RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

LA 4.10: Tecnologie avanzate e sistemi complessi: predisposizione ed uso di apparati sperimentali per tecnologie avanzate

R. Trinchieri, M. Pieve, L. Nardi, S. Attanasi, G. Guidi, E. Giacomazzi, L. Gugliermetti, A. Mariani, P. Polito, S. Scaccia, A. C. Violante, M. Morlacca, C. Stringola, G. Guidarelli, A. Naviglio

RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA4.10_032

LA4.10: TECNOLOGIE AVANZATE E SISTEMI COMPLESSI: PREDISPOSIZIONE ED USO DI APPARATI SPERIMENTALI PER TECNOLOGIE AVANZATE

R. Trinchieri, M. Pieve, L. Nardi, S. Attanasi, G. Guidi, E. Giacomazzi, L Gugliermetti, A. Mariani, P. Polito, S. Scaccia, A. C. Violante, M. Morlacca, C. Stringola, G. Guidarelli, A. Naviglio (ENEA)

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*
Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali
Linea di attività: 4.10
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA
Responsabile Linea di Attività: Raniero Trinchieri, ENEA
Mese inizio previsto: gennaio 2022
Mese inizio effettivo: gennaio 2022
Mese fine previsto: giugno 2023
Mese fine effettivo: giugno 2023

Indice

1 RISULTATI ATTESI 3
2 RISULTATI OTTENUTI 4
3 PRODOTTI ATTESI 5
4 PRODOTTI SVILUPPATI 6
5 ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI 7
6 SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 8
7 DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 9
8 CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE 30
9 PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE 31
10 EVENTI DI DISSEMINAZIONE 32

1 Risultati attesi

I principali output attesi, descritti in questo report e nel corrispondente allegato (Report RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA4.10_032_ALL) sono:

i) Esecuzione di test di rigenerazione termica su pompa di calore (PdC) a CO_2, per verificare la possibilità di migliorare le sue prestazioni in funzionamento di riscaldamento;

ii) la riprogettazione dell'evaporatore della PdC per l'uso della sorgente termica resa disponibile tramite il serbatoio a PCM;

iii) l'assemblaggio del prototipo di sistema di sbrinamento (o prevenzione del brinamento) dotato di accumuli termici a PCM, per lo sfruttamento di calore di scarto o proveniente da sistemi rigenerativi;

iv) l'installazione della sensoristica di misura e monitoraggio delle condizioni di esercizio del loop idraulico contenente il serbatoio a PCM;

v) il dimensionamento di massima di un impianto di produzione alimentare multilivello dotato di PdC ad alta temperatura e l'inizio della fase di installazione e predisposizione della strumentazione e di tutta la catena di misura.

2 Risultati ottenuti

Tutti i risultati attesi sono stati ottenuti. In particolare:

i) Sono stati eseguiti test di rigenerazione termica su PdC a CO_2, modificando l'impianto esistente per verificare la possibilità di migliorare le sue prestazioni in funzionamento invernale; sulla macchina a CO_2 sono state effettuate anche prove in modalità HiL per simulare il funzionamento di utenze dislocate in zona climatica F: questi test sono stati effettuati sia con sistema di rigenerazione operante che senza. Inoltre, sono state effettuate prove in modalità continua (Pompa di calore accesa continuativamente fino all'avvio del ciclo di sbrinamento) più probanti per la valutazione del funzionamento con batteria alettata con formazione di brina;

ii) È stata eseguita la riprogettazione dell'evaporatore di una PdC operante con R1234ze per l'uso della sorgente termica resa disponibile tramite il serbatoio a PCM. Alcuni ranghi del nuovo evaporatore sono stati dedicati al passaggio di acqua calda proveniente dal serbatoio a PCM;

iii) è stato completato l'assemblaggio del prototipo di sistema di sbrinamento (o prevenzione del brinamento) dotato di accumuli termici a PCM per lo sfruttamento di calore di scarto o proveniente da sistemi rigenerativi;

iv) Contestualmente è stata installata la sensoristica di misura e monitoraggio delle condizioni di esercizio del loop idraulico contenente il serbatoio a PCM e è stata predisposta tutta la catena di misura. È stato anche realizzato il programma di controllo e monitoraggio con interfaccia Labview;

v) è stato eseguito il dimensionamento di massima di un impianto di produzione alimentare multilivello dotato di PdC ad alta temperatura ed è iniziata la fase di installazione e predisposizione della strumentazione e di tutta la catena di misura.

