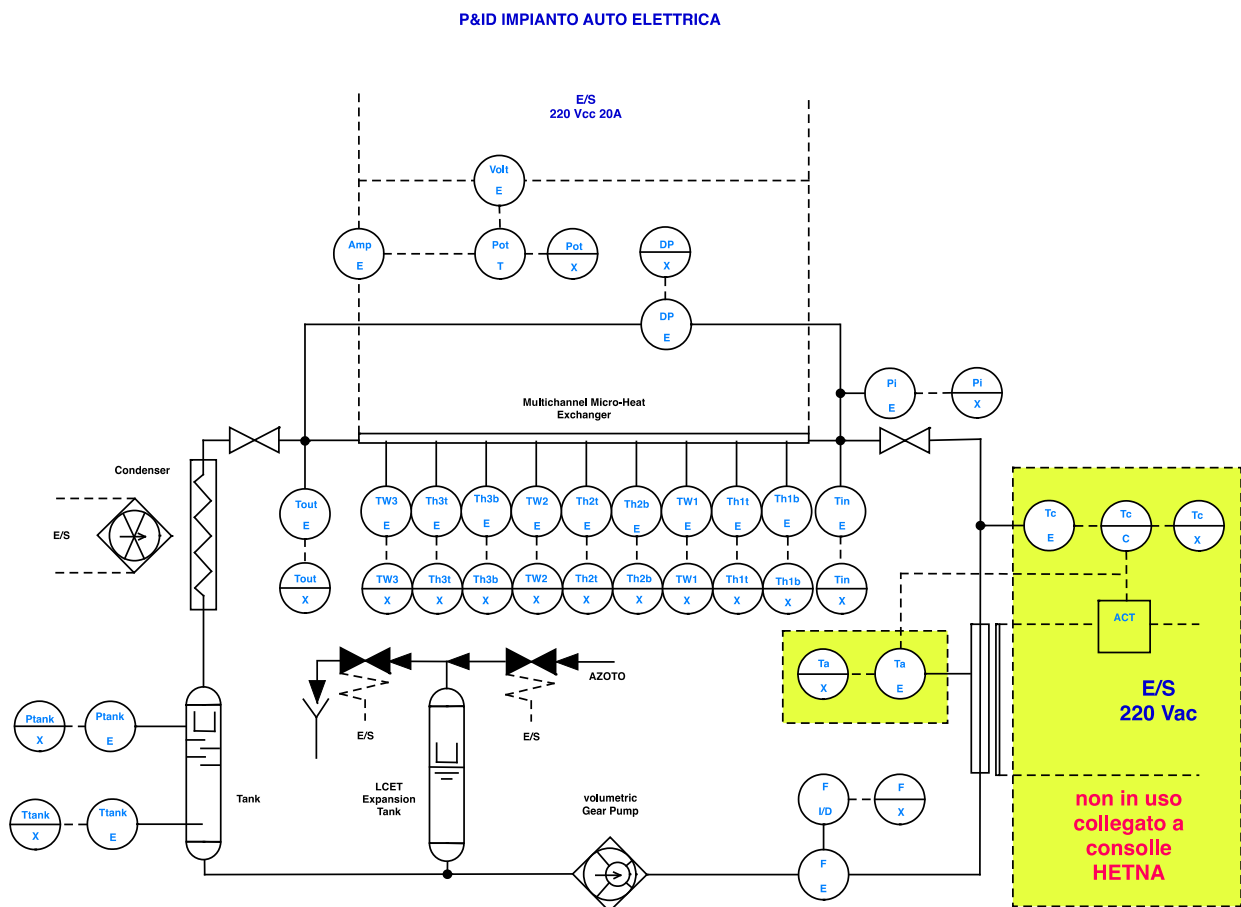
In figura 13 viene mostrato il P&ID dell'impianto nella sua configurazione più completa corrispondente a quella in cui viene testato l'evaporatore da $150 \times 50\text{ mm}$ accoppiato al riscaldatore con tre moduli. Si può notare anche la presenza (in giallo) di un preriscaldatore elettrico per il controllo della temperatura in ingresso all'evaporatore, elemento però non utilizzato nella campagna sperimentale oggetto della presente trattazione.

Ogni catena di strumentazione può essere divisa in due parti distinte:

- una catena di misura costituita essenzialmente da un "sensore": elemento primario (E), trasmettitore (T) e da opportune apparecchiature : convertitori e/o condizionatori (D), regolatori (C), ecc che convertono e condizionano il segnale in grandezze (tensione, corrente) tali da assicurare l'utilizzazione con il massimo di affidabilità.
- una catena funzionale, posta in cascata a quella di misura: ha lo scopo principale di acquisire (X) il segnale misurato.

La strumentazione dell'impianto può essere suddivisa in "analogica" e "digitale".

La strumentazione analogica ha lo scopo di sentire in continua il valore della grandezza misurata. La strumentazione digitale ha il compito di acquisire i valori delle varie grandezze, misurati in maniera discreta in istanti e ad intervalli opportuni. Tali misure, che costituiscono i "dati del processo", vengono, in tempo reale, memorizzate, elaborate, visualizzate in grafico e indicate in unità ingegneristiche.



2.3.1 Strumentazione analogica e catene di misura

La strumentazione inserita nell'impianto sperimentale di prova ha la funzione principale di consentire la registrazione dei valori di processo, nei vari punti prescelti, in condizioni di lavoro normale o in condizioni transitorie.

La catena di misura della pressione differenziale, inserita a cavallo della sezione di prova, ha, come elemento primario, un sensore di pressione a variazione capacitiva. Le catene di misura della pressione, inserite sull'impianto, hanno, come elemento primario, un sensore di pressione al silicio, micro-lavorato, incapsulato in un assieme metallo-vetro per garantire il massimo isolamento sia elettrico che fisico dal fluido o gas di processo. In ambedue i casi un diaframma in hastelloy trasmette la pressione al sensore tramite una separazione con olio al silicone. Un circuito elettronico, incorporato nel corpo del trasmettitore, permette la calibrazione in unità ingegneristiche, la compensazione termica e consente le regolazioni di zero e campo. Il segnale d'uscita è un segnale in corrente pari a 4-20 mA, proporzionale alla pressione misurata, e viene inviato, una volta convertito in un segnale 1-5 Vcc tramite una resistenza ad alta precisione del valore di 250 ohm, direttamente al sistema di acquisizione dati.

Nel circuito sperimentale sono posizionati due sensori di pressione assoluta PTX 600 [5], in corrispondenza della sezione di ingresso dell'evaporatore e del serbatoio. Il PTX600 (fig.14) è un trasmettitore di pressione sviluppato da General Electric, adatto per applicazioni di ricerca grazie al suo alto livello di stabilità e bassa incertezza. Questo sensore garantisce una bassa incertezza, $\pm 0,08\%$ Fondo Scala (FS); il range è pari a 0-2,5 bar abs.

Per misurare con elevata precisione la caduta di pressione attraverso la sezione di prova, e quindi la pressione in uscita, viene utilizzato un misuratore di pressione differenziale: lo strumento è un trasmettitore di pressione differenziale 1151 DP5 Rosemount. L'intervallo di misura di questo sensore è 0-1860 mbar e l'incertezza è $\pm 0,75\%$ del fondo scala.



Figura 14. Trasduttore di pressione PTX600

Per ciò che concerne la catena di misura della temperatura, tutti gli elementi primari sono costituiti da termocoppie Cr/Al tipo K con diametro esterno 0,5 mm, giunto caldo isolato, guaina esterna in AISI 316. Il segnale $-10+10$ mV prelevato in uscita dalle termocoppie è inviato alla scheda di acquisizione dati, tramite il giunto di compensazione a 0°C o direttamente. Il segnale viene quindi convertito nel relativo valore di temperatura usando la legge di conversione ricavata dal proprio certificato di taratura rilasciato da un centro SIT, mentre per quelle che ne sono sprovviste e che non transitano sul giunto di compensazione a 0°C , il sistema di acquisizione dati, oltre a compensare la temperatura, effettua una conversione adottando la legge di conversione standard ovvero una legge ottenuta effettuando in Laboratorio una calibrazione a mezzo di bagno termostato e termoresistenza PT100 calibrata, garantendo così un'incertezza nella misura inferiore a $0,5^{\circ}\text{C}$ sulla lettura (RD).

Per la sezione di prova 100×50 mm vengono utilizzate sei termocoppie: quattro nel riscaldatore (fig. 5) , Th1b, Th1t, Th2b, Th2t, (1=uscita, 2=ingresso, b=bottom, t=top) e due nell'evaporatore, per misurare le temperature di parete Tw1 e Tw2. La medesima tipologia di termocoppie è impiegata per misurare la temperatura del fluido all'ingresso e all'uscita della sezione di prova (Tin e Tout).

Per la misura della temperatura del fluido nel serbatoio (Ttank) viene utilizzata una termocoppia tipo K da 1 mm di diametro, sommersa sotto la superficie della fase liquida.

il segnale $-10+10$ mV proveniente dalle termocoppie, prelevato dal giunto di compensazione a 0°C viene inviato direttamente alla scheda di acquisizione dati, qui il loro valore viene convertito nel relativo valore di temperatura usando la legge di conversione ricavata dal certificato di taratura rilasciato da un centro SIT, mentre per le altre che ne sono sprovviste e che non transitano sul giunto di compensazione a 0°C il sistema di acquisizione dati oltre a compensare la temperatura converte il segnale in temperatura adottando la legge di conversione standard.

La misura della potenza assorbita dai riscaldatori della sezione di prova è ottenuta tramite un trasmettitore di potenza SINEAX P530 della Camille Bauer con ingressi 230 Vac e 5 Aac e uscita proporzionale alla potenza 0-1150 watt uguale a 4-20 mA; poiché l'assorbimento dei riscaldatori della sezione di prova realizzato con riscaldatori a cartuccia arrivano ad un massimo di 16 A, la corrente inviata al trasmettitore di potenza è stata prelevata da un TA (Trasformatore Amperometrico) 20/5 Ampere e classe di precisione 0. Il segnale di uscita 4-20 mA del trasmettitore di potenza viene inviato, una volta convertito in un segnale 1-5 Vcc tramite un resistenza ad alta precisione del valore di 250 ohm, al sistema di acquisizione e qui convertito in misura di potenza tramite opportuna legge di conversione. Poiché durante le fasi di collaudo dell'impianto erano state riscontrate fluttuazioni anomale del valore della potenza fornita, è stato inserito all'uscita del trasmettitore di potenza, e prima di connettersi al sistema di acquisizione dati, un opto

isolatore della Camille & Bauer con range di ingresso e uscita 0-20 mA; quanto sopra ha consentito di ottenere un netto miglioramento della stabilità del segnale acquisito.

La catena di misura della portata del fluido di lavoro è costituita da un trasmettitore di portata massica che si basa sulla legge di forza di Coriolis, come elemento primario, e da un convertitore di segnale a microprocessore, inserito direttamente sul trasmettitore, con uscita analogica in corrente 4-20 mA proporzionale alla portata misurata; il segnale in uscita, una volta convertito in un segnale 1-5 Vcc tramite un resistenza ad alta precisione del valore di 250 ohm, è inviato al sistema di acquisizione e qui convertito in valore di portata tramite opportuna legge di conversione. Il misuratore di portata Coriolis utilizzato è un "Siemens Sitrans Massflo Mass 2100 DI3" adatto per la misurazione accurata di una varietà di liquidi e gas [6]. Il range di misura è compreso tra 0 e 99 kg/h con un'incertezza inferiore al 0,1 % della lettura della portata massica; può anche fornire in output una misura della densità con un'incertezza di $\pm 0,5$ kg/m³ sulla lettura.

2.3.2 Strumentazione digitale

La strumentazione digitale è formata essenzialmente da un sistema di acquisizione dati che comprende:

- un computer su cui gira un sistema di sviluppo per applicazioni di acquisizione e analisi dati denominato LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) della National Instruments.
- schede di acquisizione dati della National Instruments.

Il computer utilizzato è un **ASUS ZenBook UX305U** con le seguenti caratteristiche:

- Processore Intel Core i7;
- 8GB di memoria RAM;
- Display da 13.3"
- Hard disk da 512GB;
- Batteria ioni di litio;
- Sistema operativo Windows 10

I segnali provenienti dai sensori dell'impianto arrivano tutti allo *chassis* NI cDAQ-9178 (fig.15) che contiene tutte le schede d'acquisizione (8 slot). Questo *chassis* è identificato dal software con indirizzo **cDAQ1**.

La scheda NI-9213 (fig.15) acquisisce i segnali di temperatura in ingresso provenienti dalle termocoppie: è caratterizzata da 16 canali a 75S/s, include filtri anti-aliasing, rilevamento a termocoppia aperta e compensazione del giunto freddo per misure di termocoppia ad accuratezza elevata. Inoltre la NI-9213 include calibrazione tracciabile NIST e una barriera a doppio isolamento a terra (da canale a terra) per la sicurezza, l'isolamento dal rumore e intervalli elevati di tensione di modalità comune.

Per l'impianto E.MO.T.I.CON.S. sono tredici le termocoppie di tipo K acquisite, delle quali otto con una propria taratura (vedi sopra), collegate ad un pozzetto di temperatura con riferimento a zero gradi; le rimanenti due vengono compensate con il giunto freddo interno alla scheda. È identificata dal software con indirizzo **cDAQ1Mod1**.

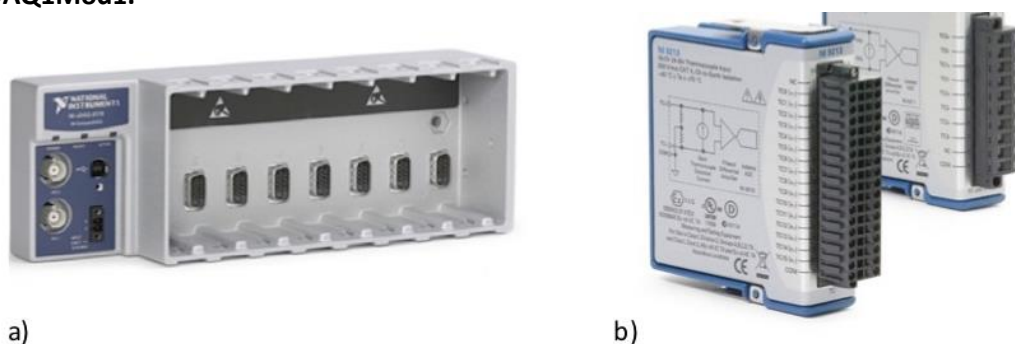


Figura 15. a) Chassis NI cDAQ-9178 e b) Scheda NI-9213 per TC

La NI-9205 (fig.16) è una scheda dedicata alla misura di segnali di tensione in ingresso con 16 bit di risoluzione e una frequenza di campionamento fino a 250KS/s; può accettare fino a 32 canali collegati in *single-ended* o 16 canali collegati in differenziale (quest'ultima modalità è quella usata nel nostro sistema di cablaggio). I segnali in ingresso possono essere da: $\pm 10V$; $\pm 5V$; $\pm 1V$; $\pm 200mV$ (al variare della scala varia la accuratezza della misura). Per E.MO.T.I.CON.S sono sei le grandezze acquisite attraverso questa scheda (portata, quattro pressioni e potenza). È identificata dal software con indirizzo **cDAQ1Mod2**.

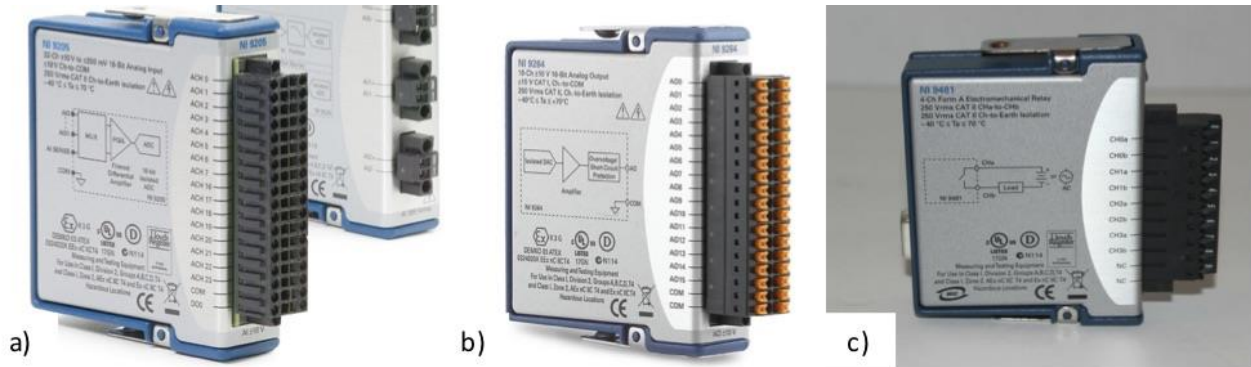


Figura 16. a) Scheda NI cDAQ-9205; b) Scheda NI-9264; c) Scheda NI-9481

la scheda NI-9264 (fig.16) è un modulo di uscite analogiche a 16 canali in tensione nel *range* $\pm 10V$ con velocità fino a 25KS/s per canale, una corrente massima applicabile di 4mA e 16bit di risoluzione in uscita. Il modulo è necessario per comandare e controllare la potenza erogata dal riscaldatore dell'impianto. È identificato dal software con indirizzo **cDAQ1Mod3**.

Infine la scheda NI-9481 (fig.16) fornisce 4 *relay* SPST (*Single-Pole Single-Throw*) che consentono la connessione diretta di dispositivi industriali come motori, attuatori e dispositivi DC. Ogni canale dispone di un accesso a un relay elettromeccanico per lo *switch* dei segnali fino a 60 VDC (1 A) o 250 Vrms (2 A); include inoltre isolamento da canale-a-canale e dispone di un LED che indica lo stato.

Sull'impianto sperimentale sono stati utilizzati per comandare le due alimentazioni delle ventole e delle due elettrovalvole per il carico e lo scarico aria dal serbatoio che controlla la pressione dell'impianto. È identificata dal software con indirizzo **cDAQ1Mod4**.

2.3.3 Software di acquisizione e controllo dati

L'ecosistema software della National Instruments utilizzato è composto principalmente da:

- un configuratore dell'hardware denominato **NI-MAX (Measurement & Automation Explorer)**
- il linguaggio di programmazione grafico **NI LabView 2018**.

I programmi e le subroutine LabView sono denominati "virtual instruments" (VIs); ognuno è caratterizzato da un "Block Diagram", un "Front Panel". Il "Front Panel" rappresenta l'interfaccia utente attraverso la quale interagire, visualizzare e gestire i dati. In esso possono essere presenti diversi oggetti quali indicatori, controlli, bottoni, etc.

Il "Block Diagram" è dove viene realmente scritto il codice che nel caso di LabView non sono linee alfanumeriche di istruzioni ma simboli del linguaggio grafico "G", che descrivono il flusso dei dati, le funzioni, le strutture di controllo, etc. Sintetizzando, ogni oggetto del "Front Panel" ha un corrispondente terminale nel "Block Diagram" che ne rappresenta lo stato (ON, OFF), la funzione (indicatore, controllo) o il tipo (variabile, costante, struttura dati).

Eseguendo il configuratore NI-MAX è possibile accedere a tutti i dispositivi *hardware* della National Instruments collegati al computer o presenti nella rete locale, al fine di:

- Configurare tutti i segnali provenienti dai sensori;

- Definire le scale di conversione laddove necessario;
- Creare e modificare canali, *task*, scale;
- Associare ai segnali fisici degli identificativi che poi potranno essere utilizzati da LabView.

In particolare si possono creare delle *task* ovvero degli insiemi di segnali acquisibili tutti con la stessa modalità, lo stesso timing (*sample rate*) e la stessa quantità di campioni per canale.

Per il presente impianto sono state create e configurate due *task*:

- **AutoElettrica_16Segnali** per temperature e voltaggi (fig. 17);
- **AutoElettrica_Relays** per la gestione dei relays (fig. 18)

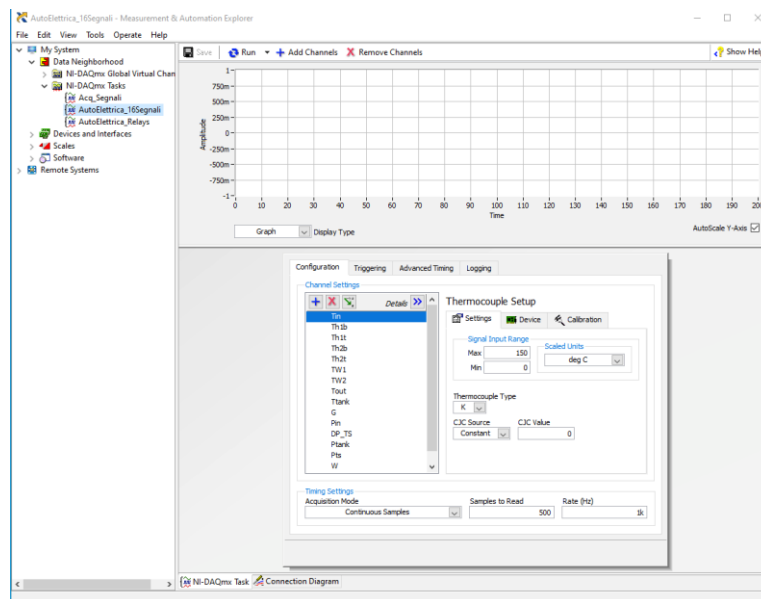


Figura 17. NI-MAX: Task lettura segnali analogici (temperature e voltaggi)

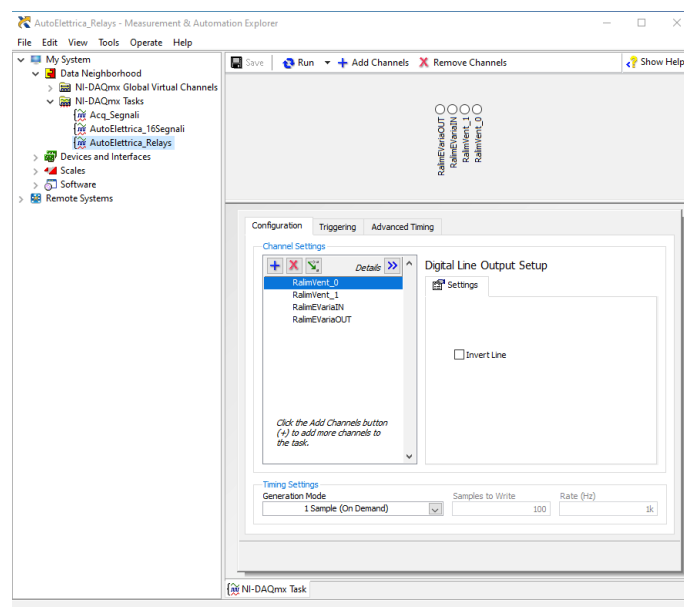


Figura 18. NI-MAX: Task gestione relay

Per quanto riguarda le scale di conversione (fig. 19) sono state definite cinque scale tutte di tipo lineare e con valori della variabile *x* (volt in ingresso) compresi tra 1 e 5.

La scala per il sensore differenziale di pressione, denominata **DP**, converte i *volt* (*x*) in *mbar* (*y*):

$$y = 465x - 465$$

La scala per la conversione della portata dal sensore Coriolis, denominata **G_Coriolis**, converte i *volt* in *Kg/h*

$$y = 40x - 0$$

La scala per la conversione della pressione denominata **P2_5barG** converte i *volt* in *bar abs*

$$y = 0.625x + 0.38825$$

La scala per la conversione della pressione denominata **Pts** converte i *volt* in *bar*

$$y = 1.1684x + 0.4541$$

La scala per la conversione della potenza denominata **W** converte i *volt* in *Watt*

$$y = 1100x - 1100$$

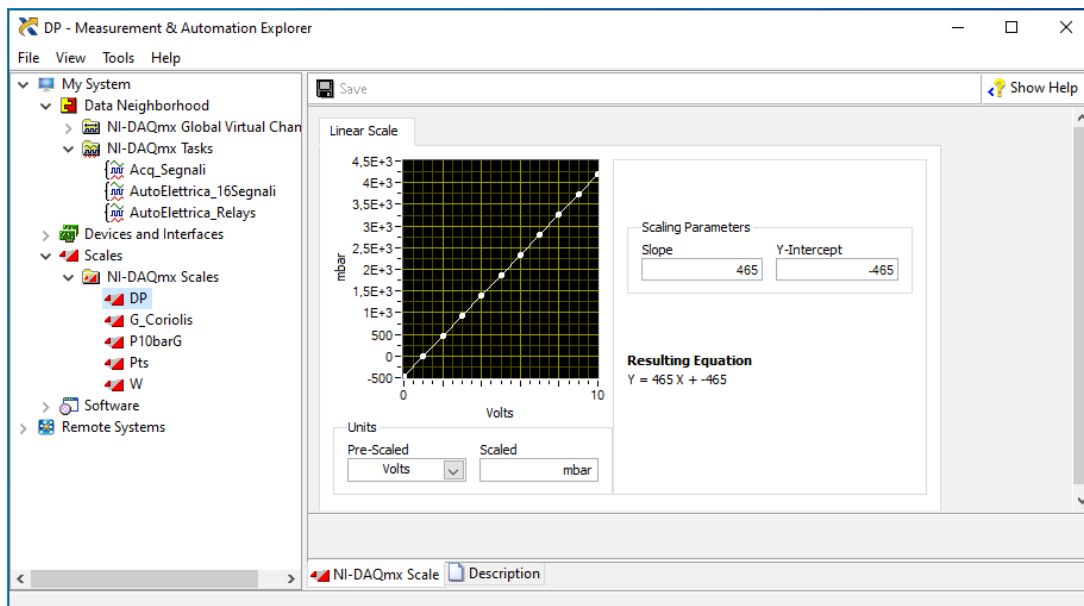


Figura 19. Scale di conversione

Il programma principale da cui avviare il software si chiama “Main_AutoElettrica_Stable_Ver_1.2.2.vi”, all’interno del quale poi vengono utilizzati diversi altri VI. Il programma si basa su di una architettura a code di messaggi con quattro “*loop*” paralleli:

- **Acquisition loop** (fig. 20): preposto all’acquisizione dei segnali provenienti dalla **task** configurata e rinviati all’apposita coda denominata “CodaDati”

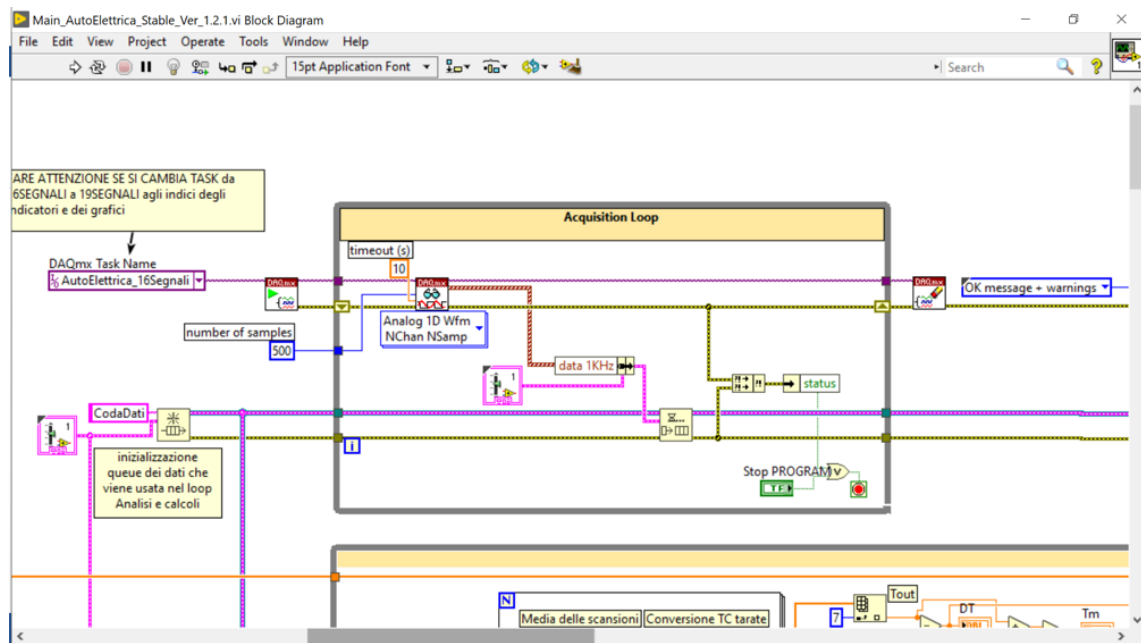


Figura 20. Block Diagram: Acquisition Loop

- **Analysis and calculation loop** (fig. 21): si occupa di leggere dalla “CodaDati” i valori acquisiti ed effettuare eventuali calcoli di grandezze derivate (es. W_{cp}); quindi rinvia i valori modificati e le grandezze calcolate alla coda “Logging” ed al Notifier “Display” per poter essere “consumati” dagli altri loop di scrittura su disco e di visualizzazione.