3 Prodotti attesi

Il principale prodotto atteso da questa LA è la realizzazione del prototipo di sistema di sbrinamento con accumulo termico a PCM, composto da.

- un serbatoio di accumulo a PCM dal quale, una volta accumulato, estrarre calore da trasmettere al flusso d'aria che investe la batteria alettata della pompa di calore, che nel suo funzionamento invernale può essere soggetta a brinamento
- circuito idronico ausiliario col quale estrarre calore dal serbatoio PCM e trasmetterlo, con opportuna soluzione impiantistica, all'aria che investe la batteria alettata
- sensoristica di misura, monitoraggio e controllo delle condizioni di esercizio
- software di gestione e controllo, col quale consentire agli operatori una semplice gestione e modifica delle varie configurazioni di esercizio

Un altro prodotto è l'acquisizione di dati di funzionamento di una pompa di calore a CO_2 in modalità HIL in zona climatica F, per completare le attività dello scorso triennio e la realizzazione di un secondo sistema di prevenzione del brinamento, che impiega un circuito di rigenerazione interna. Anche in questo caso, dopo la realizzazione dell'impianto, si prevede la produzione di dati sperimentali sull'apparato costruito.

4 Prodotti sviluppati

Il prototipo di sistema di sbrinamento con accumulo termico a PCM è stato realizzato. Sono stati dimensionati e selezionati i vari componenti d'impianto. In particolare, la progettazione del serbatoio di accumulo, la scelta della migliore configurazione degli scambiatori immersi in esso, la progettazione del sistema di scambio del calore dall'acqua del circuito ausiliario all'aria che investe l'evaporatore e al refrigerante hanno richiesto un'analisi accurata dei fenomeni di scambio termico. Dopo l'approvvigionamento dei materiali, si è proceduto al loro assemblaggio. Si è dotato l'impianto della sensoristica ritenuta necessaria alla misura dei principali parametri di esercizio, al monitoraggio, alla scelta delle varie configurazioni di lavoro e al controllo dei componenti. Inoltre, è stato realizzato il software di gestione e controllo in modo da poter gestire da interfaccia grafica, anche in remoto, il funzionamento dell'impianto.

Un ulteriore prodotto sviluppato è un secondo sistema di prevenzione del brinamento, applicato ad una pompa di calore a CO_2, che impiega un circuito di rigenerazione interna. In questo caso, dopo la realizzazione dell'impianto, sono stati prodotti dei dati sperimentali sull'apparato costruito.

Infine, sono stati acquisiti i dati di funzionamento di una pompa di calore a CO_2 in modalità HIL in zona climatica F, con e senza rigenerazione interna, per completare le attività dello scorso triennio.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono stati registrati scostamenti tecnici rispetto alle attività previste. Dal punto di vista economico, la LA 4.10 ha fatto registrare un incremento molto contenuto dei costi, in linea con gli aumenti effettivi del costo delle materie prime e dei materiali tra il periodo di preventivazione e quello di consuntivazione.