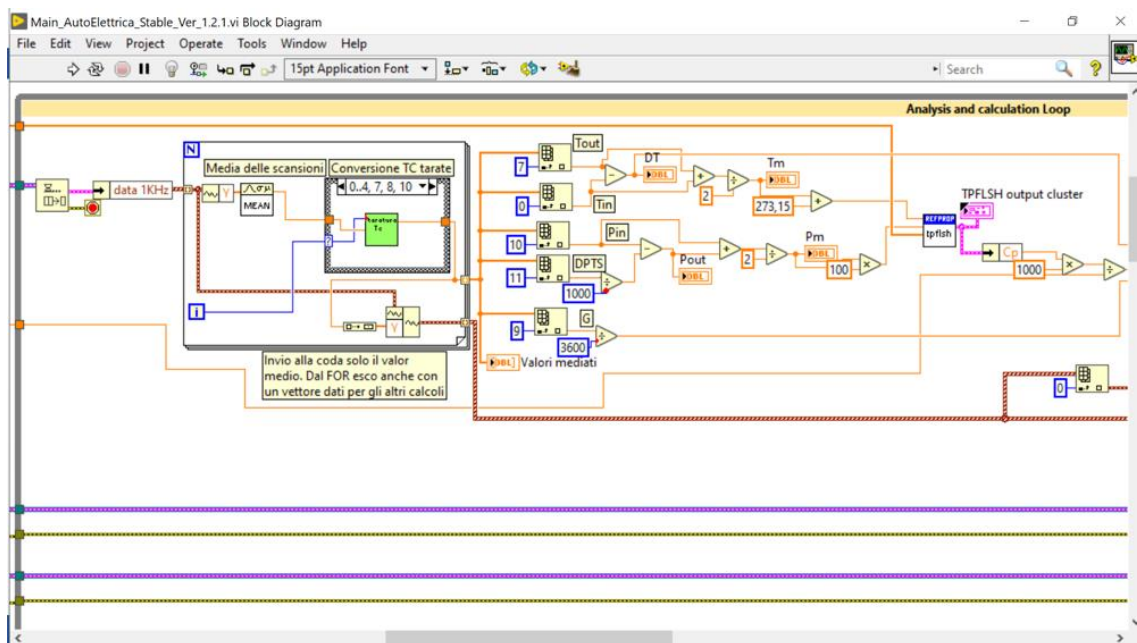


Figura 21. Block Diagram: Acquisition and calculation Loop

- **Display and Control loop** (fig. 12): è preposto alla visualizzazione sul *Front Panel* di indicatori e grafici; nonché alla gestione dei diversi controlli (PID pompa, elettro valvole aria, allarmi). Dei quattro loop questo è l'unico che gira ad una frequenza più lenta impostata a 100ms per ciclo. Questo perché l'aggiornamento a video dei dati è meno prioritario rispetto alle altre funzioni. Inoltre questo loop prende i dati non da una coda ma da un Notifier, in quanto quest'ultimo meccanismo software

fornisce solo l'ultimo dato tra quelli acquisiti mentre una coda funziona esattamente come un FIFO (*First In First Out*) mantenendo tutti gli elementi accodati.

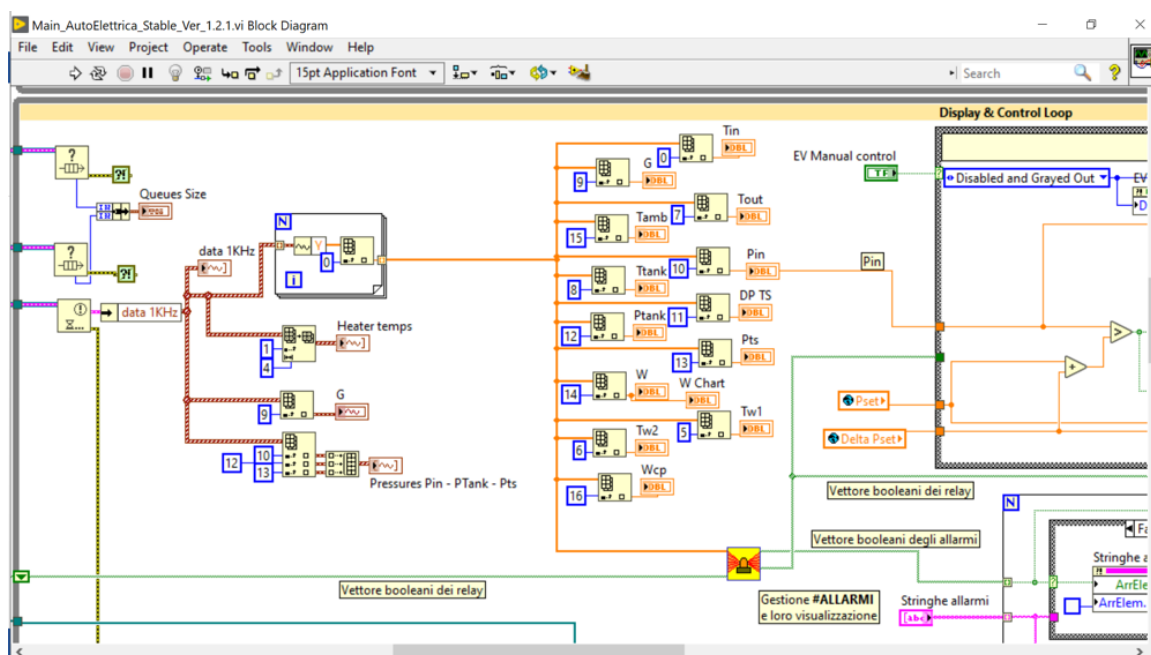


Figura 22. Block Diagram: Display and Control Loop

- **Logging loop** (fig. 23): è il loop che gestisce l'archiviazione dei dati provenienti dalla coda "Logging" sul disco del computer in formato testo separato da "tab".

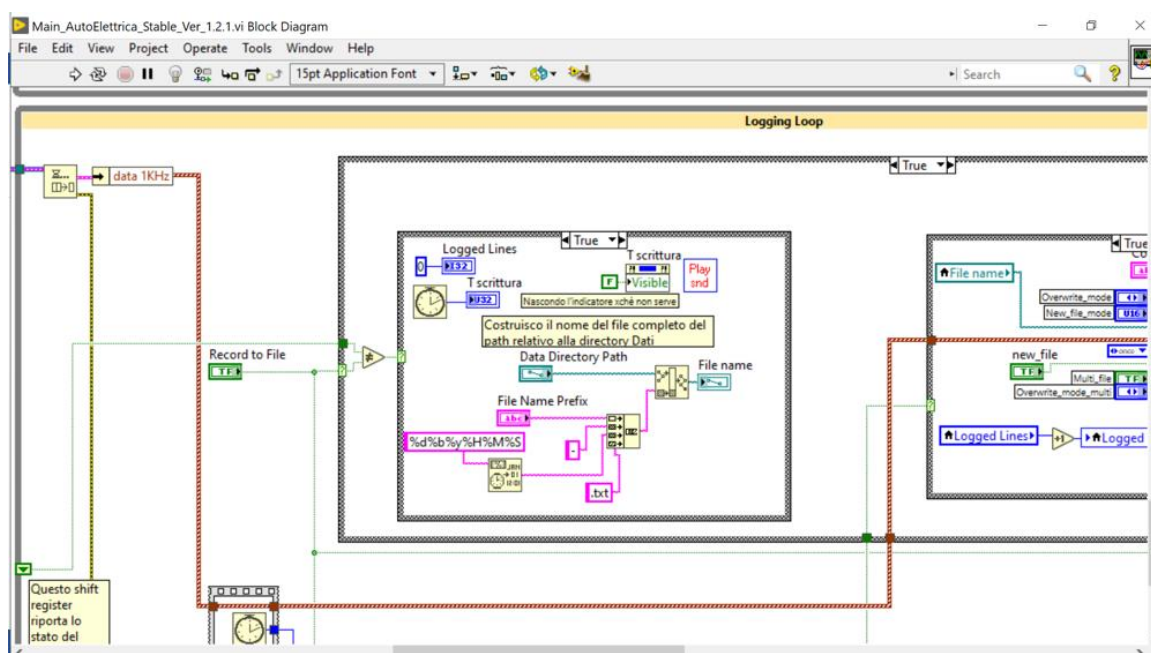


Figura 23. Block Diagram: Logging Loop

Inoltre nel *Block Diagram* sono presenti delle routine di inizializzazione (fig. 24), eseguite all'avvio del programma e delle routine e funzioni di chiusura e reset (fig. 25) eseguite alla chiusura del programma.

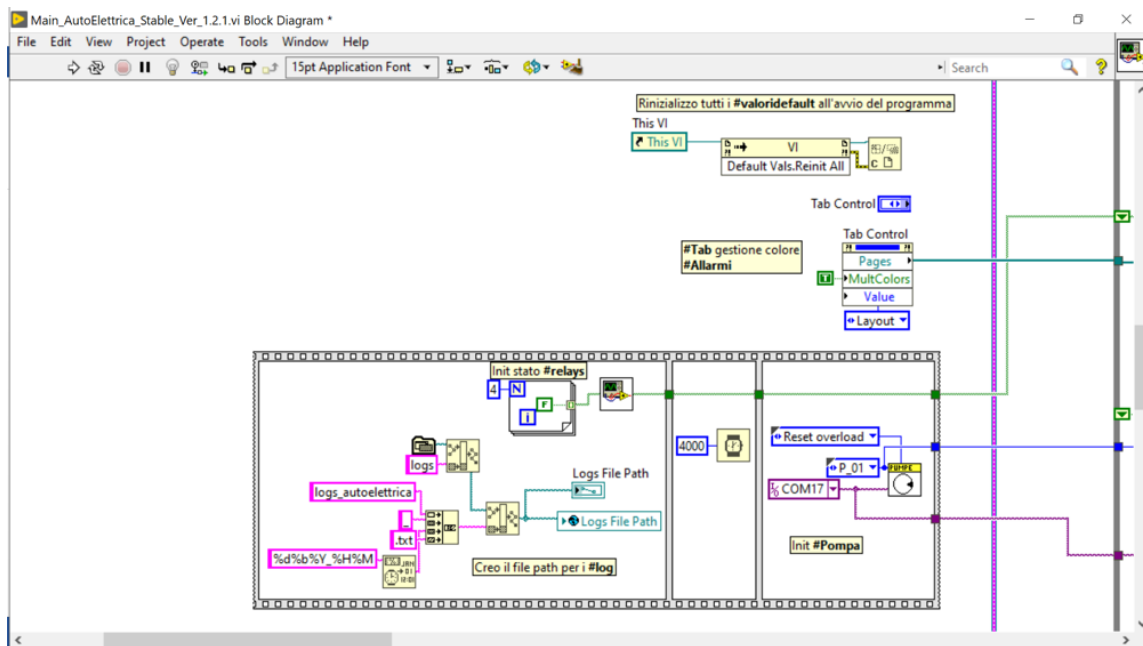


Figura 24. Block Diagram: Routine di inizializzazione

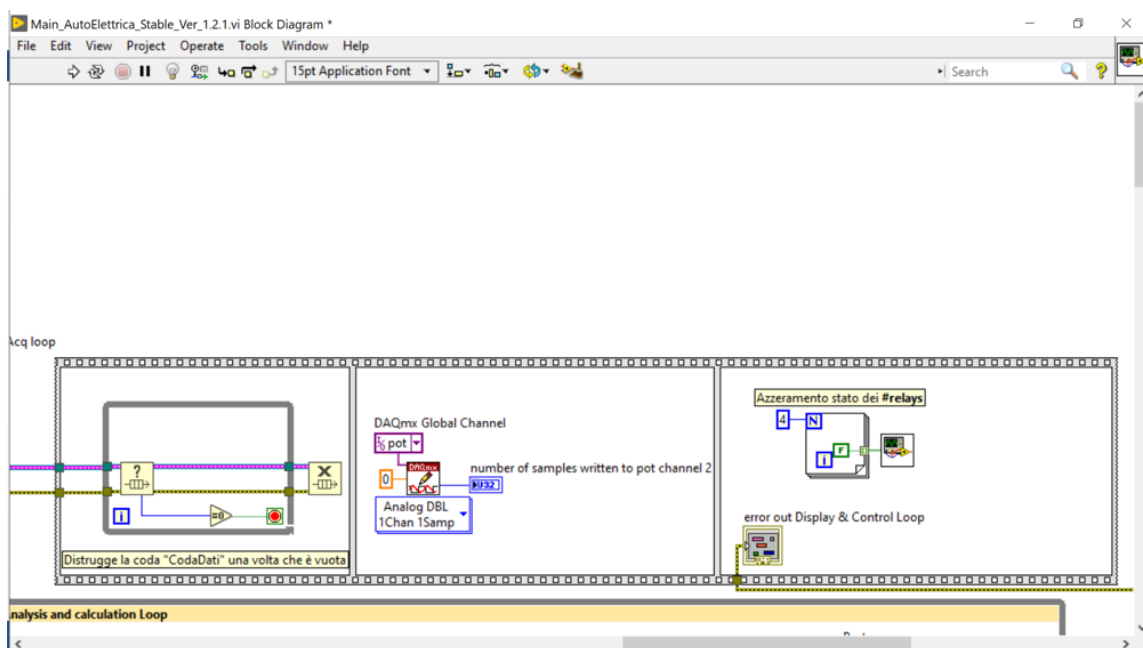


Figura 25. Block Diagram: Routine e funzioni di reset

Per quanto riguarda il *Front Panel* ovvero l'interfaccia utente questa si presenta come contenitore di sei "tab", cioè delle schede selezionabili che presentano visualizzazioni diverse come di seguito descritto:

- **Setup** (fig.26): Questa scheda consente di impostare diversi parametri tra cui i *path* delle directory dove salvare i dati, le soglie degli allarmi e dei controlli dell'impianto, i parametri di gestione delle elettrovalvole ed il fluido utilizzato all'interno del circuito idraulico (calcoli effettuati con i Vis di NIST Refprop).

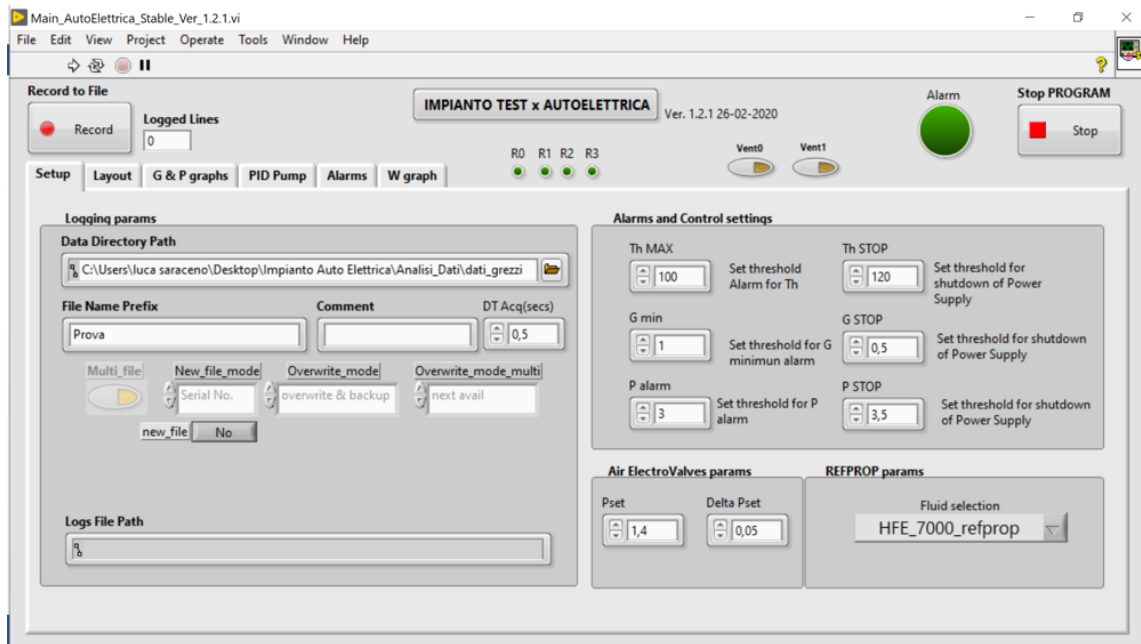


Figura 26. Front Panel: Setup

- **Layout** (fig. 27): Questa scheda fornisce, come suggerisce il nome, una panoramica dello schema d'impianto con gli indicatori delle principali grandezze fisiche osservate e delle temperature più importanti; inoltre da qui è possibile controllare ed impostare la potenza elettrica da fornire al riscaldatore della sezione di test.

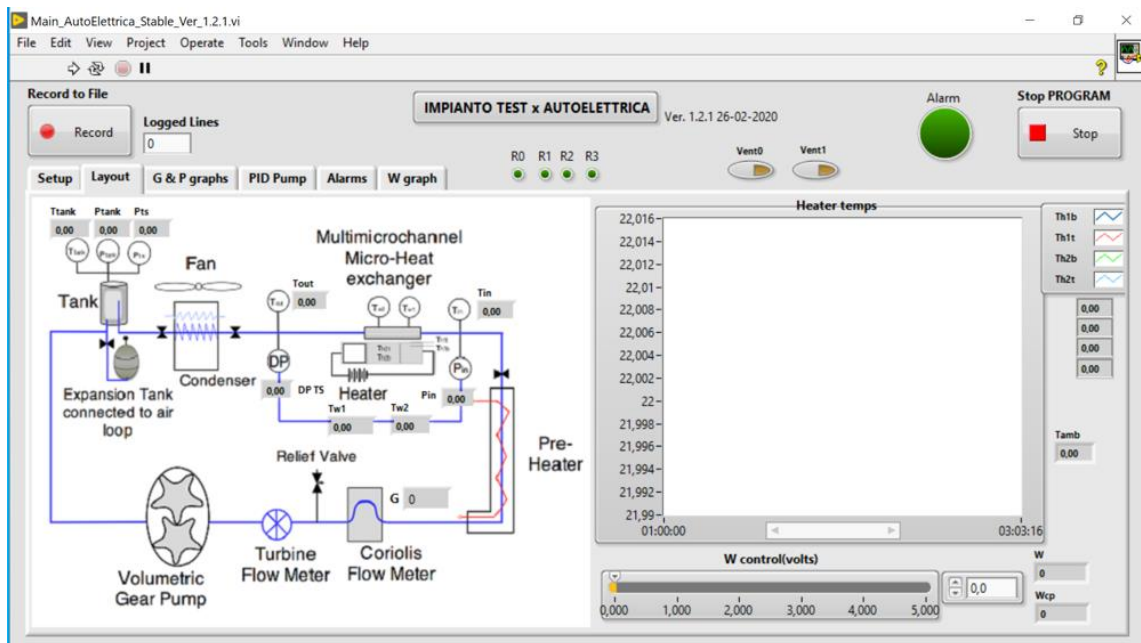


Figura 27. Front Panel: Layout

- **G & P graphs** (fig. 28): Scheda per la visualizzazione in grafici della portata G e delle pressioni d'impianto Pin, Ptank e Pts. Inoltre da qui è possibile gestire manualmente le elettrovalvole per la carica e scarica del serbatoio d'aria per la regolazione della pressione d'impianto.

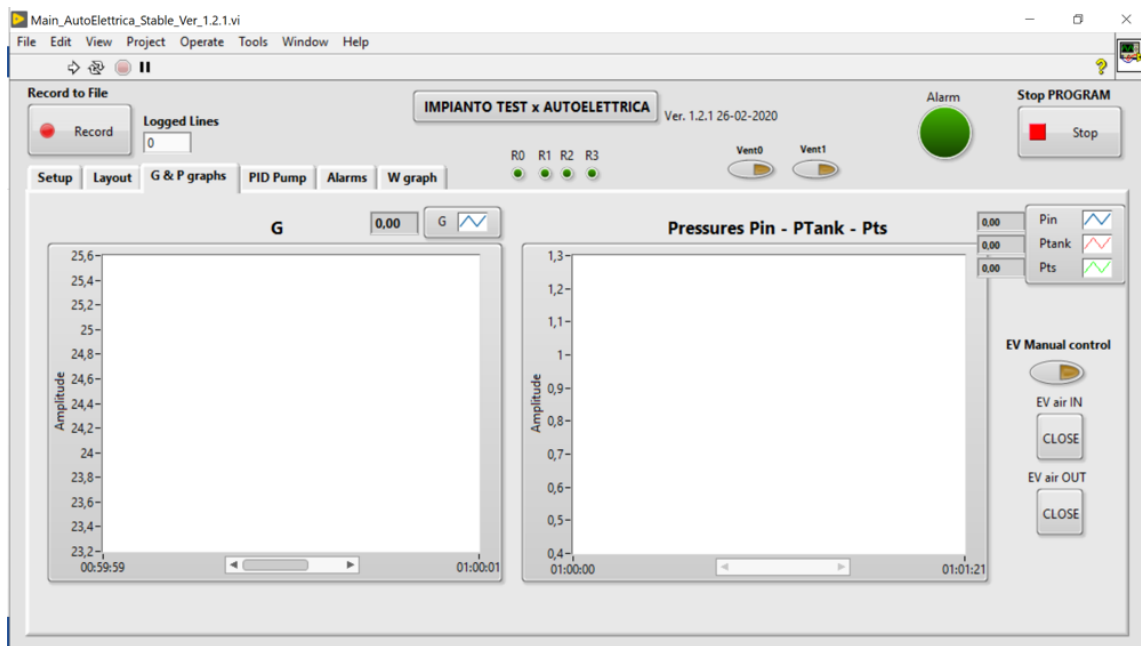


Figura 28. Front Panel: G & P graphs

- **PID Pump** (fig. 29): In questa scheda si trovano tutti i controlli necessari per il funzionamento automatico della pompa. È altresì possibile disabilitare il funzionamento automatico ed inviare “manualmente” i comandi alla pompa. Sia in automatico che in manuale la comunicazione con la pompa avviene attraverso protocollo seriale e l'utilizzo dei driver (Vis) specifici della pompa.

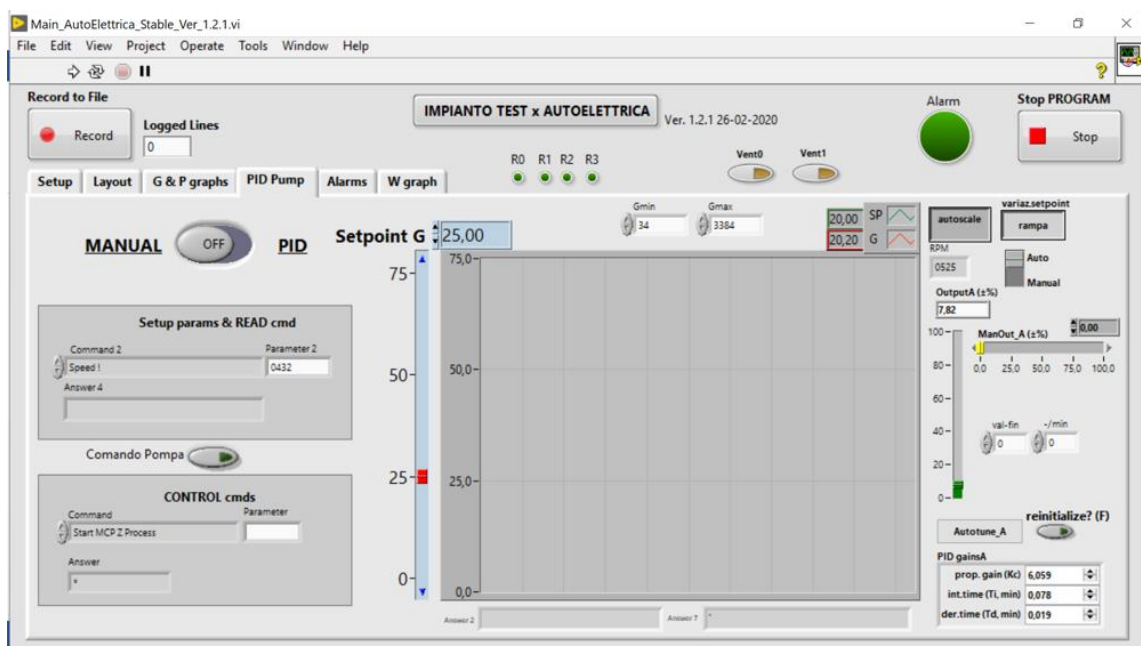


Figura 29. Front Panel: PID Pump

- **Alarms** (fig. 30): Questa scheda visualizza eventuali messaggi di allarmi generati dall'impianto (Alarm.vi), oltre ai messaggi generati dai controlli (per es. “BLOCCO x Th1b >= 120°”). Poiché potrebbe verificarsi un allarme o un blocco mentre l'operatore è su altre schede si è inserito un visibile indicatore rotondo di allarme al di fuori delle “tab”.

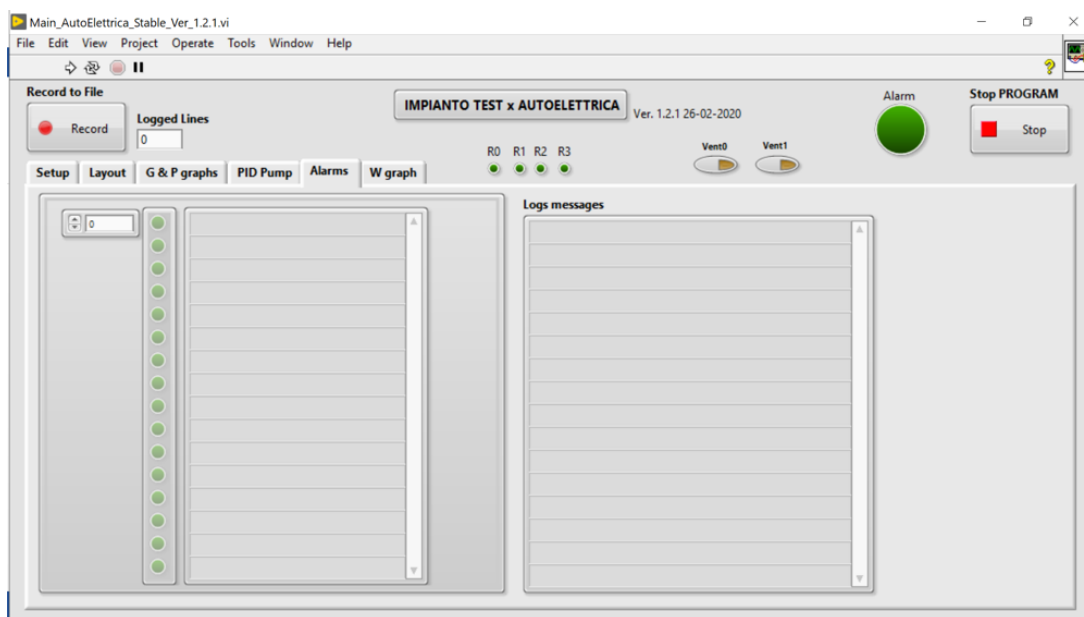


Figura 30. Front Panel: Alarms

- **W graph** (fig. 31): Scheda per la visualizzazione del solo grafico della potenza elettrica erogata.

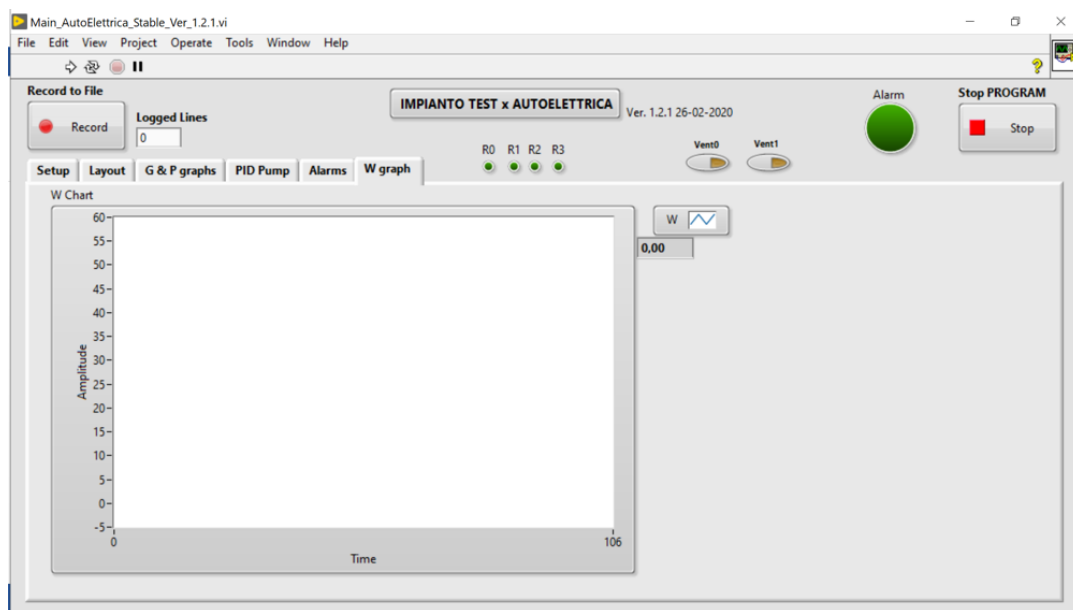


Figura 31. Front Panel: W graph

Al di fuori delle varie schede nel *Front Panel* sono visibili alcuni altri indicatori e controlli:

- Pulsante “Record to File” alla sinistra della finestra per la registrazione su file;
- Un indicatore “Logged Lines” delle linee scritte su file;
- Quattro led di stato relativi ai quattro relay utilizzati;
- Due pulsanti per l’accensione e lo spegnimento delle ventole;
- L’indicatore di allarmi;
- Pulsante di “Stop PROGRAM” per l’arresto definitivo del programma

2.4 Manuale d'uso di impianto e modalità di esecuzione delle prove

In questa sezione verranno descritte la procedura da seguire per la conduzione dell'impianto e la metodologia utilizzata per l'esecuzione dei test sperimentali previsti.

Per verificare le condizioni operative dell'impianto sono state effettuate delle prove preliminari per verificarne l'esatta corrispondenza con le omologhe effettuate in precedenti campagne sperimentali. Sono stati eseguiti cinque diversi test preliminari utilizzando NOVEC7000 come fluido di lavoro e i risultati sono stati simili a quelli ottenuti nella ricerca precedente; inoltre è stato verificato il corretto funzionamento di tutti gli allarmi, lo spegnimento di emergenza e tutti gli altri comandi automatici.

Dopo questa fase preliminare, è stata modificata la configurazione dell'impianto sperimentale, per poter avviare nuove sperimentazioni: il condensatore (C1) è stato sostituito con un nuovo condensatore (C2) sempre del tipo a batteria alettata (vedi par.2.1.3), dotato di quattro ventole con portata d'aria massima maggiore rispetto alle precedenti. Il vecchio condensatore infatti non era in grado di garantire la completa condensazione del fluido bifase in corrispondenza dei valori più elevati di potenza applicata, sia per la presenza di un filtro che causava perdite di carico indesiderate (con conseguente abbassamento della pressione/temperatura di condensazione) sia per la non sufficiente portata d'aria elaborata dalle ventole installate; grazie all'impiego di tubi semi-trasparenti, è stato possibile verificare in maniera diretta che il fluido in uscita dal condensatore C2 fosse del tutto in fase liquida anche alla massima potenza. Inoltre, la temperatura rilevata all'uscita del condensatore ha registrato quasi sempre valori molto prossimi alla temperatura ambiente, a conferma della buona efficienza del componente.

Come detto in precedenza, è stata effettuata una prova di tenuta sul condensatore prima di inserirlo nel circuito: esso è stato messo in pressione con azoto compresso ed è stato utilizzato uno spray cercafughe per il controllo delle giunzioni.

Dopo l'installazione del condensatore è stato fatto fluire azoto a bassa pressione in tutto il circuito per pulire i componenti e successivamente è stata utilizzata una pompa a vuoto per far evaporare eventuali residui di fluido di precedenti esperimenti nonché per verificare la presenza di eventuali macro perdite sulle tenute idrauliche. Infine è stata effettuata una prova di tenuta globale sull'intero circuito; similmente alla prova sul condensatore, il circuito è stato caricato con azoto ad una pressione di circa 5 bar ed è stato utilizzato spray cercafughe per controllare le giunzioni, le valvole e tutti i punti critici.

Questa sequenza di pulizia e test di tenuta è stata eseguita dopo ogni cambio di fluido o componente.

2.4.1 Setup del programma di acquisizione dati

I dati vengono acquisiti tramite un programma dedicato sviluppato in ambiente software LabVIEW (vedi par. 2.3.2). Il programma è in grado di monitorare i dati in tempo reale, di registrare le misure e, grazie all'interfaccia utente grafica (GUI), visualizzare in tempo reale ogni aspetto del ciclo sperimentale. È possibile inoltre integrare hardware di misura di qualsiasi fornitore e controllare gli attuatori anche da remoto.

Osservando il pannello principale del programma LabVIEW in figura 32 è possibile identificare il grafico delle temperature dei riscaldatori, dove vengono tracciati in tempo reale i valori delle temperature misurate dalle termocoppie sul riscaldatore.

Sulla sinistra c'è lo schema dell'impianto, dove è possibile visualizzare in tempo reale i dati principali, come la portata, la temperatura del fluido in ingresso e in uscita della sezione di prova e le pressioni in diversi punti del circuito. Il cursore nella parte inferiore serve per impostare la potenza dei riscaldatori: va da 0 a 5 V che corrispondono in termini di potenza rispettivamente a 0 e ca. 1750 W. Tale valore massimo di potenza applicabile, distante dal valore nominale teoricamente possibile (3600 W), è legato alla limitazione sulla corrente che si ha nel Variac che regola la tensione delle cartucce scaldanti del riscaldatore.

Tornando alla figura 32, nella parte superiore sono presenti due interruttori (Vent0 e Vent1) utilizzati per l'accensione e lo spegnimento, a mezzo dei relay, in maniera indipendente delle due linee di ventilatori sul condensatore; sulla sinistra degli interruttori sono presenti quattro indicatori che identificano lo stato dei relay (R0, R1, R2, R3). R0 e R1 sono relativi ai relay delle ventole: quando le ventole sono in funzione i led si accendono. R2 e R3 sono relativi ai relay delle valvole sul serbatoio, utilizzate per regolare la pressione:

all'accensione di R2, la valvola in ingresso è aperta e la pressione sale; all'accensione di R3 la valvola in uscita è aperta e la pressione diminuisce. Queste due valvole possono essere controllate automaticamente, impostando un valore di pressione nella sezione "Setup", oppure aprendo e chiudendo manualmente le valvole tramite un interruttore nel pannello "G&P graphs" dopo aver impostato su "Manuale" il corrispondente switch "Manuale/Automatico".

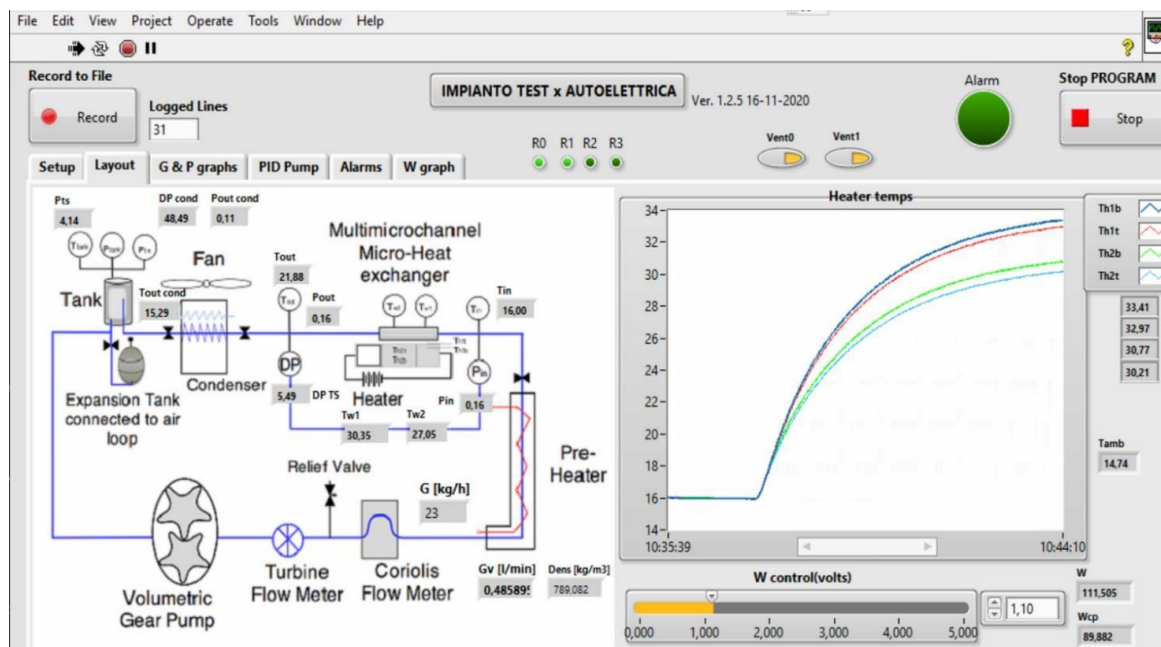


Figura 32. Pannello frontale del programma di acquisizione

Anche la portata può essere controllata automaticamente tramite un PID (Proportional-Integral-Derivative controller), impostando un valore nella sezione dedicata del pannello "G&P graphs", o regolata manualmente.

Nella parte superiore destra è collocata una spia di allarme che si accende in conseguenza del raggiungimento di una o più condizioni che possano minare l'integrità del sistema. Una delle condizioni di allarme è data dal raggiungimento di un primo valore limite (valore di allarme) da parte di una delle temperature misurate nel riscaldatore, ad esempio 100 °C; se le temperature continuassero a salire e andassero oltre un secondo valore limite (valore di blocco), ad es. i 120°C, il sistema di controllo interverrebbe in maniera automatica staccando l'alimentazione del riscaldatore al fine di evitare l'insorgenza di fenomeni di dry out nell'evaporatore (crisi termica) e conseguenti danni all'impianto sperimentale. Sia la temperatura di allarme che quella di spegnimento possono essere impostate dall'utente nel pannello di configurazione e vengono modificate in base al fluido utilizzato.

Il led di allarme si accende anche se la portata (G) va a 0 kg/h, oppure la pressione supera il valore di 3,5 bar.

Nella sezione "Setup" è possibile impostare in quale cartella salvare i dati con un nome diverso per ogni acquisizione.

2.4.2 Procedura di acquisizione

Vengono eseguite diverse serie di prove variando all'interno della medesima serie la potenza termica imposta secondo step prestabiliti; per ogni serie la portata massica del fluido refrigerante viene mantenuta costante attraverso il PID del sistema di controllo, mentre la pressione del sistema può essere mantenuta costante (tramite le elettrovalvole) o lasciata libera di variare a seconda delle condizioni operative.

Tutte le acquisizioni sono state effettuate in regime stazionario: dapprima è necessario impostare la portata massica e il livello di pressione, attendere il raggiungimento dello stato stazionario e avviare la prima acquisizione di riferimento (con 0 W di potenza termica assorbita); quindi si imposta correttamente il

cursore di cui sopra per avere il valore di potenza desiderato, attendere il raggiungimento della condizione di regime e avviare l'acquisizione.

La condizione di regime stazionario può essere riconosciuta osservando il grafico delle temperature: quando la variazione della temperatura è nell'intervallo di $\pm 0,5$ °C durante un tempo di controllo di 3 minuti, il test può essere considerato in condizioni stazionarie.

Ogni acquisizione dura 30 secondi e, in questo lasso di tempo, vengono registrati 30 set di dati. L'acquisizione inizia premendo il pulsante “Registra” in alto a sinistra; il programma salva i dati in un file .txt nella cartella preimpostata.

2.5 Risultati sperimentali

In questa sezione verranno presentati i dati sperimentali raccolti durante la campagna sperimentale effettuata: sono state testate dieci diverse configurazioni ed è stato creato un ampio database. Durante l'intera campagna sono state effettuate più di 110 serie di esperimenti, per un totale di più di 1200 singoli test. Nelle tabelle seguenti sono riassunti tutti i test effettuati.

2.5.1 Matrice di prova

Le tabelle seguenti offrono un quadro riassuntivo di tutti i test effettuati. Sono stati testati gli evaporatori con superficie alettata da 100 x 50 mm, A100 e A100-2.

Tabella 2: Prove effettuate con NOVEC7000 e acqua come fluido di lavoro

NOVEC 7000	A100	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	CONDENSER 1		
			1.3	2.5	
			23	23	50
			37	37	80,4

NOVEC 7000	A100	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	CONDENSER 2		
			1.3	2.5	
			23	23	50
			37	37	80,4

WATER SINGLE PHASE	A100	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	CONDENSER 2			
			1.3		2	
			23	50	23	50
			37	80,4	37	80,4

Tabella 3: Prove effettuate con Etanolo come fluido di lavoro

ETHANOL	A100	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	CONDENSER 2					
			1,1		0,19		1,3	
			23	11,5	23	11,5	6	23
	A100-2	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	CONDENSER 2					
			1,1		0,19			
			23	11,5	6	23	11,5	6
ETHANOL	A100-2	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	41,5	20,8	10,8	41,5	20,8	10,8
	A100-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	CONDENSER 2					
			1,1			0,19		
			23	11,5	6	15,4	7,7	4
	A100-2-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	55,3	27,7	14,4	37	18,5	9,6
			23	11,5	6	15,4	7,7	4
ETHANOL	A100-2-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	55,3	27,7	14,4	37	18,5	9,6
			CONDENSER 2					
			1,1			0,19		
	A100-2-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	23	11,5	6	14,9	7,4	3,9
			64,2	32,1	16,8	41,6	20,7	10,9
			13,2	6,6	3,45	37	18,4	9,6
ETHANOL	A100-2-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	CONDENSER 2					
			0,19					
			23	11,5	6	14,9	7,4	3,9
	A100-2-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	13,2	6,6	3,45	34,5	18,4	9,6
			64,2	32,1	16,8	41,6	20,7	10,9
			37	18,4	9,6	96,4		

Tabella 3: Prove effettuate con R245FA come fluido di lavoro

R245FA	A100-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	CONDENSER 2					
			1,8					
			23	11,5	53,4	15,4	40,3	80,6
	A100-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	20,2	13,35	26,7	55,3	27,7	128,4
			37	97	193,8	48,6	32,1	64,2
			97	193,8	48,6	32,1	64,2	
R245FA	A100-2-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	CONDENSER 2					
			Variable (P0=1,35 bar)					
			23	11,5	53,4	15,4	40,3	80,6
	A100-2-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	20,2	13,35	26,7	55,3	27,7	128,4
			37	97	193,8	48,6	32,1	64,2
			97	193,8	48,6	32,1	64,2	
R245FA	A100-2-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	CONDENSER 2					
			1,8					
			23	11,5	46	34,7	69,4	17,3
	A100-2-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	13,2	6,6	64,2	32,1	128,5	97
			193,8	48,3	37	18,4		
			97	193,8	48,3	37	225,7	
R245FA	A100-2-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	CONDENSER 2					
			Variable (P0=1,35 bar)					
			23	11,5	46	34,7	69,4	17,3
	A100-2-NG	Pin [bar] G [kg/h] Γ [kg/s m ²]	13,2	6,6	64,2	32,1	128,5	97
			193,8	48,3	37	18,4		
			97	193,8	48,3	37	225,7	

Le tre tabelle riportate mostrano le prove effettuate durante la campagna sperimentale: nella prima colonna è riportato il fluido di lavoro (NOVEC7000, Acqua, Etanolo e R245FA), mentre nella seconda colonna è riportata la sezione di prova.

Nella parte destra delle tabelle sono riportati il condensatore utilizzato, la pressione del fluido all'ingresso della sezione di prova (Pin), la portata massica (G) e la corrispondente portata massica specifica (Γ). Quest'ultimo parametro è molto importante per confrontare coerentemente una sezione di prova con un'altra, sia nella configurazione "gap" che "no-gap": la potenza trasferita all'evaporatore è infatti funzione anche della velocità del fluido che attraversa i microcanali ed è quindi collegata al numero di Reynolds; per avere medesimi valori di tali parametri occorre riferirsi agli stessi valori di portata specifica al variare della sezione di passaggio, come nel caso di un medesimo evaporatore nelle due configurazioni "gap"/"no-gap".

Sono state effettuate prove a livello di pressione variabile per verificare le prestazioni del sistema nel caso in cui la pressione e, quindi, la temperatura di saturazione all'ingresso della sezione di prova sia lasciata libera di variare. Quest'ultima configurazione presenta dei vantaggi di natura applicativa: il circuito di

raffreddamento è più semplice perché non è necessario un componente attivo per il controllo della pressione e, di conseguenza, aumenta l'affidabilità dell'intero sistema. D'altra parte, è necessario sempre valutare la diminuzione delle prestazioni legate a questa condizione per decidere se il controllo sulla pressione sia necessario o meno.

I principali parametri utilizzati per verificare le prestazioni delle sezioni di prova sono, nel caso degli evaporatori testati:

$$W_{net} [W] \quad \text{Potenza netta} \quad W_{net} = W_{el} - W_{loss} \quad (1)$$

$$T_{ref} [^{\circ}C] \quad \text{Temperatura di riferimento} \quad T_{ref} = \frac{T_{h1t} + T_{h2t}}{2} - T_{amb} \quad (2)$$

Questa definizione di temperatura di riferimento è stata utilizzata (e non solo la media tra i due valori della superficie del riscaldatore) al fine di avere una valutazione oggettiva delle prestazioni del sistema alle diverse condizioni ambientali; infatti la temperatura di esercizio del sistema di raffreddamento dipende anche dalla temperatura del cosiddetto pozzo freddo, ovvero dalla temperatura dell'ambiente in cui viene ceduto il calore sottratto al componente da raffreddare.

Inoltre, il valore mediato di temperatura della superficie superiore del riscaldatore, è estremamente importante perché può essere correlata alla temperatura della superficie del componente elettronico da raffreddare.

Nell'equazione (1) W_{el} è la potenza elettrica fornita e misurata dal wattmetro mentre W_{loss} rappresenta la potenza termica totale dispersa verso l'ambiente che viene opportunamente calcolata effettuando delle prove in monofase, valutando la differenza tra la potenza elettrica fornita e quella assorbita dal fluido in funzione della differenza di temperatura tra temperatura media del riscaldatore e temperatura ambiente. W_{net} rappresenta quindi la potenza totale netta trasferita dal riscaldatore al fluido refrigerante grazie al processo di cambiamento di fase all'interno dell'evaporatore.

Nell'analisi dei dati sperimentali è stato utilizzato un altro parametro:

$$DT_{sat, wall} [K] \quad DT_{sat, wall} = T_{wall, m} - T_{sat, m} \quad (3)$$

ossia la differenza tra la temperatura interna di parete dell'evaporatore e la temperatura di saturazione del fluido, valori entrambi mediati su tutto l'evaporatore.

Riportando in grafico gli andamenti dei valori di W_{net} in funzione di $DT_{sat, wall}$ è possibile valutare le prestazioni del sistema di raffreddamento bifase.

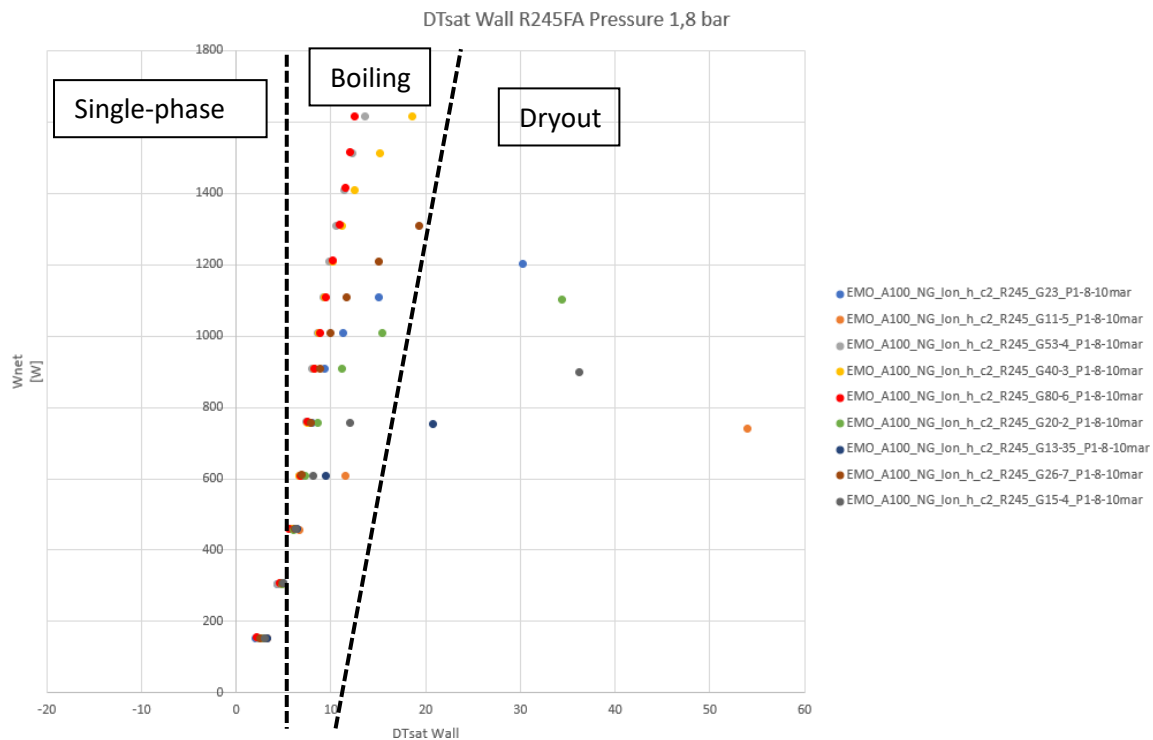


Figura 33. Esempio di curva di ebollizione, W_{net} vs $DT_{sat, wall}$, A100_NG, R245FA, pressione 1,8 bar

Il grafico in figura 33 mostra quindi un esempio di curva di ebollizione, W_{net} vs $DT_{sat, wall}$. Nel grafico possono essere facilmente individuate tre regioni di scambio termico: quella a sinistra dove il fluido di lavoro è ancora in monofase, la regione centrale caratterizzata dal regime di ebollizione in convezione forzata dove le linee sono quasi verticali (la temperatura media di parete è pressoché costante e pari alla temperatura di saturazione, massimo trasferimento di calore) e la regione a destra in cui si verifica la condizione di dryout o principio di crisi termica. Ricordiamo che la pendenza delle curve di ebollizione è direttamente correlata al coefficiente di scambio termico tra evaporatore e fluido di lavoro.

Questo tipo di grafico è molto utile anche perché mostra rapidamente in quale range di potenza una portata massica selezionata funziona correttamente in condizione bifase: per ottenere le migliori prestazioni di raffreddamento è necessario operare nella zona centrale, dove le linee sono quasi verticali e quindi il valore del coefficiente di scambio termico è il massimo.

Inoltre, questo grafico conferma che l'implementazione di un sistema di raffreddamento a due fasi garantisce una temperatura della parete dell'evaporatore quasi costante. Infatti, nell'ipotesi di una temperatura di saturazione costante (ragionevole perché la pressione si mantiene costante nonostante la perdita di carico interna), la variazione della temperatura media di parete è piccola considerando l'ampia variazione di potenza: alla massima portata massica (80 ,6 kg/h) la variazione della temperatura media di parete è inferiore a 9°C.

Di seguito sono riportati i risultati sperimentali, inizialmente divisi per fluido di lavoro. Al termine di tale paragrafo verranno poi presentati alcuni interessanti confronti tra prove omologhe effettuate con diverse configurazioni della sezione di prova.

2.5.2 Risultati sperimentali dei test con acqua

In questa sezione verranno presentati i risultati ottenuti utilizzando l'acqua demineralizzata come fluido di lavoro; queste prove sono state eseguite solo in condizione monofase: l'acqua non raggiunge mai la temperatura di saturazione all'interno della sezione di prova.

Questi test possono essere utilizzati per confrontare le prestazioni del processo di raffreddamento standard monofase con quello bifase.

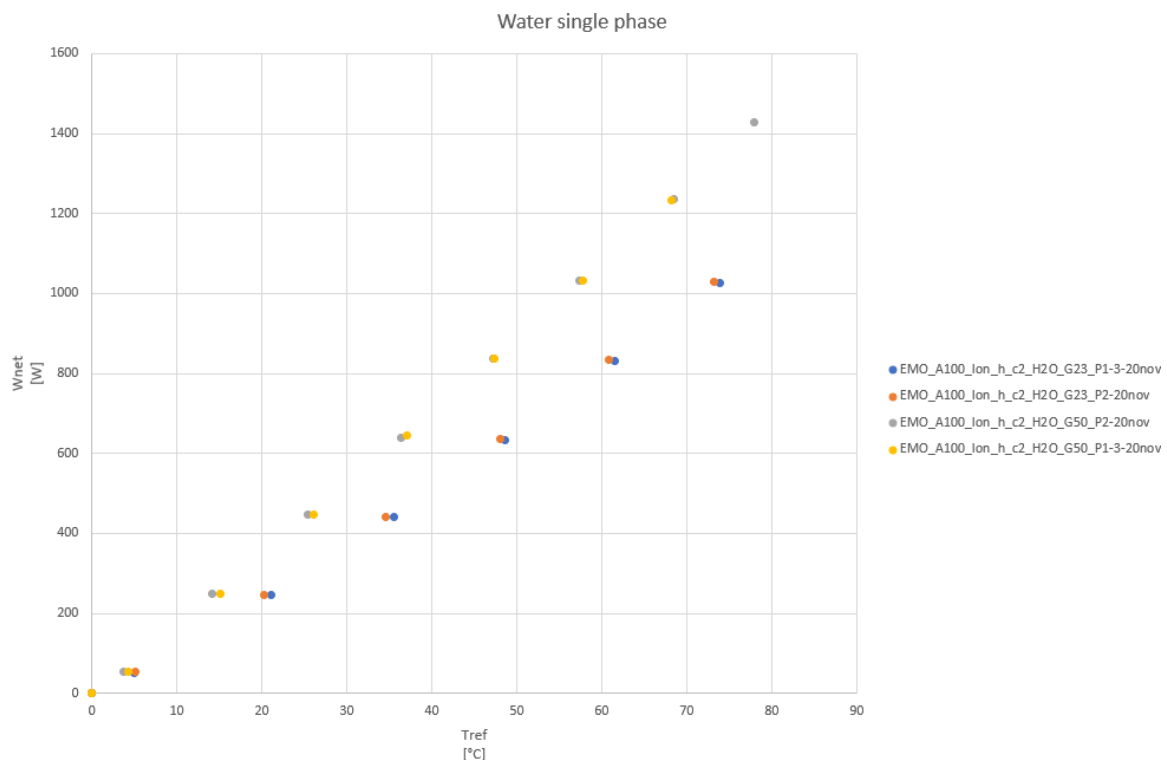


Figura 34. Wnet vs Tref per l'acqua in monofase

Sono stati testati due diversi livelli di pressione (1,3 bar e 2 bar), con due portate massiche (23 kg/h e 50 kg/h); è stata testata solo una sezione (A100).

L'andamento dei dati è lineare, caratteristica tipica del trasferimento di calore in condizione monofase. Dal grafico risulta chiaro che la pressione non influenza lo scambio termico; infatti, a parità di portata massica, i dati a diversa pressione risultano perfettamente sovrapposti. L'unico parametro che influenza le prestazioni di questa sezione di prova è la portata massica.

Una maggiore portata massica permette di asportare una maggiore potenza termica mantenendo la temperatura del componente da raffreddare entro limiti accettabili: nel nostro caso, con una portata massica di 50 kg/h è possibile asportare 1450 W di potenza termica, mentre con una portata massica di 23 kg/h la potenza massima è di 1050 W.

Inoltre, una maggiore portata massica garantisce migliori prestazioni alle basse e medie potenze: a parità di Wnet, la temperatura di riferimento delle prove da 50 kg/h è sempre molto inferiore rispetto alla prova da 23 kg/h. A parità di temperatura di riferimento, invece, una maggiore portata massica è in grado di asportare una maggiore potenza termica.

Per le prove in monofase non sono state considerate portate maggiori per un confronto più affidabile con le prove bifase: dalla letteratura è noto che per dissipare una determinata potenza termica un sistema monofase richiede, in media, una portata massica un ordine di grandezza superiore rispetto a un sistema bifase; per questo motivo un sistema monofase necessita di una maggiore potenza di pompaggio e, quindi, anche il consumo di energia è maggiore.

2.5.3 Risultati sperimentali dei test con NOVEC7000

In questa sezione verranno presentati i risultati ottenuti utilizzando NOVEC7000 come fluido di lavoro, in particolare verranno evidenziate le differenti prestazioni dei due condensatori testati.

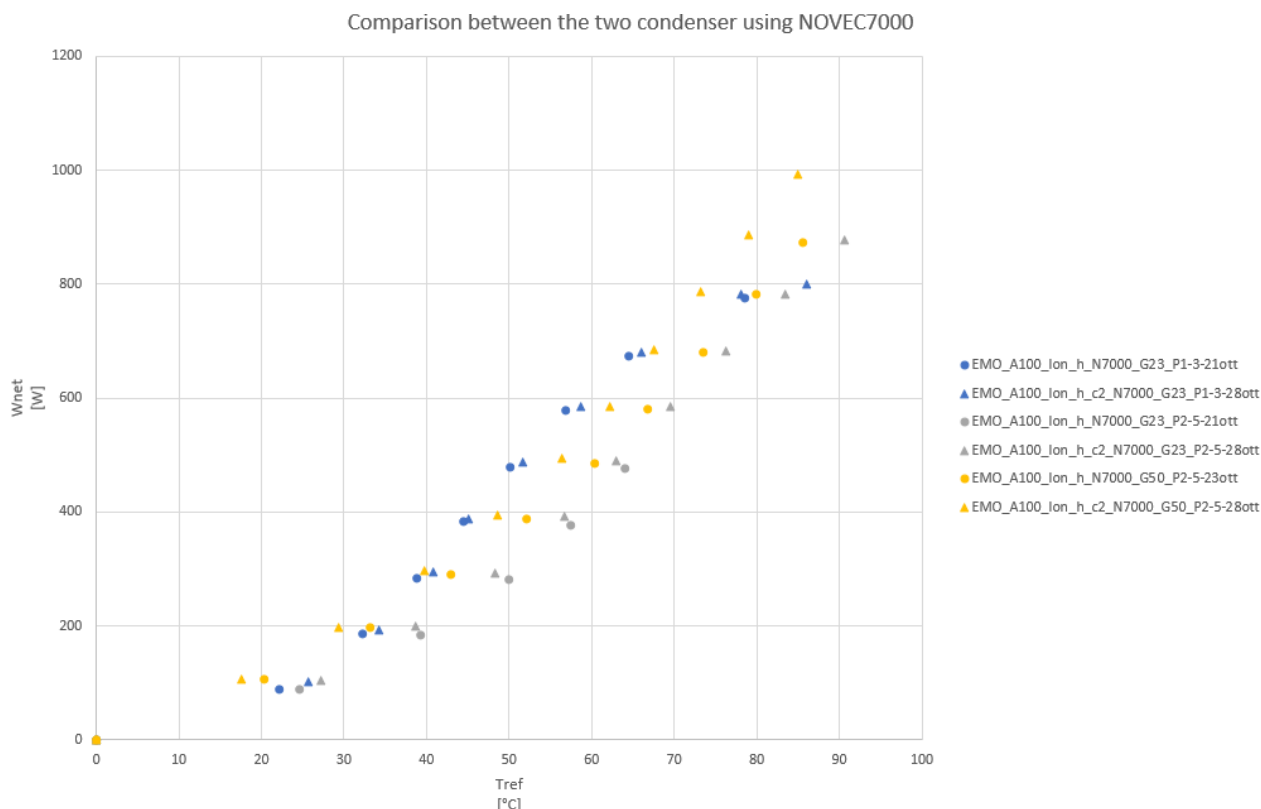


Figura 35. Wnet vs Tref per NOVEC7000 – condensatori C1 e C2

Le prove con NOVEC7000 sono state effettuate a due diversi livelli di pressione (1,3 bar e 2,5 bar) e con i due condensatori a disposizione (vedi par.2.1.3).

Il grafico in figura 35 riporta tutti i dati acquisiti. Nella parte sinistra del grafico, dove il fluido di lavoro è ancora in monofase, la differenza tra le configurazioni testate non è rilevante; al contrario, è possibile notare che le prove effettuate a 1,3 bar hanno prestazioni migliori fino a 600 W perché la condizione di lavoro bifase inizia prima (la temperatura di saturazione a 1,3 bar è di 42 °C), ma la condizione di dry out, evidenziata dal repentino aumento delle temperature all'aumentare della potenza, si verifica prima.

Alla pressione di 2,5 bar (temperatura di saturazione pari a 60 °C), invece, le prestazioni per una potenza medio/bassa sono penalizzate perché il fluido di lavoro rimane pressoché in monofase, ma la potenza massima asportabile aumenta perché la condizione di dryout è “ritardata”.

Per confrontare le prestazioni dei due condensatori occorre considerare le curve con diverso indicatore (due punti dello stesso colore sono caratterizzati dalla stessa portata massica e dallo stesso livello di pressione; i triangoli sono caratterizzati dall'utilizzo del nuovo condensatore).

È possibile notare che a bassa pressione i benefici legati al nuovo condensatore non sono significativi, mentre, a pressioni più elevate, il nuovo condensatore inizia a fornire un notevole miglioramento delle prestazioni.

In particolare, il miglioramento maggiore si ha per la configurazione con il livello di pressione più alto e la portata massica maggiore (2,5 bar, 50 kg/h).

Per tutte le prove successive è stato utilizzato il secondo condensatore perché in grado di garantire una completa condensazione del fluido di lavoro anche ad elevate temperature di ingresso.

2.5.4 Risultati sperimentali dei test con etanolo

In questa sezione verranno presentati i risultati ottenuti utilizzando una miscela azeotropica di Etanolo (96% in massa) e Acqua (4% in massa) come fluido di lavoro: la temperatura di saturazione della miscela a 1

atm è di 78°C e, durante il test, il fluido è stato portato fino alla condizione di dryout. Nel seguito si potrà far riferimento a tale miscela anche indicandola solo come etanolo.

Tutte e quattro le configurazioni della sezione di prova sono state testate con questa miscela a tre diversi valori di setpoint della pressione (1,1 bar, 0,19 bar e 1,3 bar).

La temperatura di saturazione della miscela a 1,1 bar è di 80°C, a 0,19 bar è di 41°C e a 1,3 bar è di 85°C.

Sulla sezione A100 sono state testate due portate massiche (23 kg/h e 11,5 kg/h) a 1,1 bar (fig.36)

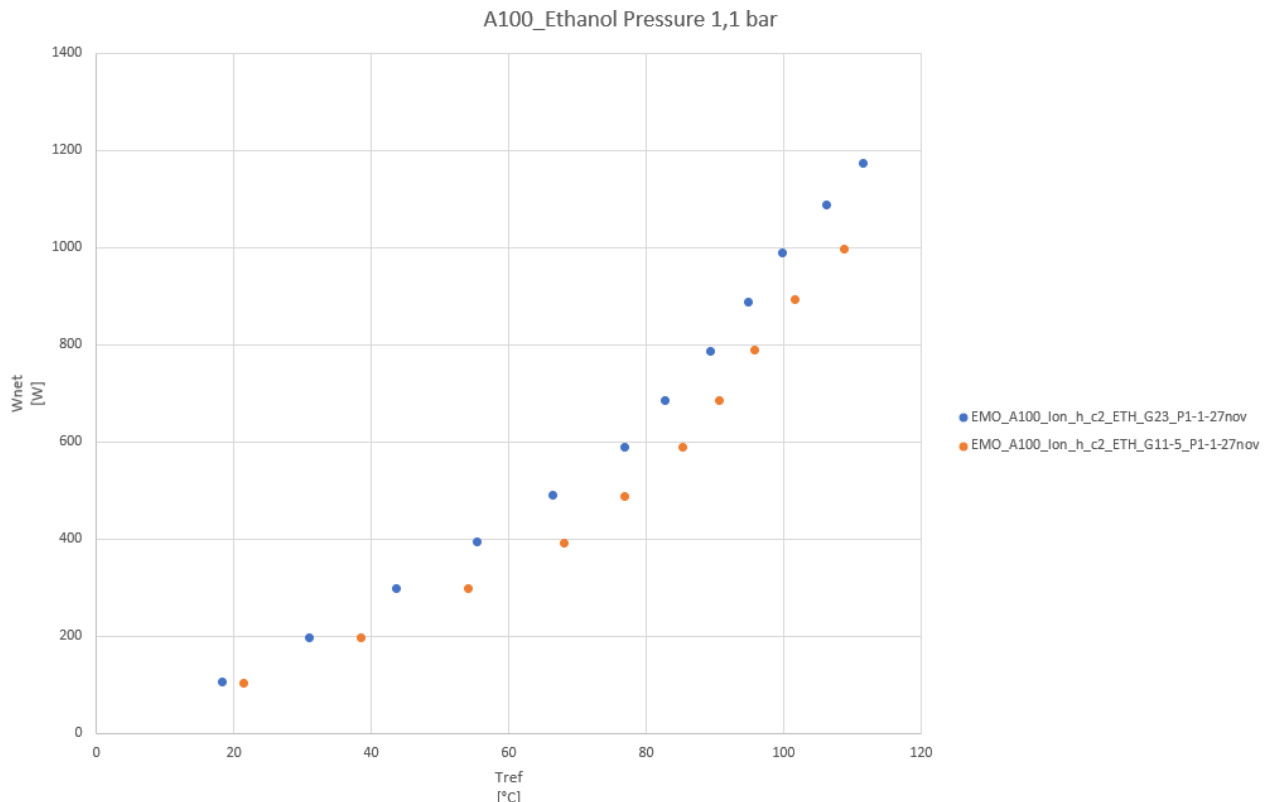


Figura 36. : Wnet vs Tref, A100, Etanolo, Pressione 1,1 bar

Il grafico in figura 36 mostra due andamenti simili per le due diverse portate massiche; nella parte iniziale del grafico le due serie di punti sono quasi sovrapposte e mostrano un andamento lineare perché in questa condizione il fluido è ancora monofase, quindi si può concludere che, con questa configurazione, per potenze molto basse, è possibile ottenere un simile effetto di raffreddamento con una bassa dipendenza dalla portata massica.

Per regimi di media e alta potenza, invece, i punti non sono più sovrapposti, ma mantengono una distanza costante durante quasi tutta la curva con prestazioni migliori alla portata maggiore. La potenza massima dissipata dalla configurazione da 23 kg/h è di 1200 W, mentre la configurazione da 11,5 kg/h è stata fermata a 1000 W. Per queste due portate 1200 W e 1000 W erano rispettivamente la potenza massima sostenibile per rispettare il valore di soglia (140 °C) imposto alla temperatura dei riscaldatori per motivi di sicurezza e per rispettare la temperatura massima che un modulo IGBT può sopportare.

Per ridurre la temperatura di saturazione della miscela e quindi anticipare la condizione di raffreddamento bifase, la pressione è stata ridotta a 0,19 bar mediante una pompa del vuoto e mantenuta costante a tale valore. A 0,19 bar la temperatura di saturazione della miscela Etanolo/Acqua è di circa 40 °C; per questo motivo la condizione bifase si instaura a potenza più bassa e quindi si prevede un miglioramento delle prestazioni in questo range, mentre è possibile un leggero peggioramento nel range di alta potenza dovuto all'anticipazione della condizione di dryout.

Sulla sezione A100 sono state testate tre portate massiche (23 kg/h, 11,5 kg/h e 6 kg/h) a 0,19 bar (fig.37)

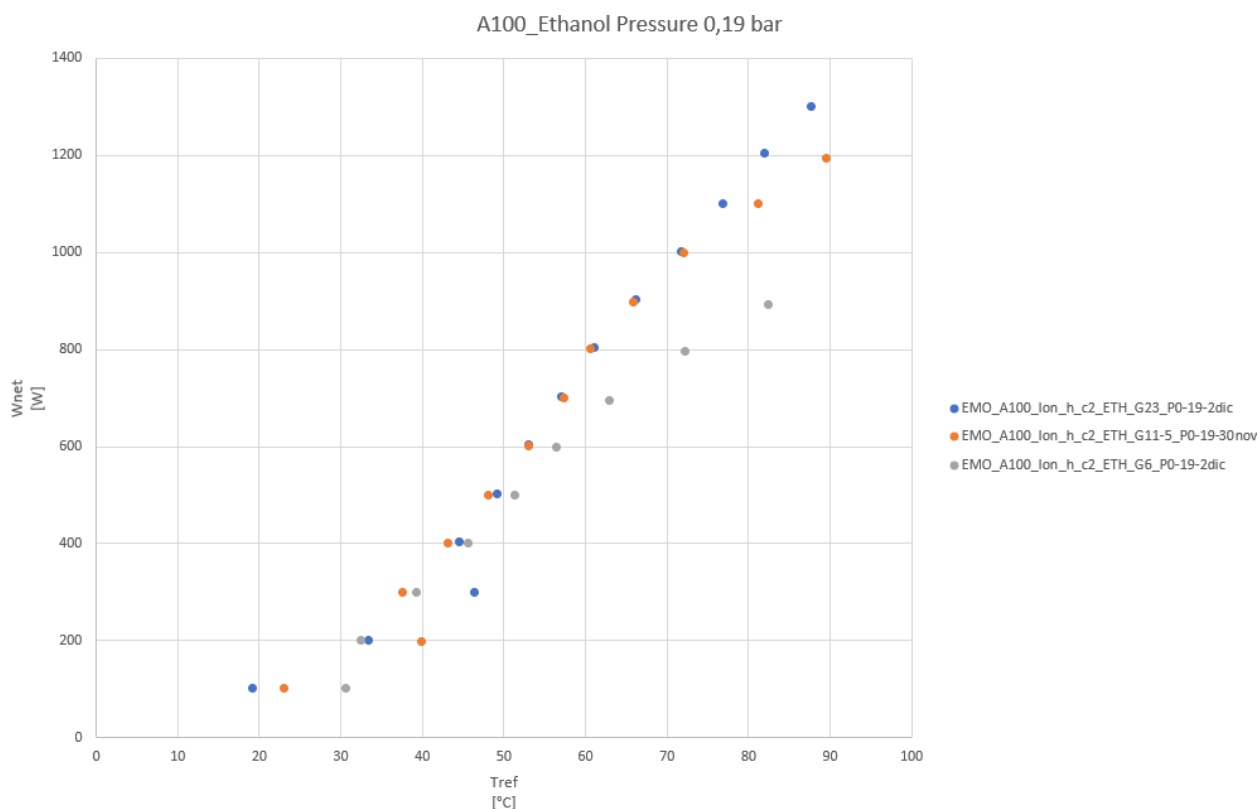


Figura 37. : Wnet vs Tref, A100, Etanolo, Pressione 0,19 bar

Il grafico in figura 37 mostra l'andamento delle tre portate massiche considerate; la disposizione dei punti sperimentali, soprattutto nella fascia di bassa potenza, è leggermente diversa rispetto al caso con pressione di 1,1 bar: è evidente un brusco cambiamento di pendenza delle curve (in due casi si nota anche un'isteresi).

Questo diverso andamento si verifica perché abbassando la pressione di ingresso, la pressione di saturazione diminuisce e il cambio di fase avviene molto più rapidamente rispetto a prima.

Per questo motivo è possibile avere un incremento della potenza asportata accompagnato da una riduzione della temperatura superficiale del riscaldatore. In questo caso, come predetto in precedenza, si ha un miglioramento delle prestazioni nella fascia di bassa potenza, ma, d'altra parte, nella fascia di alta potenza non si nota una significativa riduzione delle prestazioni di scambio termico a meno di scendere a valori di portata estremamente bassa come i 6 kg/h.

Da questo grafico risulta infine evidente che, a differenza dei test a 1,1 bar, fino a 1000 W non ci sono differenze tra la configurazione da 23 kg/h e quella da 11,5 kg/h; fino a 600 W, anche il 6 kg/h mostra prestazioni paragonabili agli altri due layout.

Questa osservazione presenta un'importante conseguenza pratica: se la potenza massima dissipata dal modulo IGBT dell'EV è inferiore a 600 W, teoricamente non è necessario implementare un sistema di raffreddamento che funzioni con una portata massica di 23 kg/h ma è sufficiente utilizzare 6 kg/h.

La riduzione della portata massica è un aspetto cruciale perché porta ad una riduzione delle dimensioni dei componenti, in particolare della pompa, portando ad una minore potenza di pompaggio e, quindi, ad un ridotto consumo di energia delle batterie; inoltre una minore portata massica garantisce una riduzione del peso totale ed anche una riduzione del costo dell'impianto.

Sempre sulla sezione A100 è stata testata una sola portata massica (23 kg/h) alla pressione di 1,3 bar (fig.38).

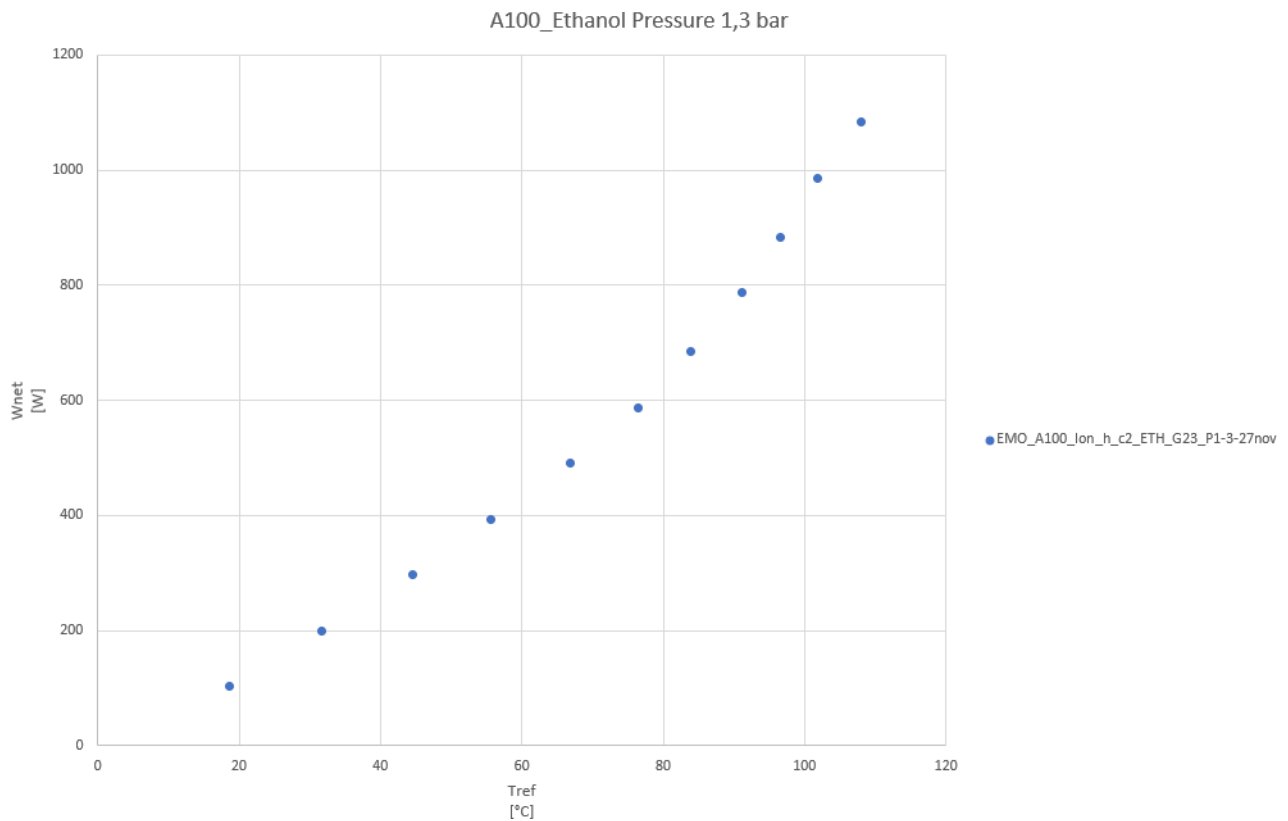


Figura 38. : Wnet vs Tref, A100, Etanolo, Pressione 1,3 bar

Alla pressione di 1,3 bar la temperatura di saturazione della miscela è di circa 85 °C; per questo motivo l'incipit dell'ebollizione è estremamente ritardato. Il grafico non mostra un brusco cambiamento di pendenza come è avvenuto ad esempio a 0,19 bar perché il cambiamento di fase avviene lentamente e durante questa prova si è formata una quantità molto piccola di vapore. Per la maggior parte della prova il fluido di lavoro è rimasto in monofase, quindi si è deciso di concentrare la ricerca su livelli di pressione più bassi.

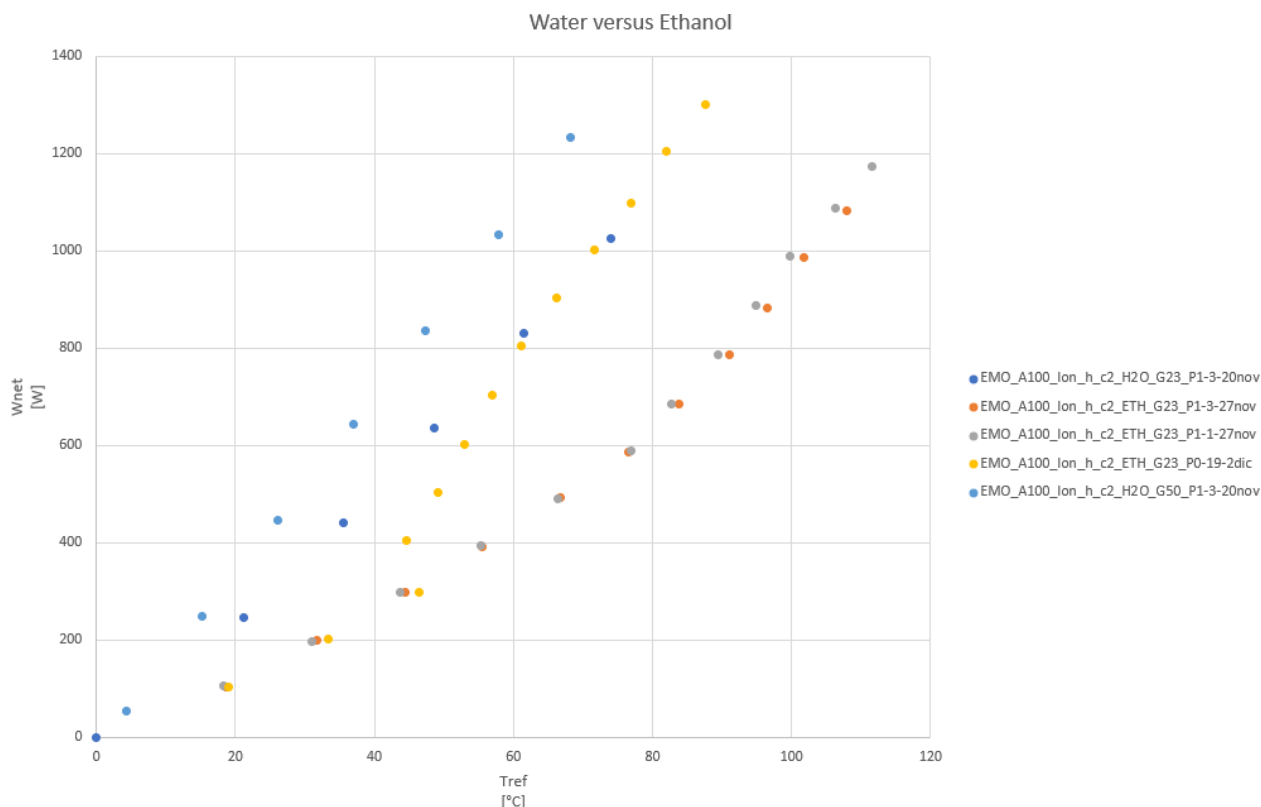


Figura 39. Confronto tra acqua ed etanolo - evaporatore A100

Il grafico in figura 39 mostra un confronto tra le curve di ebollizione ottenute nell'evaporatore A100 con l'acqua e l'etanolo a tre diversi livelli di pressione, entrambi i fluidi con una portata massica di 23 kg/h.

Per valori bassi della potenza, le tre serie di punti riguardanti l'etanolo sono perfettamente sovrapposte, mentre per valori di potenza crescenti i punti a 0,19 bar deviano improvvisamente: in questo caso, infatti, l'evaporazione avviene prima rispetto alle altre due e anche molto più rapidamente e intensamente. Grazie a questa improvvisa evaporazione il coefficiente di scambio termico aumenta molto, determinando un miglior rendimento: a parità di potenza sottratta, la temperatura di riferimento, e di conseguenza la temperatura della superficie del riscaldatore, è molto più bassa (ad esempio con una potenza sottratta di 1000 W, la temperatura di riferimento a 0,19 bar è 71,7 °C, mentre a 1,3 bar è 101,3 °C).

Inoltre, il grafico consente un interessante confronto tra il raffreddamento ad acqua monofase a 1,3 bar (punti blu scuro) e il raffreddamento bifase con etanolo. Quando l'etanolo è ancora in monofase, il raffreddamento ad acqua è molto più efficace (perché il calore specifico dell'etanolo in fase liquida a 1,3 bar è di soli 3,1 kJ/kgK), ma, considerando la configurazione a 0,19 bar, è evidente che all'inizio della condizione di lavoro bifase le prestazioni dei due fluidi di lavoro sono simili (l'etanolo mostra prestazioni leggermente migliori ad alti livelli di potenza) perché il coefficiente di scambio termico della miscela bifase aumenta notevolmente.

Considerando gli altri due livelli di pressione (1,1 bar e 1,3 bar) la condizione di lavoro bifase inizia più tardi e, inoltre, lo sviluppo del regime bifase è lento e graduale. Per questo motivo le prestazioni di queste due configurazioni sono peggiori rispetto all'acqua in quanto l'evaporatore funziona solo parzialmente in condizione bifase: la parte prossima all'uscita funziona correttamente nella condizione desiderata, mentre la parte iniziale lavora in monofase.

Nessuna delle configurazioni considerate con etanolo può fornire le stesse prestazioni del raffreddamento ad acqua monofase con una portata massica di 50 kg/h.

Passiamo adesso a considerare i test effettuati sull'evaporatore cosiddetto A100-2, considerando inizialmente le prove a 1,1 bar e tre portate massiche (23 kg/h, 11,5 kg/h e 6 kg/h) (fig.40).

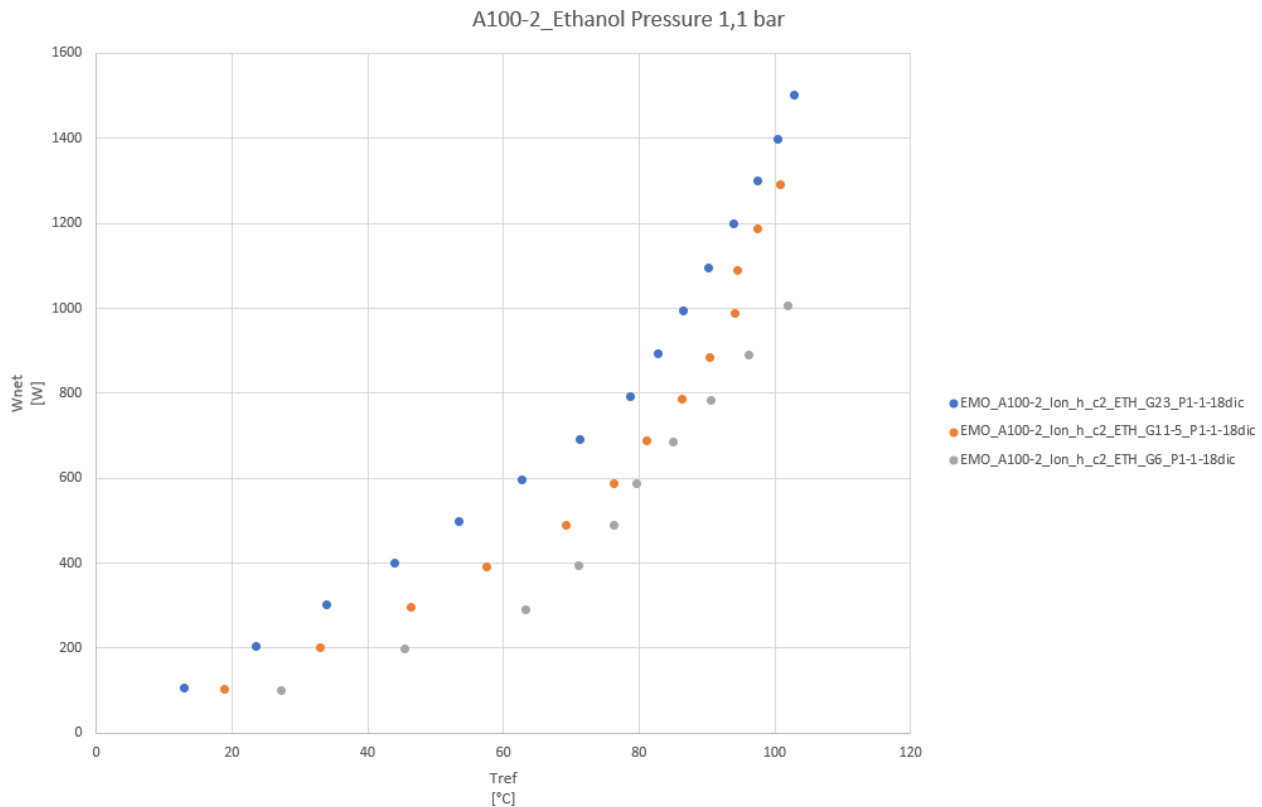


Figura 40. Wnet vs Tref, A100-2, Etanolo, Pressione 1,1 bar

Il grafico in figura 40 mostra le curve di ebollizione per le tre portate massiche testate; per tutte e tre gli andamenti la parte iniziale è caratterizzata da un trend lineare, perché il regime bifase si deve ancora instaurare (la temperatura di saturazione della miscela a 1,1 bar è di circa 80 °C).

Quando la miscela raggiunge la temperatura di saturazione in corrispondenza delle pareti della sezione di prova, inizia l'ebollizione e la pendenza della serie di punti cambia (prima quello di portata massica inferiore, poi gli altri: il coefficiente di scambio termico aumenta).

La potenza massima convertita dalle tre configurazioni, mantenendo la temperatura massima dei riscaldatori al di sotto del valore di sicurezza di 140 °C, è rispettivamente di 1500 W, 1300 W e 1000 W.

Sulla sezione A100-2 sono state testate anche tre portate massiche (23 kg/h, 11,5 kg/h e 6 kg/h) a 0,19 bar (fig.41).

Il grafico in figura 41 mostra l'andamento le curve di ebollizione per le tre portate massiche testate; in questa configurazione il passaggio dalla condizione monofase a quella bifase è netto ed è evidente la variazione di pendenza delle tre curve. Le due serie a portata massica maggiore sono caratterizzate da un andamento stabile; si sovrappongono fino a 700 W, mentre per potenze maggiori la configurazione da 23 kg/h mostra prestazioni migliori, con una potenza massima di 1600 W (corrispondente alla potenza massima che il sistema può fornire). Al contrario, la configurazione a 6 kg/h sembra essere meno stabile delle altre due: dopo l'evaporazione la curva non presenta un andamento con qualche oscillazione.

Anche in questo caso si ha un miglioramento delle prestazioni nella fascia di potenza medio-bassa per via della transizione di fase anticipata, mentre nella fascia di alta potenza non si riscontra un degrado significativo.

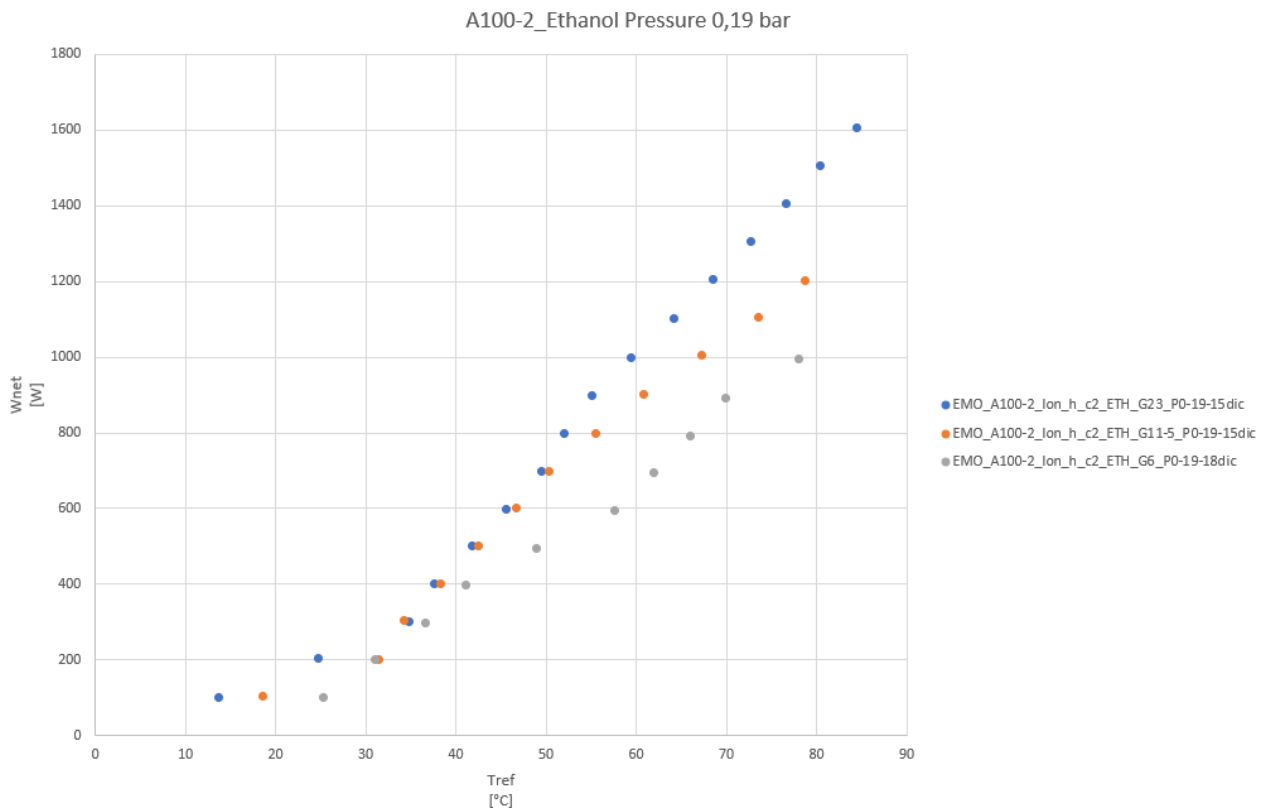


Figura 41. Wnet vs Tref, A100-2, Etanolo, Pressione 0,19 bar

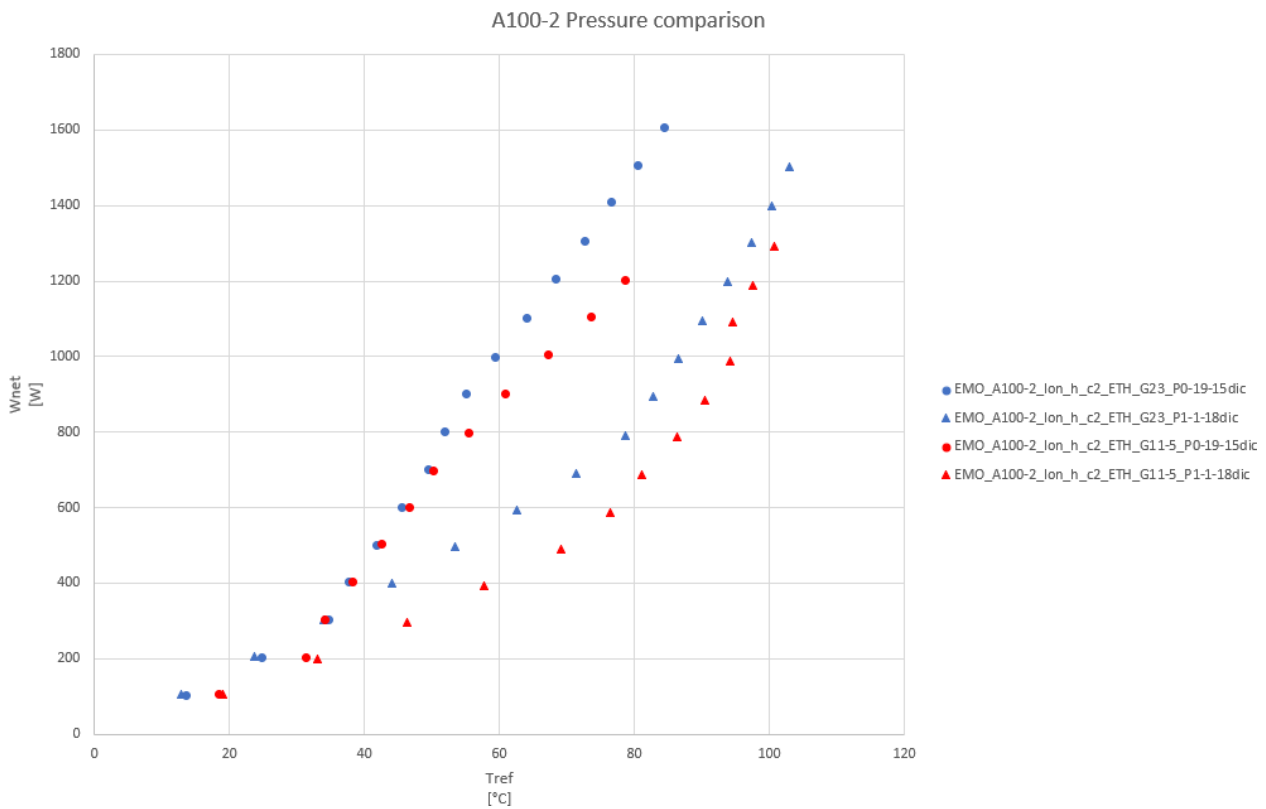


Figura 42. Confronto tra i test a pressione diversa – evaporatore A100-2

Il grafico in figura 42 mostra un confronto tra i test effettuati a diversa pressione sull'evaporatore A100-2 con etanolo. È evidente che le due configurazioni con la pressione più bassa sono più efficienti (almeno nel range 0 W – 1600 W); a causa della minore temperatura di saturazione a 0,19 bar, l'evaporazione avviene prima e più rapidamente provocando un improvviso aumento del coefficiente di scambio termico. Inoltre, è possibile notare come nella configurazione 0,19 bar, fino a 700 W le prestazioni non dipendono dalla portata massica: questa situazione suggerisce che al di sotto di questo limite l'aumento della portata massica non apporti alcun vantaggio. Contrariamente a quanto accade per i test a 1,1 bar, dove il calore asportato a parità di temperatura di riferimento dipende sempre dalla portata massica.

Sei portate massiche (23 kg/h, 11,5 kg/h, 6 kg/h, 15,4 kg/h, 7,7 kg/h e 4 kg/h) sono state testate sulla sezione A100_NG a 1,1 bar (fig.43).

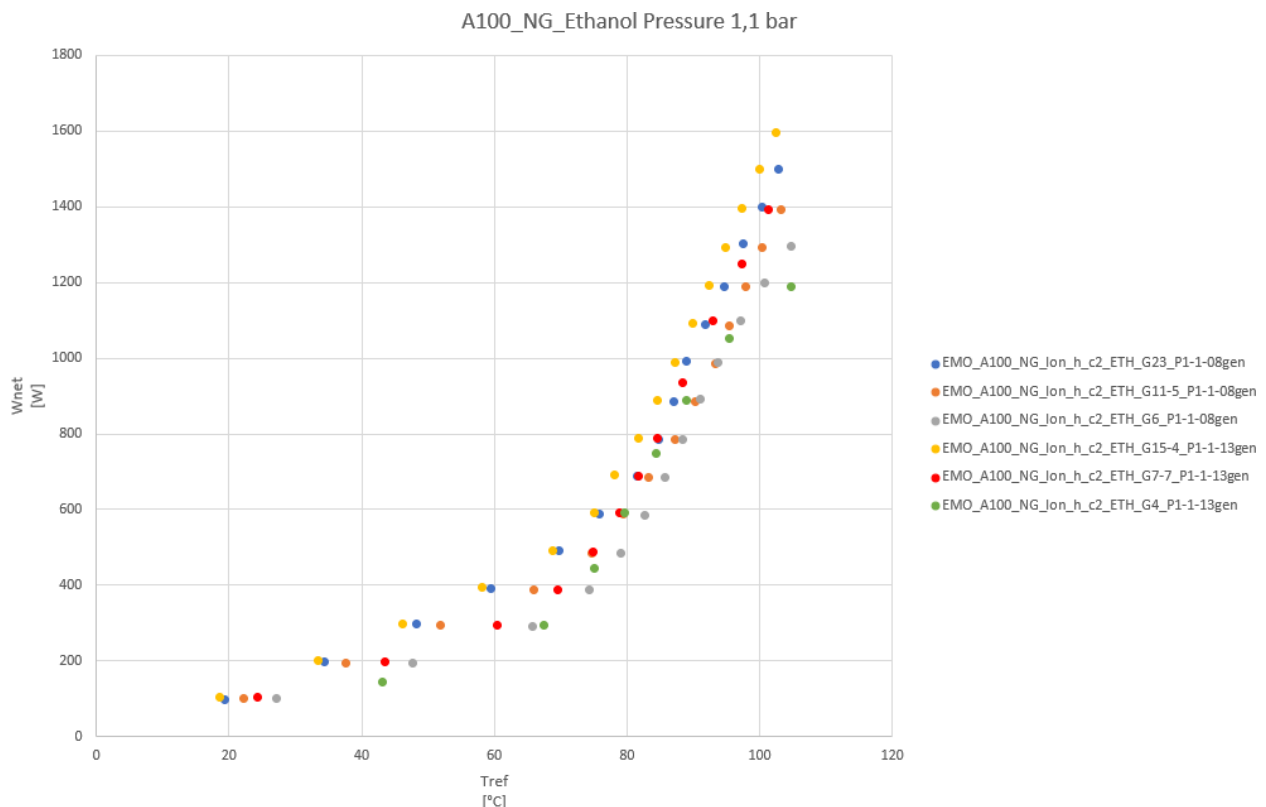


Figura 43. Wnet vs Tref, A100_NG, Etanolo, Pressione 1,1 bar

Il grafico in figura 43 mostra l'andamento delle sei prove nell'evaporatore A100 No-Gap: in questa configurazione della sezione di prova è possibile individuare un primo andamento lineare dei punti e, successivamente, un forte aumento della pendenza delle curve. Si può notare anche un parziale inizio della condizione di dryout per la prova a 4 kg/h (punti verdi). Nel grafico è possibile osservare che in alcuni casi una portata massica inferiore è in grado di sottrarre una potenza termica maggiore rispetto ad una maggiore; questo comportamento è legato alla diversa temperatura ambiente: le prove a 15,4 kg/h, 7,7 kg/h e 4 kg/h sono state effettuate in un giorno diverso rispetto alle altre tre prove. La temperatura ambiente per le prime tre prove era compresa tra 13 °C e 16 °C, mentre per le altre tre prove era compresa tra 17 °C e 19 °C.

La chiusura del gap porta un vantaggio in termini di prestazioni, considerando, ad esempio, che la potenza massima raggiunta con una portata massica di 23 kg/h nella configurazione No-Gap è di 1500 W, mentre nella configurazione normale era di 1200 W.

Probabilmente questo miglioramento non è totalmente correlato alla chiusura del gap, infatti la riduzione dell'area di passaggio (a parità di portata massica) aumenta la velocità del fluido e, di conseguenza, il coefficiente di scambio termico. Per evidenziare questo possibile effetto derivante dalla chiusura del gap

sono state effettuate alcune prove a parità di portata massica specifica: così le prove a portata massica di 15,4 kg/h nella sezione A100_NG e portata massica di 23 kg/h nella sezione A100 sono caratterizzate dalla medesima portata massica specifica. I risultati di questi confronti verranno esplicitati nel seguito.

Adesso consideriamo invece i test effettuati sempre sulla sezione A100_NG ma a 0,19 bar (fig.44), per sei valori di portate massiche (23 kg/h, 11,5 kg/h, 6 kg/h, 15,4 kg/h, 7,7 kg/h e 4 kg/h).

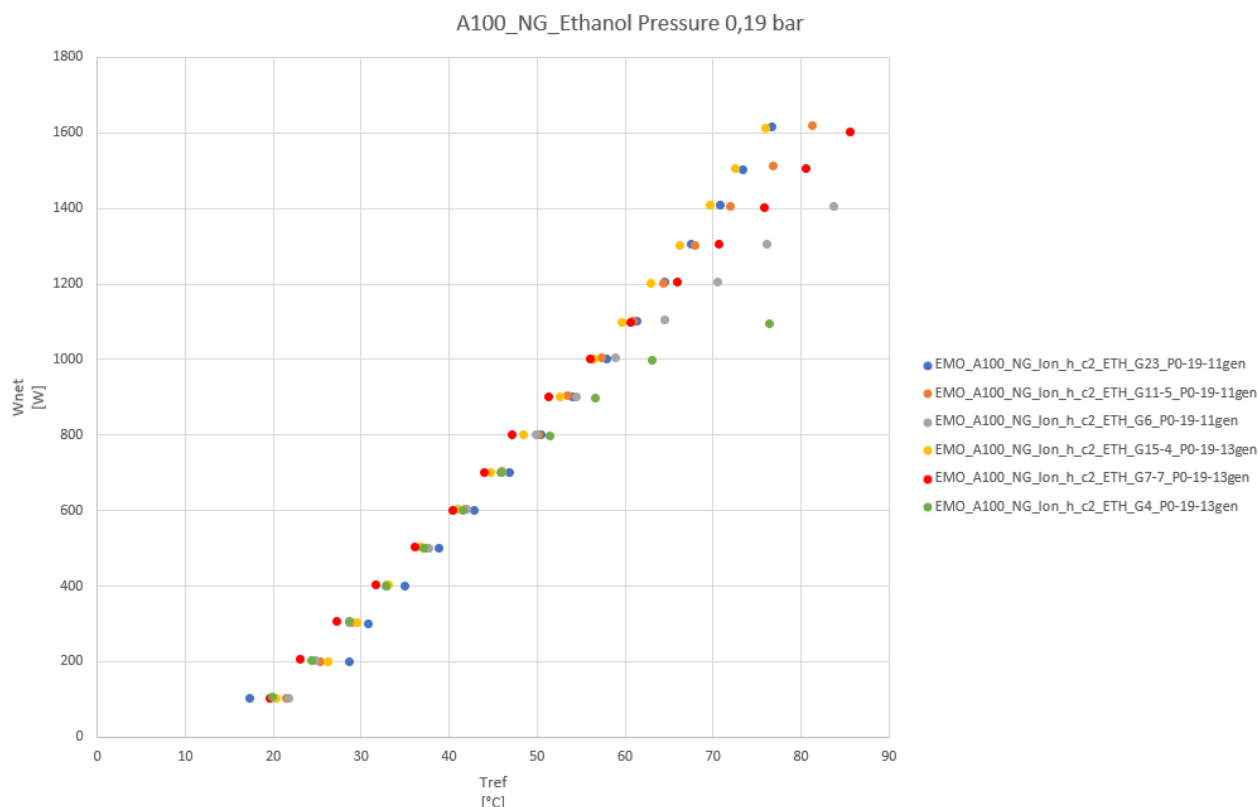


Figura 44. Wnet vs Tref, A100_NG, Etanolo, Pressione 0,19 bar

Il grafico in figura 44 mostra gli andamenti in corrispondenza delle diverse portate massiche considerate; la zona in cui si verifica il cambiamento di fase non è questa volta facilmente identificabile perché in corrispondenza di potenze estremamente basse.

Con la chiusura del gap nella parte alta della zona alettata è possibile notare che, a differenza dell'evaporatore A100 con gap, tutte le curve sono quasi perfettamente sovrapposte e le prestazioni significativamente incrementate. In particolare anche con soli 7,7 kg/h è possibile asportare una potenza termica pari o superiore a 1600 W. Anche le configurazioni con portata in massa inferiore mostrano un grande miglioramento: ad esempio la configurazione da 6 kg/h è ora in grado di asportare fino a 1400 W (contro i 900 W nella configurazione A100) mantenendo una temperatura massima di riferimento di circa 83°C (circa uguale alla temperatura massima di riferimento della configurazione A100).

Anche in questo caso, come per l'A100_NG a 1,1 bar, il grande miglioramento delle prestazioni rispetto alla configurazione dell'A100 non può essere correlato solo alla chiusura del gap, ma bisogna considerare che la riduzione della sezione di passaggio provoca un aumento della velocità del fluido e, di conseguenza, un aumento del coefficiente di scambio termico. Come sopra, tale aspetto verrà meglio investigato nel seguito della trattazione.

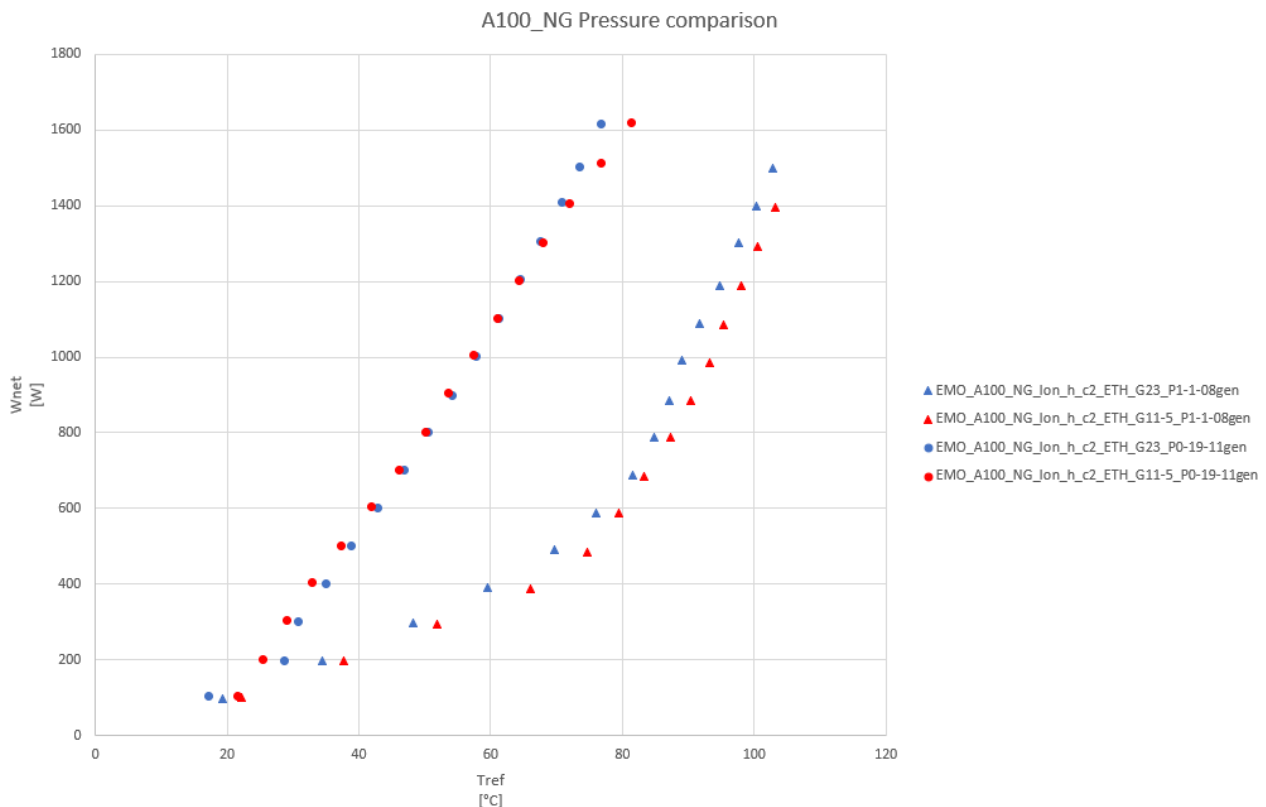


Figura 45. Confronto tra i due livelli di pressione testati su evaporatore A100_NG

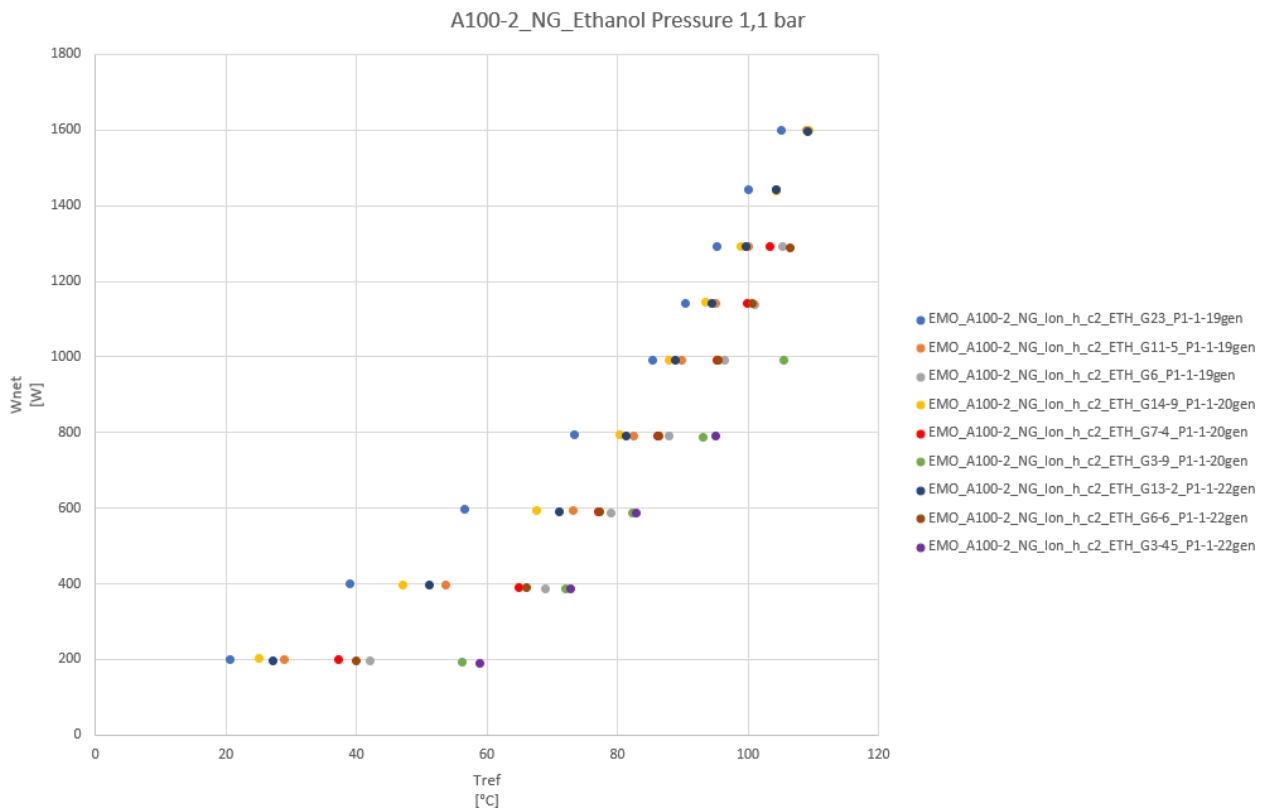
Il grafico in figura 45 mostra il confronto tra i test a 0,19 bar e quelli a 1,1 bar per la sezione A100_NG. Le prestazioni delle due serie a 0,19 bar sono significativamente migliori rispetto alle prestazioni a 1,1 bar (almeno nel range 0 W – 1600 W), infatti, per la minore temperatura di saturazione a 0,19 bar, l'evaporatore lavora quasi sempre in condizioni di efflusso bifase lungo la totalità della sua superficie. A 1,1 bar l'evaporazione avviene solo ad alta potenza assorbita, di conseguenza, a questo livello di pressione, lo scambio termico avviene principalmente in condizione monofase.

Le due serie di prove a 0,19 bar sono quasi perfettamente sovrapposte fino a 1400 W ca.; questa considerazione suggerisce che fino ad un certo limite un aumento della portata massica non migliora l'efficienza frigorifera, ma provoca solo un maggiore consumo di energia.

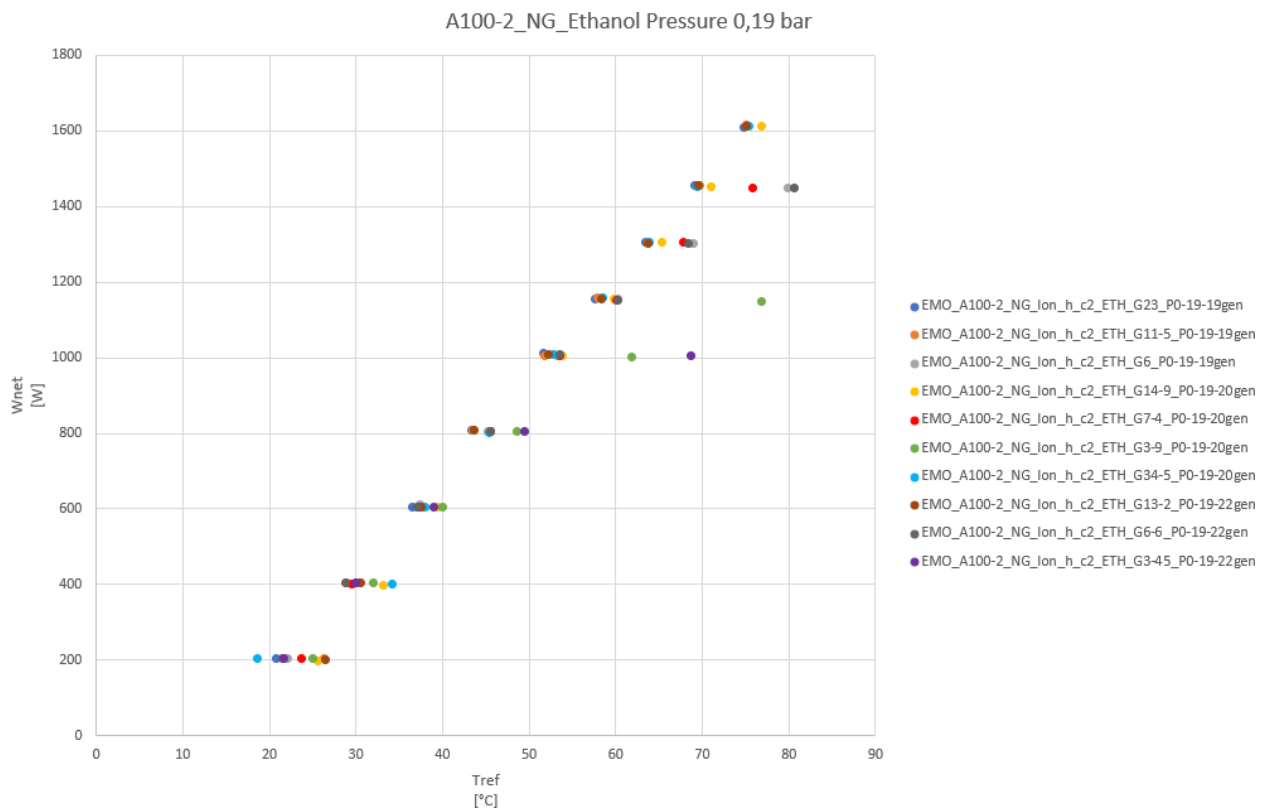
Per le serie a 1,1 bar è confermato un piccolo ma apprezzabile miglioramento delle prestazioni all'aumentare della portata. Comunque, per questa fascia di potenza termica, la riduzione della pressione porta un enorme vantaggio sulle prestazioni del sistema di raffreddamento, dimostrando che l'efficacia di un sistema di raffreddamento bifase è molto superiore rispetto a un sistema monofase convenzionale.

Ben nove portate massiche (23 kg/h, 11,5 kg/h, 6 kg/h, 14,9 kg/h, 7,4 kg/h, 3,9 kg/h, 13,2 kg/h, 6,6 kg/h, 3,45 kg/h) sono state testate sulla sezione A100-2_NG a 1,1 bar (fig.46).

Il grafico in figura 46 mostra l'andamento delle serie di test al variare della portata imposta. Le tre serie a portate più elevate si sono rivelate in grado di smaltire fino a 1600 W di potenza termica, mentre, anche a portate estremamente basse si è riscontrata una buona stabilità fino a potenze dell'ordine dei 1000. Questo miglioramento è legato presumibilmente al maggior numero di alette rispetto alla sezione A100 e, di conseguenza, alla maggiore superficie di scambio termico.



Dieci serie di test a diverse portate massiche (23 kg/h, 11,5 kg/h, 6 kg/h, 14,9 kg/h, 7,4 kg/h e 3,9 kg/h, 13,2 kg/h, 6,6 kg/h, 3,45 kg/h e 34,5 kg/h) sono state effettuate sulla sezione A100-2_NG a 0,19 bar (fig.47)



Nel grafico in figura 47 molte delle serie di dati si sovrappongono, significando che, in questo range di potenza, la dipendenza delle prestazioni dalla portata massica è quasi del tutto trascurabile (totalmente per le cinque serie a portate massiche maggiori).

In questa configurazione il miglioramento delle prestazioni è significativo per tutte le portate massiche, in particolare per la configurazione a bassa portata massica; ad esempio la configurazione da 6 kg/h può dissipare una potenza massima superiore a 1400 W, mentre nella configurazione A100-2 la potenza massima smaltita è inferiore ai 1000 W. Inoltre, rispetto all'A100_NG, in questo evaporatore caratterizzato da canali più piccoli, la temperatura massima di riferimento è leggermente ridotta: considerando la serie a 6 kg/h, nella sezione A100_NG la Tref massima è stata di 83,7 °C, mentre nella sezione A100-2_NG è di 79,9 °C. A portate maggiori questa differenza è presente, ma non così significativa.

La condizione di dryout, caratterizzata dalla variazione della pendenza della curva, è evidente per portate massiche basse (3,45 kg/h e 3,9 kg/h) dove si verifica anche a basse potenze termiche assorbite, mentre, per portate massiche maggiori, l'inizio della condizione di dryout viene spostato a valori più elevati di potenza termica rimossa. Infine, le tre prove a 11,5 kg/h, 23 kg/h e 34,5 kg/h sono perfettamente sovrapposte: per questo si può concludere che, in questa condizione, non è necessario implementare un sistema di raffreddamento con portata massica superiore a 11,5 kg/h se la potenza massima da asportare è di 1600 W.

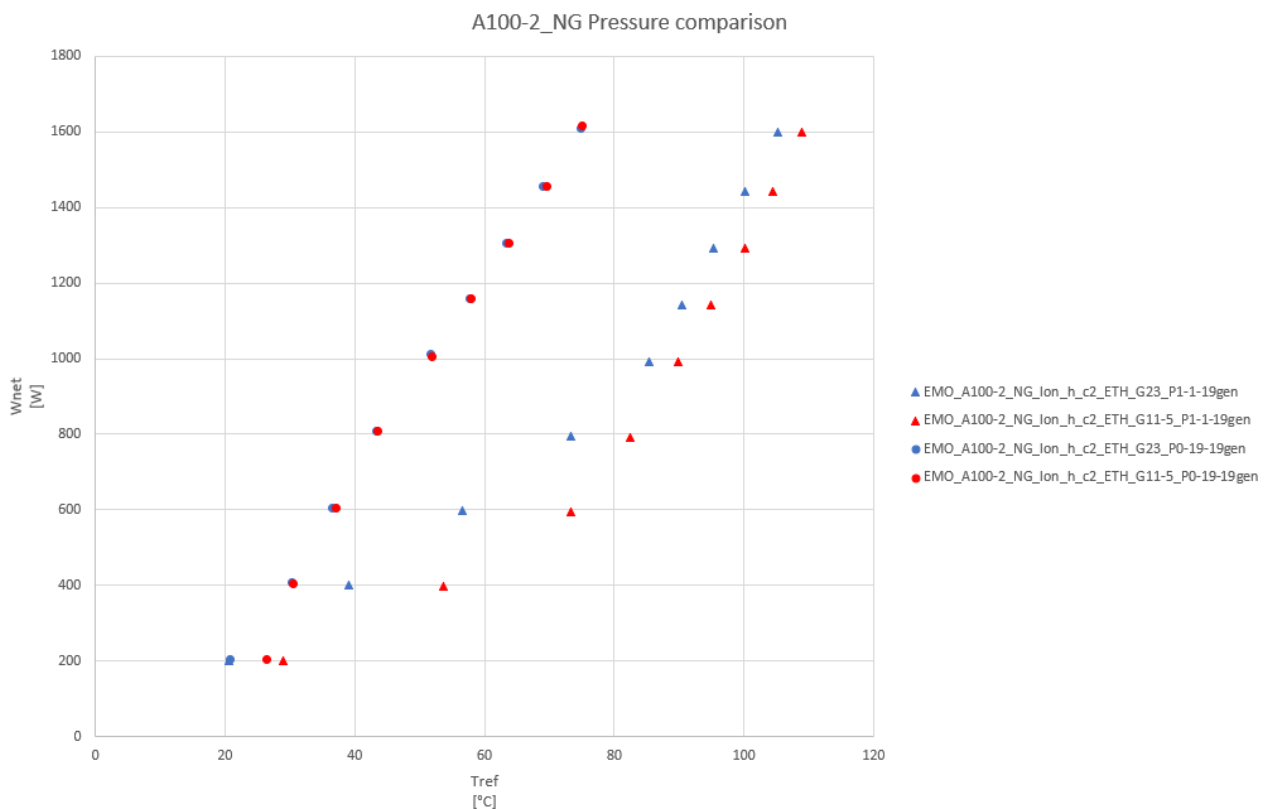


Figura 48. Confronto tra i due livelli di pressione testati su evaporatore A100-2_NG

Il grafico in figura 48 mostra un confronto tra i due livelli di pressione testati (0,19 bar e 1,1 bar) sulla sezione A100-2_NG: i triangoli sono relativi alle condizioni di 1,1 bar, mentre i cerchi sono relativi a la condizione di 0,19 bar.

Per ciò che concerne il confronto tra i risultati ottenuti per le serie a 0,19 e 1,1 bar per l'evaporatore A100-2_NG il grafico in figura 48 mostra, come ampiamente atteso, prestazioni significativamente migliori per la condizione di 0,19 bar; entrambe le configurazioni sono in grado di sottrarre una potenza termica di 1600 W dalla superficie dei riscaldatori, ma la temperatura massima di riferimento è di circa 30 °C inferiore quando la pressione operativa è pari a 0,19 bar.

Il grafico seguente (fig.49) mostra un confronto tra le quattro diverse configurazioni della sezione di prova considerando per tutte una pressione di 0,19 bar e una portata massica di 23 kg/h.

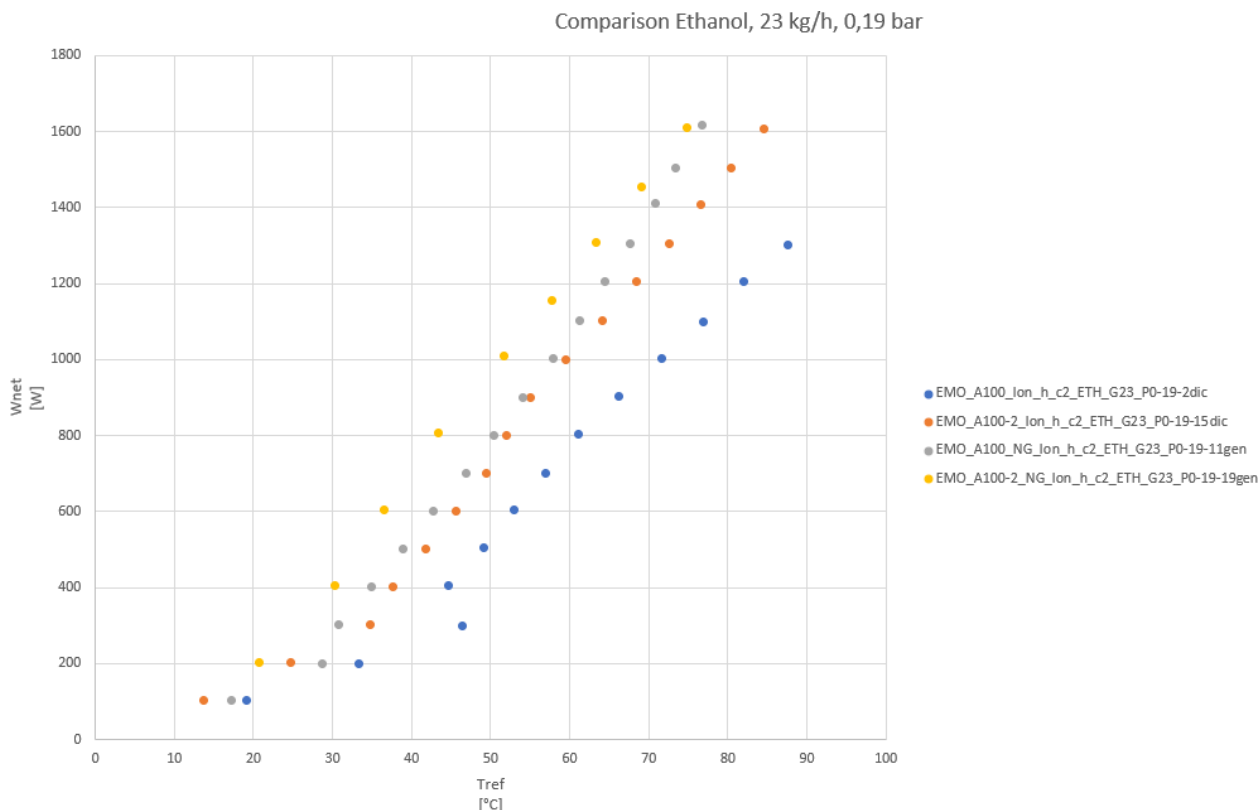


Figura 49. Confronto tra differenti evaporatori, 23 kg/h, 0,19 bar

Il grafico mostra che la configurazione dell'evaporatore più performante, che utilizza l'etanolo come fluido di lavoro e una pressione di 0,19 bar è quella con canali più piccoli e senza gap (configurazione A100-2_NG). Questa conclusione era facilmente prevedibile in quanto la sezione di prova in questione è quella con la maggiore superficie di scambio termico. Tre delle quattro sezioni testate a 0,19 bar con portata pari a 23 kg/h possono rimuovere una potenza termica di 1600 W, ma l'A100-2_NG è caratterizzato da una temperatura di riferimento più bassa in ogni punto della curva.

Come in precedenza, occorre sottolineare che nei due tratti privi di gap nella parte superiore, l'area di passaggio è ridotta e di conseguenza la velocità del fluido all'interno del tratto è maggiore; per questo motivo le migliori performance potrebbero essere legate non solo alla chiusura del gap ma anche ad una maggiore velocità del fluido.

Per confrontare le sezioni di prova mantenendo la stessa velocità dell'efflusso è possibile far riferimento al seguente grafico (fig.50).

In questo caso la portata massica circolante in ciascuna sezione è diversa, ma la portata massica specifica è la stessa: la portata massica specifica si ottiene dividendo la portata massica per l'area di passaggio trasversale dell'evaporatore.

Dal grafico è possibile notare che la sezione A100-2_NG è ancora la migliore, ma la differenza tra questa sezione e la A100_NG è minore rispetto al caso a portata massica costante; si può concludere che la chiusura del gap fornisce in generale un vantaggio anche nei test a portata massica specifica costante.

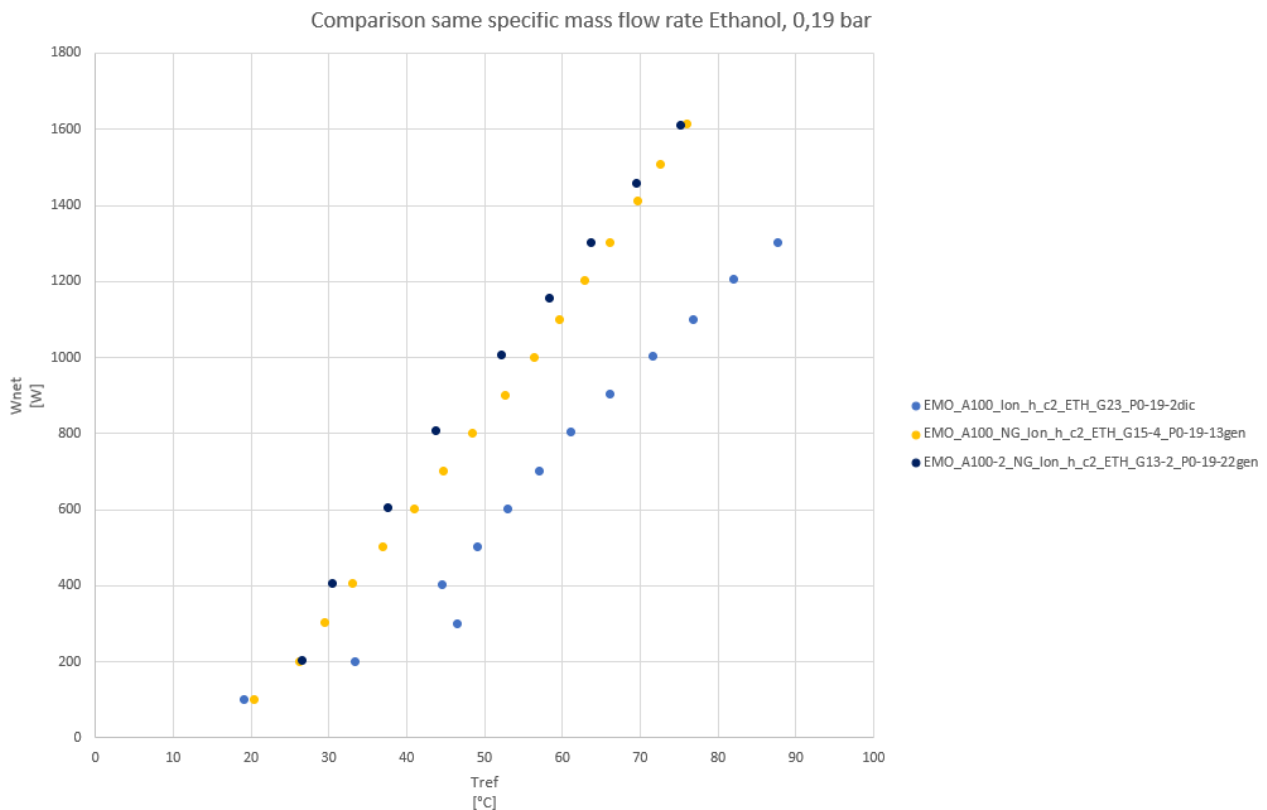


Figura 50. Confronto tra diversi evaporatori a parità di portata massica specifica

2.5.5 Risultati sperimentali dei test con R245FA

In questa sezione verranno presentati i risultati ottenuti utilizzando l'R245FA come fluido di lavoro.

Ad oggi sono state testate solo le due configurazioni con evaporatori senza gap sulla parte superiore, sia in condizioni di pressione variabile che a pressione costante (1,8 bar, temperatura di saturazione di 30 °C). Sono state inoltre eseguite alcune prove con pressione di ingresso pari a 1,35 bar, ma non è stato possibile completare i test a causa dell'insorgenza di problematiche di cavitazione in aspirazione alla pompa: ciò a causa delle perdite di carico nella sezione di prova e nel condensatore che portavano la pressione nel serbatoio a valori molto prossimi alla pressione di saturazione corrispondente alla temperatura ambiente. Nove serie di dati a portate massiche costanti (23 kg/h, 11,5 kg/h, 53,4 kg/h, 40,3 kg/h, 80,6 kg/h, 20,2 kg/h, 13,35 kg/h, 26,7 kg/h e 15,4 kg/h) sono state ottenute sulla sezione A100_NG con pressione variabile durante l'esecuzione di ciascuna serie (fig.51).

Il grafico in figura 51 mostra l'andamento delle relative curve di ebollizione. Per tutte le serie la pressione iniziale P_0 è di 1,35 bar, cui corrisponde una temperatura di saturazione di 22,5 °C: essendo tale temperatura prossima alla temperatura ambiente al momento della prova (19 °C), si può notare come si abbiano condizioni di efflusso bifase anche in corrispondenza della minima potenza assorbita (150 W).

Le serie sono quasi sovrapposte nella parte centrale del grafico, suggerendo una certa indipendenza dalla portata di fluido elaborata dal sistema di raffreddamento. Per ciò che concerne le prove a più bassa portata si può notare come i fenomeni di dryout si manifestino in maniera molto più rapida ed accentuata rispetto alle prove con i fluidi analizzati in precedenza: la pendenza delle curve infatti diminuisce drasticamente con un notevole aumento delle temperature del riscaldatore in corrispondenza di relativamente piccoli aumenti della potenza fornita. Quanto detto è molto importante in quanto occorre mettere a punto un sistema di controllo che possa intervenire efficacemente e molto rapidamente al primo manifestarsi di evidenze di dryout per consentire il ripristino delle condizioni ottimali di lavoro.

Le prove a portate più alte (40,3 kg/h, 53,4 kg/h e 80,6 kg/h) sono in grado di sottrarre la massima potenza termica che può essere fornita dal riscaldatore dell'impianto sperimentale. La pressione massima raggiunta dal sistema 1,96 bar per la prova a 80,6 kg/h con una potenza assorbita di 1600 W.

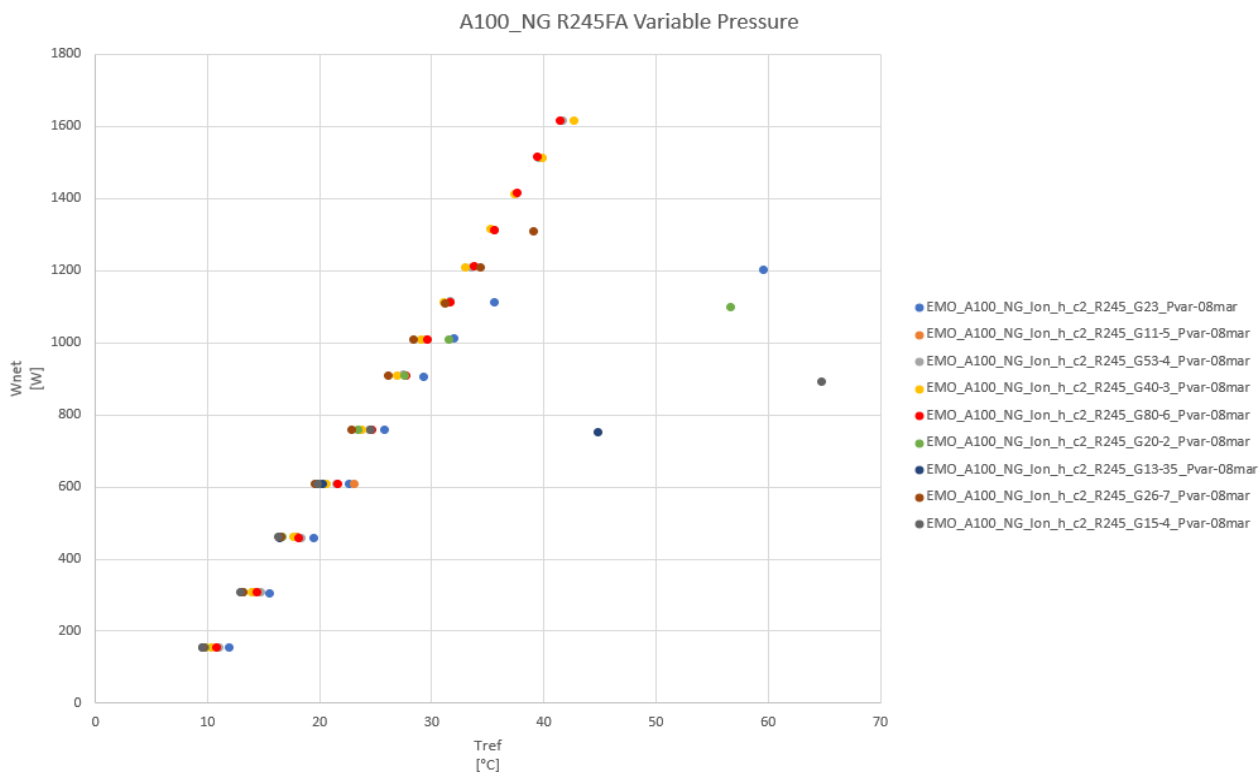


Figura 51. Wnet vs Tref, A100_NG, R245FA, Pressione variabile ($P_0=1,35$ bar)

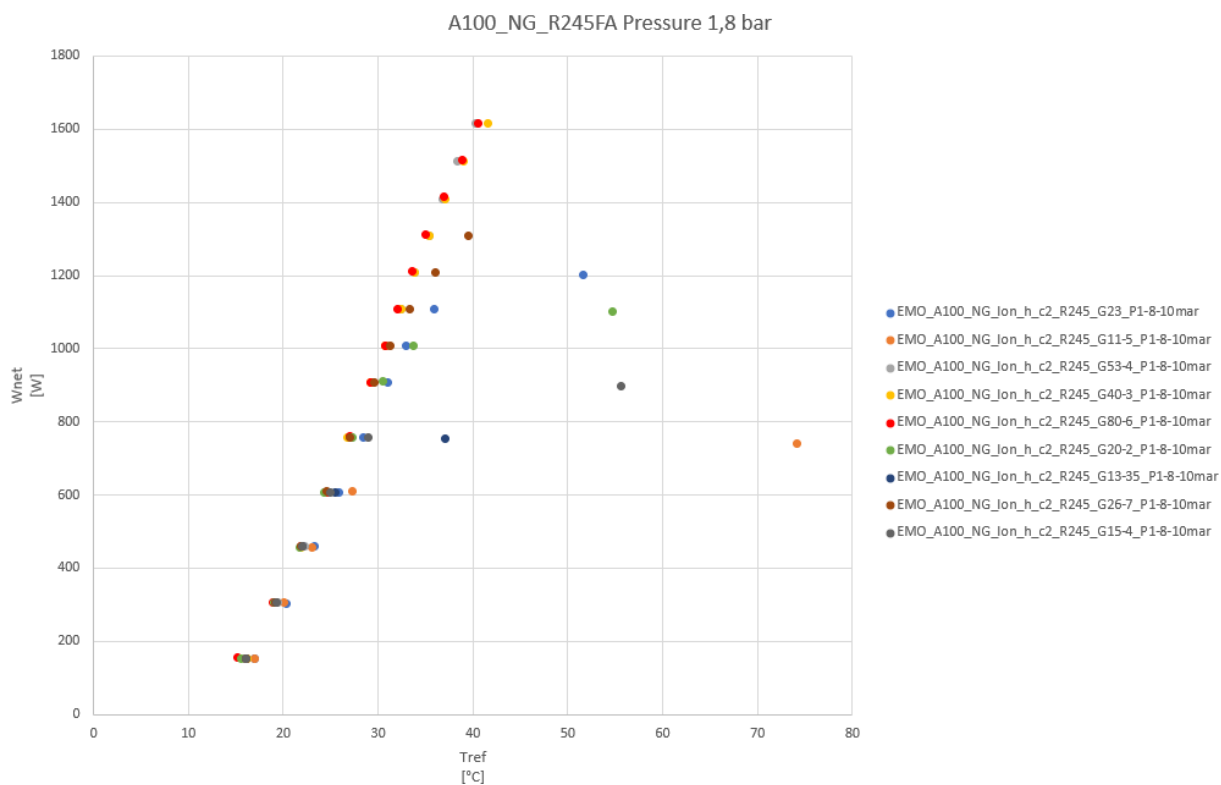


Figura 52. Wnet vs Tref, A100_NG, R245FA, Pressione 1,8 bar

Il grafico in figura 52 mostra l'andamento dei test effettuati con l'evaporatore A100_NG alla pressione di 1,8 bar, variando la portata in un ampio range (23 kg/h, 11,5 kg/h, 53,4 kg/h, 40,3 kg/h, 80,6 kg/h, 20,2 kg/h, 13,35 kg/h, 26,7 kg/h e 15,4 kg/h).

Alla pressione di 1,8 bar, la temperatura di saturazione dell'R245FA è di circa 30 °C: come riscontrato in precedenza, grazie alla bassa temperatura di saturazione, le condizioni di efflusso bifase hanno inizio anche a potenze non elevate. Le ripide pendenze di tutte le curve, inoltre, indicano che siamo in presenza di coefficienti di scambio termico elevati.

Anche in questo caso si può notare una certa indipendenza dalla portata, almeno fino ai 600 W di potenza termica, in maniera molto più netta rispetto alle prove con la miscela etanolo/acqua. Quindi, per maggiore potenza da smaltire, si avvia progressivamente la condizione di dryout a partire dalle portate massiche inferiori. Anche il passaggio alla condizione di dryout è molto netto: il coefficiente di scambio termico tende rapidamente ad un valore molto basso e l'aumento della temperatura del riscaldatore è molto grande.

Le curve a portate maggiori (53,4 kg/h, 40,3 kg/h e 80,6 kg/h) sono caratterizzate da un andamento lineare fino alla potenza massima di 1600 W: probabilmente queste tre le configurazioni potrebbero agevolmente dissipare input di potenza più elevati. Dal grafico si evince, inoltre, che un aumento della portata massica oltre i 40,3 kg/h non porta alcun vantaggio sulle prestazioni termiche dell'impianto, almeno se il target di potenza massima da asportare è pari a 1600 W o inferiore. Una buona previsione delle prestazioni richieste al sistema di raffreddamento potrebbe portare ad una importante riduzione della portata massica, fornendo tutti i vantaggi più volte elencati.

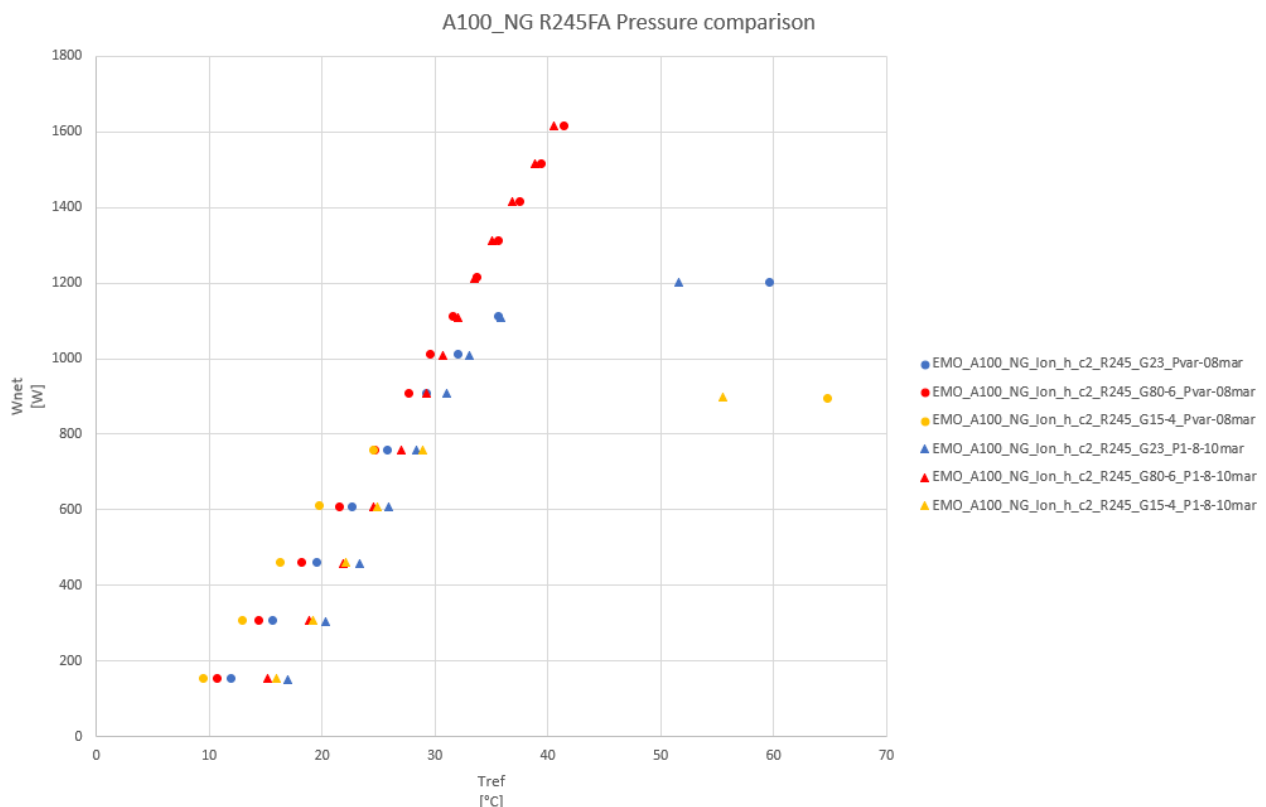


Figura 53. Wnet vs Tref, A100_NG, R245FA, Confronto pressione

Il grafico in figura 53 riporta un confronto le prove a diversa portata condotte sulla sezione A100_NG per le due diverse condizioni di pressione: variabile con valore iniziale di 1,35 bar (cerchi) e costante a 1,8 bar (triangoli).

Questo confronto mostra chiaramente che la condizione di pressione variabile garantisce prestazioni migliori per potenze di bassa e media intensità mentre ad alti livelli di potenza le prestazioni sono comparabili.

La differenza evidenziata può essere facilmente correlata al livello di pressione iniziale inferiore (e, quindi, alla temperatura di saturazione inferiore) delle prove effettuate a pressione variabile: l'evaporazione inizia "prima" e quindi il meccanismo di scambio termico bifase si attiva a bassissima potenza.

La pendenza delle serie nella parte centrale del grafico è simile, ma la condizione di pressione variabile è ancora migliore; infine, ad alta potenza assorbita, le prestazioni sono comparabili con un leggero vantaggio per la condizione di pressione costante. Anche in questo caso è necessario identificare correttamente le reali condizioni di lavoro che dovrà affrontare il circuito di raffreddamento: se la potenza da rimuovere sarà ad esempio inferiore ai 1300 W, un sistema a pressione variabile garantisce migliori prestazioni ed anche un layout dell'impianto più semplice; se invece la potenza da smaltire sarà molto elevata si potrebbe considerare un sistema di regolazione della pressione, sempre immaginando che il conseguente beneficio sulle prestazioni sia tale da giustificare l'aumentata complessità del sistema di controllo e regolazione.

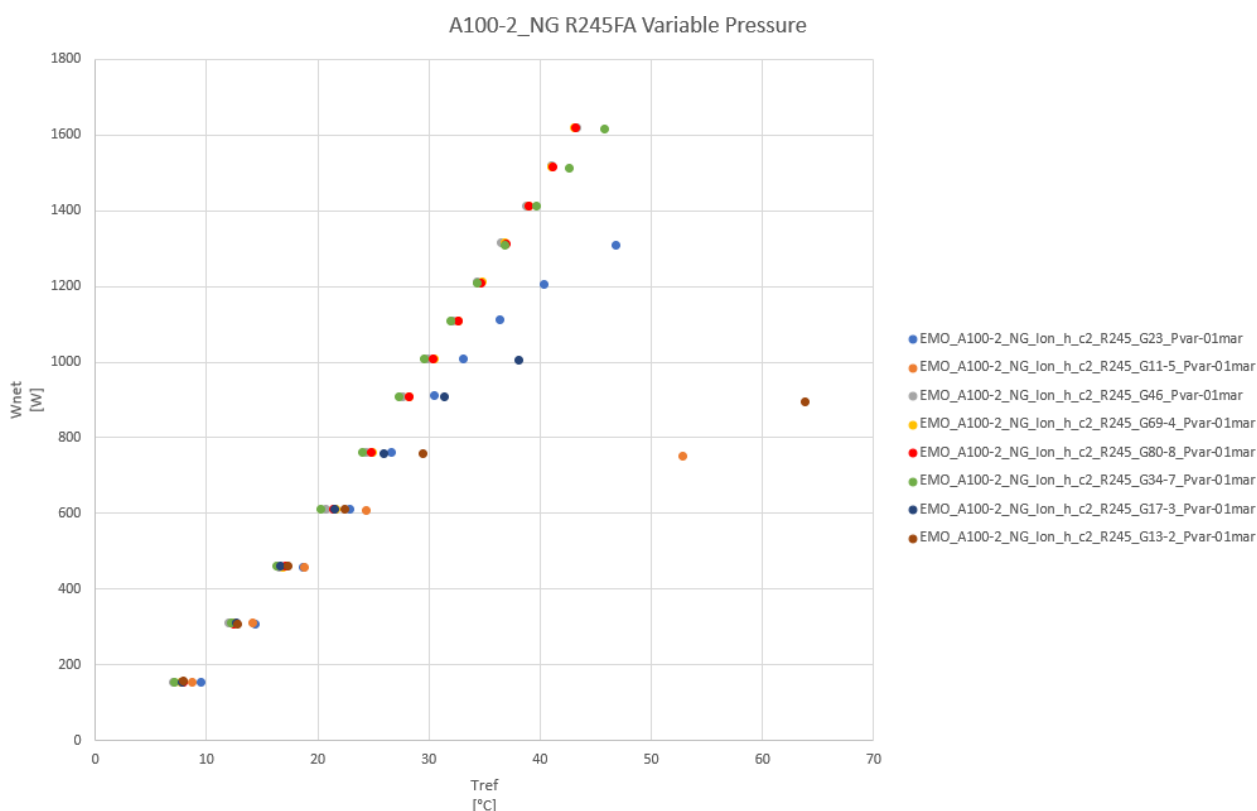


Figura 54. Wnet vs Tref, A100-2_NG, R245FA, Pressione variabile (P0=1,35)

Il grafico in figura 54 mostra l'andamento dei test effettuati con l'evaporatore A100-2_NG a pressione variabile, variando la portata in un ampio range (23 kg/h, 11,5 kg/h, 46 kg/h, 34,7 kg/h, 69,4 kg/h, 17,3 kg/h, 13,2 kg/h e 80,8 kg/h); la pressione iniziale P_0 è di 1,35 bar, cui corrisponde una temperatura di saturazione di 22,5 °C: valgono anche qui le considerazioni sull'immediato instaurarsi del regime di ebollizione anche a basse potenze applicate. Le varie curve presentano una certa sovrapposizione nella parte centrale del grafico e l'inizio della condizione di dryout è evidente per le basse portate massiche; quattro configurazioni (34,7 kg/h, 46 kg/h, 69,4 kg/h e 80,8 kg/h) si sono dimostrate in grado di asportare la massima potenza fornita dal riscaldatore e i loro andamenti sono quasi perfettamente sovrapposti, suggerendo che un aumento della portata massica oltre i 34,7 kg/h non porta significativi benefici alle prestazioni.

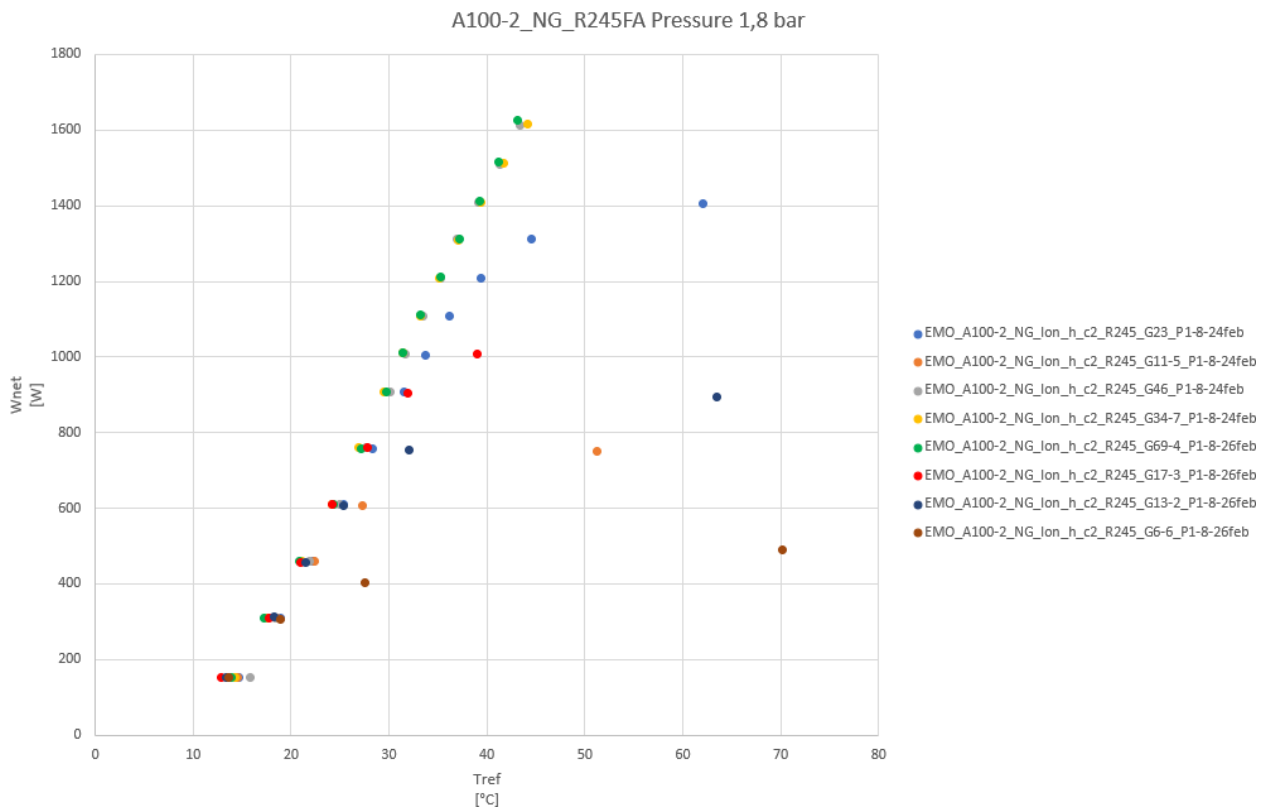


Figura 55. Wnet vs Tref, A100-2_NG, R245FA, Pressione 1,8 bar

Il grafico in figura 55 mostra l'andamento dei test effettuati con l'evaporatore A100-2_NG a pressione costante pari a 1,8 bar, variando la portata in un ampio range (23 kg/h, 11,5 kg/h, 46 kg/h, 34,7 kg/h, 69,4 kg/h, 17,3 kg/h, 13,2 kg/h e 6,6 kg/h). Anche in questo caso la pendenza delle curve è molto ripida e le curve a diversa portata di sovrappongono in ampie zone del grafico.

La maggiore superficie di scambio termico di questa configurazione comporta prestazioni leggermente migliori rispetto all'A100_NG. Alcune brevi considerazioni: con questa sezione di prova, con una portata di 23 kg/h si è in grado di dissipare 200 W di potenza termica in più rispetto alla A100_NG, mentre con 11,5 kg/h si è in grado di dissipare la stessa potenza termica, ma la temperatura massima di riferimento raggiunta è molto più bassa (51 °C contro 74 °C).

Il grafico di figura 56 mostra un confronto tra i test con le tre portate massiche testate sulla sezione A100-2_NG in due diverse condizioni di pressione: pressione variabile con pressione iniziale di 1,35 bar (cerchi) e pressione costante di 1,8 bar (triangoli).

La configurazione a pressione variabile può garantire prestazioni migliori per potenze di bassa e media intensità, in quanto la pressione iniziale (1,35 bar) è inferiore rispetto al valore costante di 1,8 bar e, di conseguenza, la temperatura di saturazione è inferiore.

Con questa sezione di prova, ad alta potenza, la condizione operativa di pressione costante non porta alcun vantaggio; infatti i risultati in questo range sono perfettamente confrontabili. Per tale ragione, considerando un'applicazione reale, anche in questo caso è preferibile un sistema a pressione variabile perché garantisce prestazioni invariate con un sistema più semplice ed economico.

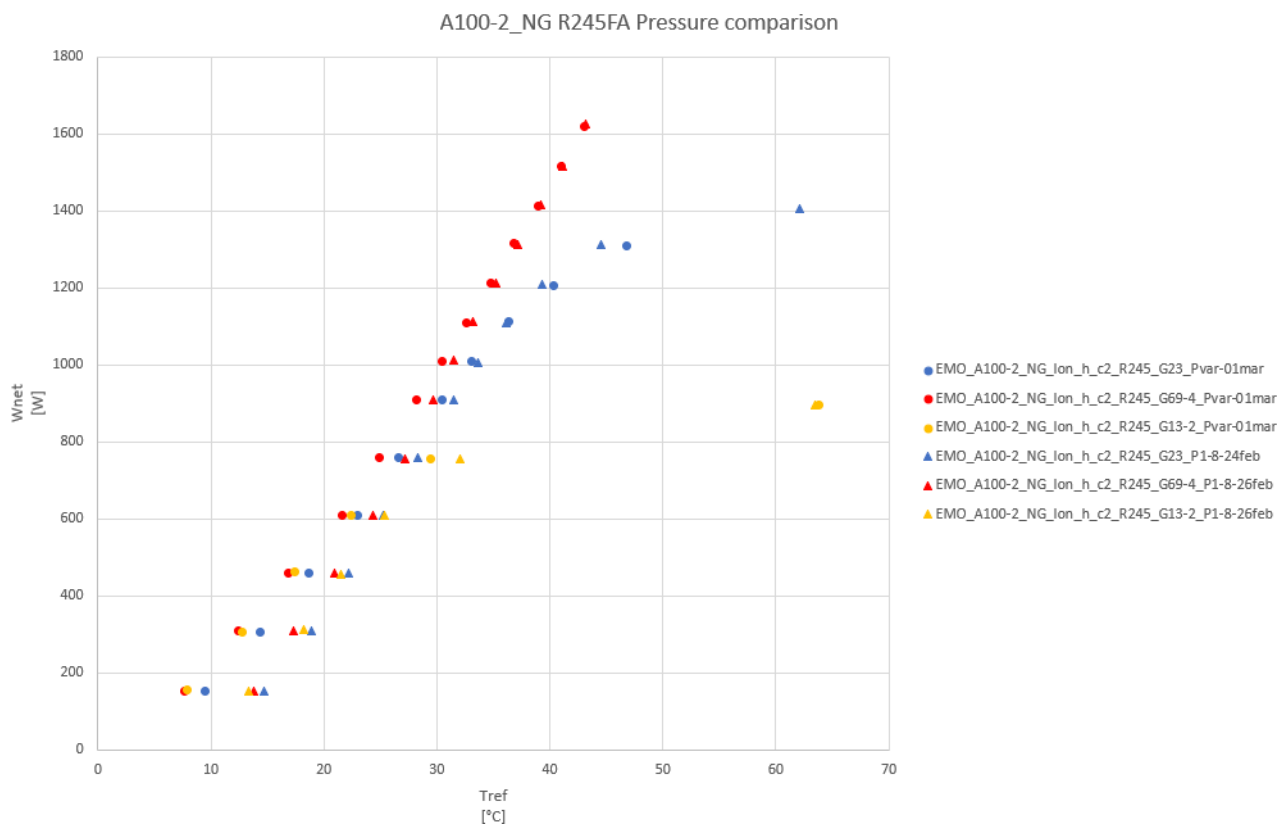


Figura 56. Wnet vs Tref, A100-2_NG, R245FA, Confronto pressione

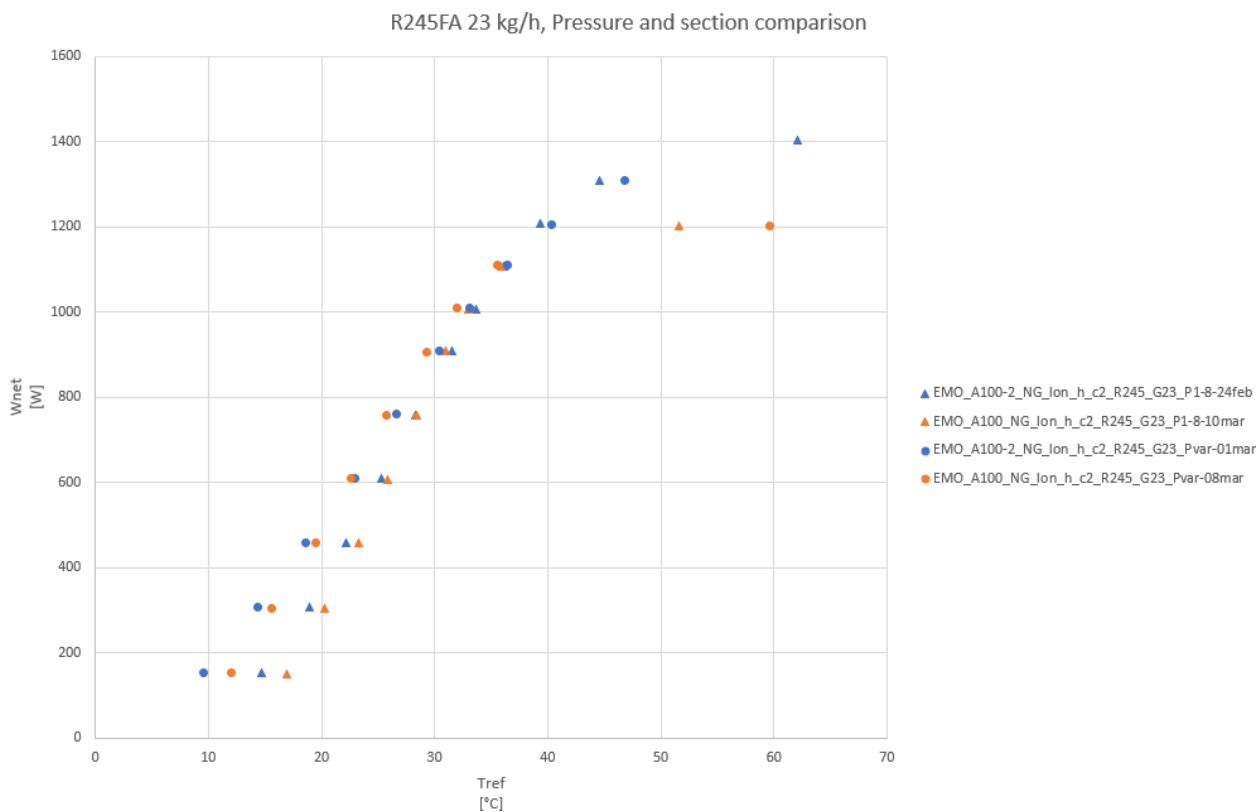


Figura 57. Wnet vs Tref, R245FA, 23 kg/h, confronto pressione ed evaporatori

Il grafico in figura 57 mostra un confronto tra le due sezioni testate utilizzando l'R245FA come fluido di lavoro. I cerchi sono relativi alla condizione di pressione variabile, mentre i triangoli sono relativi alla

condizione di pressione costante di 1,8 bar; i punti blu si riferiscono alla sezione con maggiore superficie di scambio A100-2_NG, mentre i punti arancioni si riferiscono all'altra sezione A100_NG. Si può notare come i dati relativi all'evaporatore A100_NG (curve in giallo) "incrocino" quelli dell'evaporatore A100-2_NG (blu), partendo da prestazioni di poco inferiori alle basse potenze per poi pareggiare se non migliorarle in corrispondenza di potenze via via crescenti, fino a manifestare nuovamente condizioni di scambio peggiori in seguito all'inizio della fase di dryout "prima" delle altre due curve. Tale comportamento può essere ascrivito presumibilmente al diverso flow pattern del fluido bifase all'interno dei canali degli evaporatori al variare della potenza e quindi del flusso termico imposto: nella fascia intermedia di carico termico, i microcanali più larghi della sezione A100_NG sembrerebbero consentire migliori condizioni di scambio termico all'interno dei medesimi.

Nel seguito viene proposto un ulteriore confronto tra le prestazioni dei due evaporatori questa volta considerando condizioni operative che comportino pari valori delle portate massiche specifiche di R245FA (fig.58) e pari pressione d'esercizio 1,8 bar.

Dal grafico è possibile notare che fino a circa 800 W di potenza termica da dissipare le diverse configurazioni sono pressoché equivalenti; per potenze maggiori, invece, l'evaporatore A100_NG palesa migliori condizioni di scambio termico, diversamente da quanto risultava nel confronto a parità di portata massica (fig.57).

Inoltre, fino a 1200 W di potenza termica, non è necessario scegliere una portata massica superiore a 26,7 kg/h, perché il miglioramento delle prestazioni è trascurabile ma la potenza di pompaggio richiesta sarebbe significativamente maggiore.

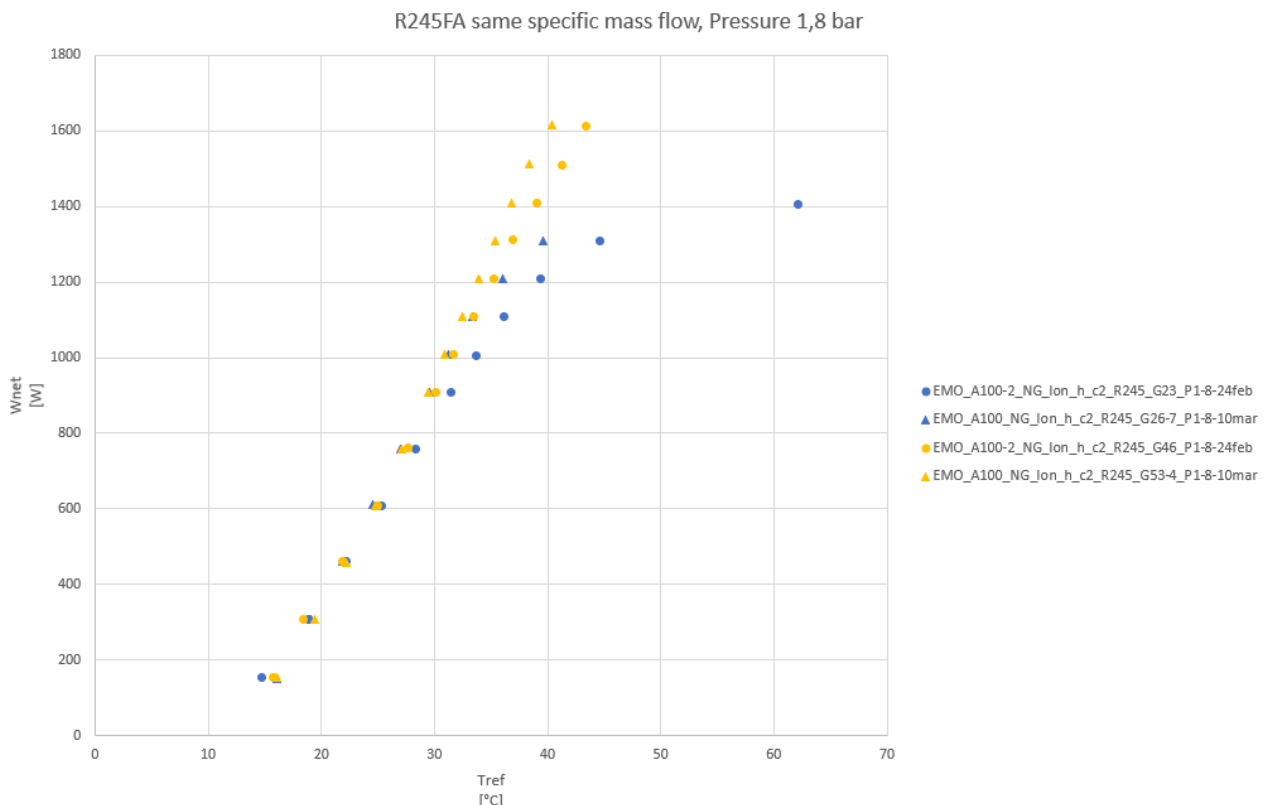


Figura 58. Wnet vs Tref, R245FA, stessa portata massica specifica, Pressione 1,8 bar

In questa ultima parte della sezione verranno analizzate le migliori soluzioni per le due principali geometrie di evaporatore testate, considerando tutte le prove effettuate.

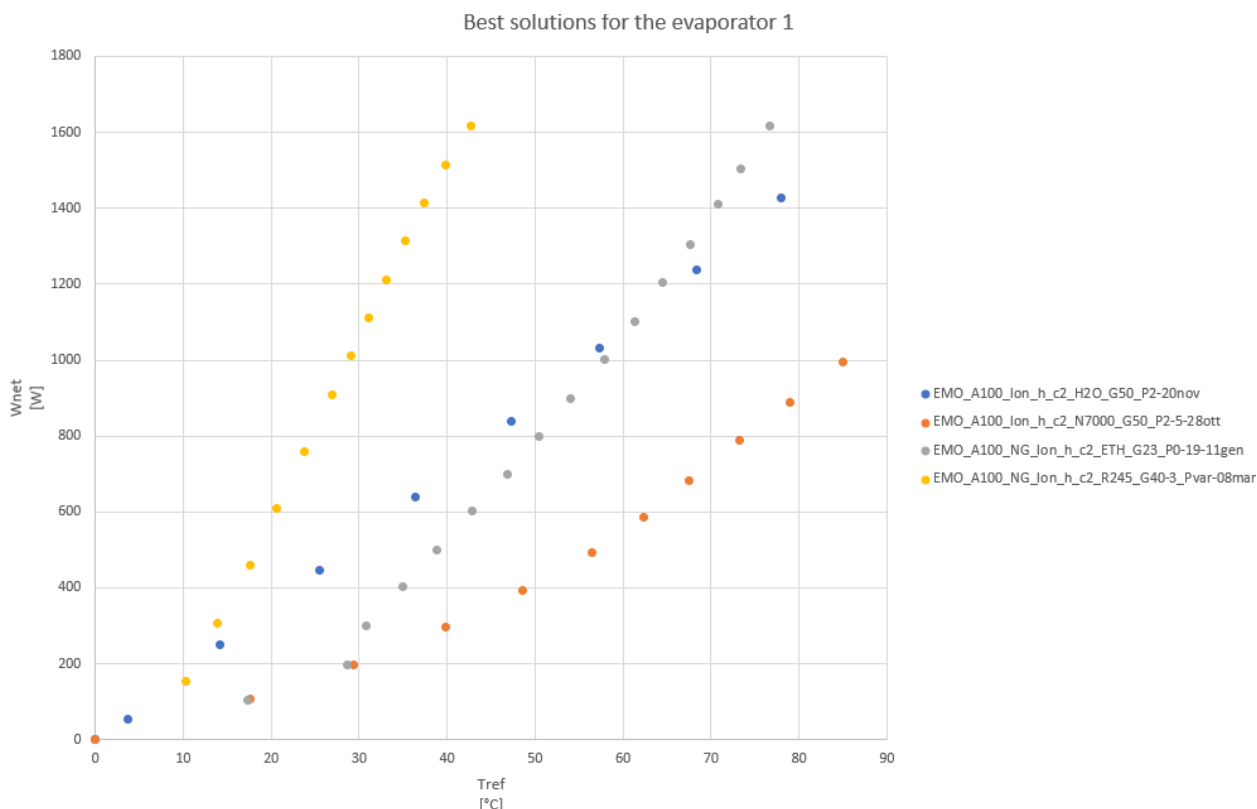


Figura 59. Wnet vs Tref, le migliori soluzioni per evaporatore A100

La figura 59 mostra le migliori soluzioni per la geometria dell'evaporatore A100, quello con larghezza dei microcanali maggiore e minor numero degli stessi. È possibile notare come la configurazione migliore in tutto il range di potenza considerato sia chiaramente quella con R245FA come fluido di lavoro e con condizione di pressione variabile.

Il NOVEC7000 sembra essere la soluzione peggiore, mentre fino a 1000 W l'acqua in monofase funziona meglio dell'etanolo (miscela etanolo/acqua); per valori di potenza superiori l'etanolo in bifase mostra risultati decisamente migliori dell'acqua, sempre di più all'aumentare della richiesta di potenza da dissipare.

Sull'evaporatore A100-2, con più microcanali ma con larghezza inferiore a quella del precedente, sono stati testati solo due fluidi di lavoro, l'R245FA e l'etanolo: come mostrato nel grafico in figura 60, le prestazioni migliori si ottengono con R245FA che è in grado di sottrarre circa 1600 W con una temperatura di riferimento contenuta al di sotto dei 44 °C.

In questi due confronti finali sono state considerate le configurazioni in grado di sottrarre la massima potenza termica erogabile dall'impianto sperimentale; in caso di presenza di curve vicine o sovrapposte, la soluzione migliore è stata ritenuta essere quella con portata massica inferiore.

Da questi due grafici finali risulta evidente, come prevedibile, che la migliore configurazione è caratterizzata dall'utilizzo dell'R245FA come fluido di lavoro: questo è legato al punto di ebollizione più basso rispetto a tutti gli altri fluidi testati; la condizione di lavoro bifase si realizza per assorbimenti di potenza molto bassi e, di conseguenza, il coefficiente di scambio termico è elevato e pressoché costante per ogni carico di potenza termica imposto.

Considerando invece le due migliori soluzioni con R245FA è possibile notare che le prestazioni delle due diverse geometrie di evaporatore sono simili, almeno per le portate massiche considerate e per potenze assorbite fino a 1600 W; in generale, considerando portate di massa inferiori la seconda configurazione di evaporatore (canali piccoli) è in grado di asportare una maggiore potenza termica dovuta alla maggiore superficie di scambio termico.

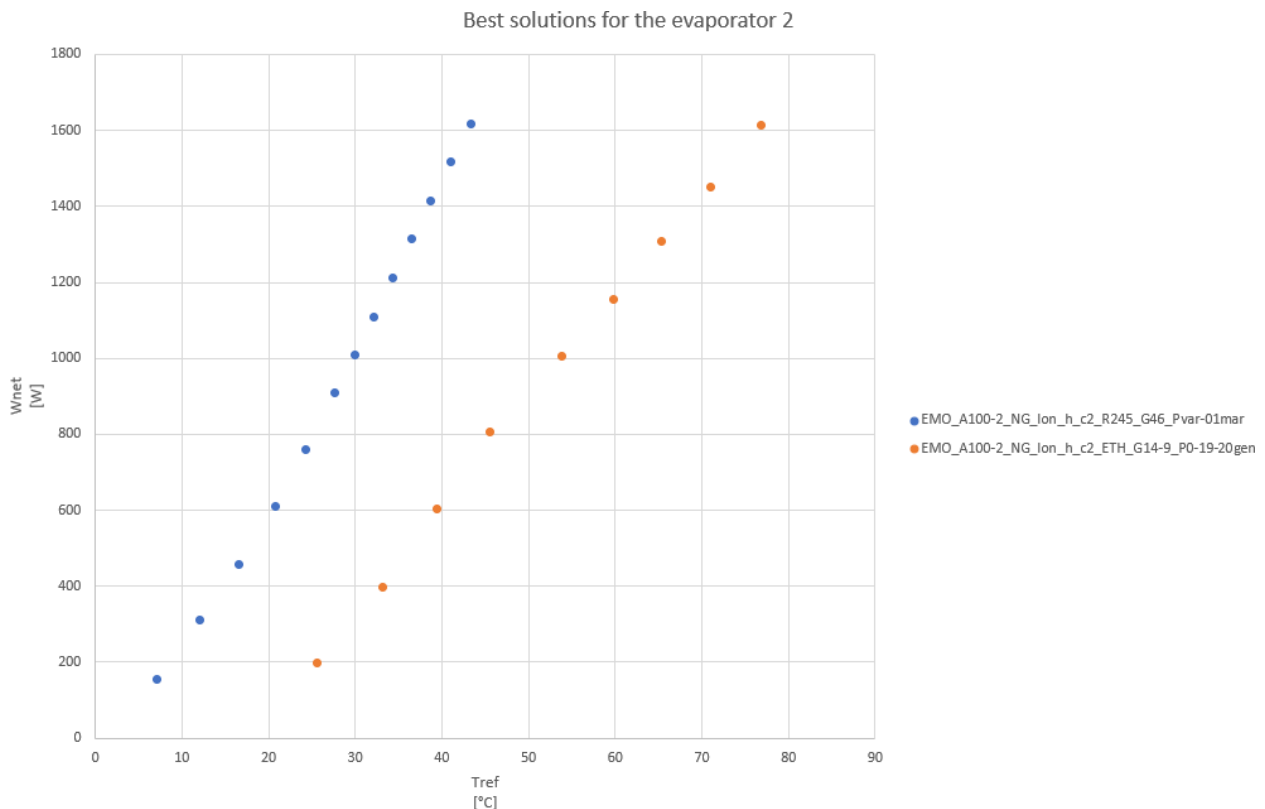


Figura 60. Wnet vs Tref, le migliori soluzioni per evaporatore A100-2

3 Conclusioni

Nel presente report è stato presentato il lavoro di realizzazione e messa in opera dell'impianto E.MO.T.I.CON.S. dell'ENEA, che ha consentito l'esecuzione di alcune campagne sperimentali finalizzate a testare un innovativo sistema di controllo termico di tipo bifase per l'elettronica di potenza installata a bordo di veicoli elettrici ed ibridi.

Nelle campagne sperimentali sono stati testati quattro diversi fluidi refrigeranti, combinati con diverse geometrie dell'evaporatore al fine di raccogliere un gran numero di dati sulle prestazioni del sistema al variare delle possibili condizioni di lavoro (pressione, portata, temperatura). La progettazione di un tale sistema di raffreddamento è molto complessa a causa della reciproca influenza tra le varie grandezze termofluidodinamiche caratterizzanti il fenomeno, per il quale si è resa necessaria un'ampia campagna sperimentale per comprendere a fondo il fenomeno e la risposta del sistema ai diversi parametri di input.

Il presente lavoro ha dimostrato che questo innovativo sistema di raffreddamento o per meglio dire di controllo termico può fornire un enorme vantaggio in termini di prestazioni, riduzione delle dimensioni e risparmio energetico, rispetto ai sistemi convenzionali oggi disponibili sul mercato. La tecnologia è ancora in fase di sperimentazione e saranno necessarie molte altre campagne sperimentali, ma i risultati finora ottenuti dimostrano l'alto potenziale di questo sistema innovativo.

Gli sviluppi futuri includono la realizzazione e l'analisi di ulteriori dati sperimentali al fine possibilmente di ottenere alcune correlazioni di natura semi-empiriche che possano prevedere la risposta del sistema al variare dei parametri di input reali e congruenti con quelli propri di alcune applicazioni commerciali. Tra gli sviluppi da prevedere c'è anche, di certo, quello di testare evaporatori con geometrie e dimensioni diverse da quelle sinora testate. Ad esempio, potrebbe essere utile testare sia una sezione di prova più grande che una più piccola per capire le massime prestazioni del sistema di raffreddamento ovvero quanto è possibile ridurre le dimensioni dei componenti mantenendo un'efficienza ottimale di raffreddamento.

Infine, potrebbero essere testati altri fluidi con interessanti proprietà termiche in modo da avere un ampio numero di configurazioni possibili e identificare quella più adatta al variare dell'applicazione prescelta.

L'obiettivo finale di questo filone di ricerca può essere quindi riassunto nella nel riuscire a trovare la migliore configurazione del sistema di controllo termico (combinazione di fluido di lavoro, geometria dell'evaporatore, pressione e portata di fluido operative) che consenta di massimizzare la capacità di raffreddamento e, allo stesso tempo, ridurre al minimo gli ingombri e il peso dell'intero circuito.

4 Riferimenti bibliografici

1. A. Lattanzi, M. Morlacca, L. Saraceno, A. Scotini, L. Simonetti, G. Zummo "Progettazione dell'impianto sperimentale di tipo two-phase pumped loop", Report RdS/PTR2019/029, Dicembre 2019.
2. Ismatec, "Operating manual MCP-Z Standard".
3. 3M, "3M Novec 7100 engineered fluid product information," Des. Accid. Anal. Methods Light. Nucl. Power Plants, vol. 3, no. 163702, 2019
4. 3M, "3M Novec 7000 engineered fluid product information," no. November, 2005
5. G. Electric, "PTX 600 Series."
6. Siemens, "Sitrans F C Mass 2100 Di 3-40," Process Eng. 1990.