6 Sintesi delle attività svolte

L'attività di ricerca ha previsto l'impostazione e l'esecuzione di test sperimentali su tre apparati: una PdC a CO_2, un sistema di prevenzione del brinamento per PdC di piccola taglia e un impianto di climatizzazione per produzione alimentare multilivello. Sulla PdC a CO_2 sono stati condotti test in modalità HiL per simulare il suo comportamento reale in zona climatica F e test di un sistema di prevenzione del brinamento con rigenerazione interna. Il sistema di sbrinamento con accumulo termico a PCM (Phase Change Material) è stato dimensionato e sono stati assemblati il serbatoio, il circuito idronico ausiliario per trasmettere il calore al flusso d'aria che investe la batteria alettata della PdC e la sensoristica di misura e controllo delle condizioni di esercizio. Infine, è stato eseguito il dimensionamento di massima di un impianto di produzione alimentare multilivello con PdC ad alta temperatura e è stata avviata la fase di predisposizione e installazione della catena di misura.

7 Dettaglio delle attività svolte

Di seguito saranno descritte le tre attività principali condotte in questa LA: test su PdC a CO_2, assemblaggio del prototipo di sistema di sbrinamento con PCM e dimensionamento di un impianto di produzione alimentare multilivello.

7.1 Test su PdC a CO_2

Per quanto riguarda le attività sulla macchina a CO_2, è stato realizzato un circuito di rigenerazione termica interna (Figura 1).

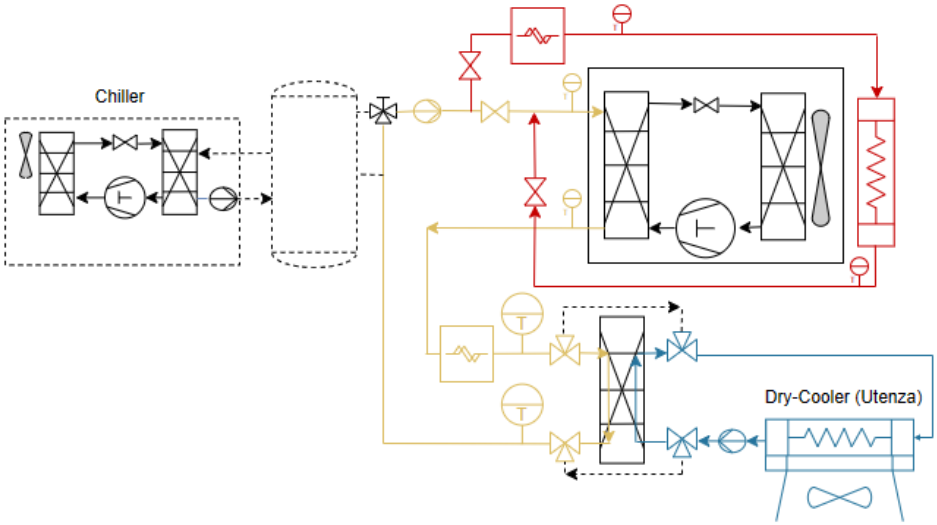

Figura 1. Circuito di rigenerazione interna (In rosso) su PdC a CO2

La rigenerazione interna può influire positivamente sulle pressioni di esercizio (funzionamento transcritico del ciclo frigorifero a CO_2) con possibile riduzione del lavoro di compressione. Inoltre, essa può aumentare la temperatura dell'aria che investe l'evaporatore, con minori rischi di brinamento. Sono state effettuate prove dinamiche giornaliere in condizioni di esercizio tipiche della zona climatica F, con e senza rigenerazione interna, in modo anche da effettuare comparazioni con le altre zone climatiche. Infine, sono stati condotti test in condizioni stazionarie, più adatte al raggiungimento di condizioni di brinamento, rispetto alle prove dinamiche, soggette a numerose fasi di on-off.

7.1.1 Test HiL per la zona climatica F senza rigenerazione

Per la zona F, si riepilogano i parametri utenza impiegati (Report RdS/PTR(2021)/345):

- Fabbisogno stagionale per riscaldamento: 22420 kWh;
- Energia fornita nel "giorno medio" ad una singola utenza: 112,1 kWh;

La Figura 2 mostra la distribuzione di potenza, ipotizzando accensioni giornaliere di 16 ore (fasce orarie 5÷11, 12÷16, 17÷23).

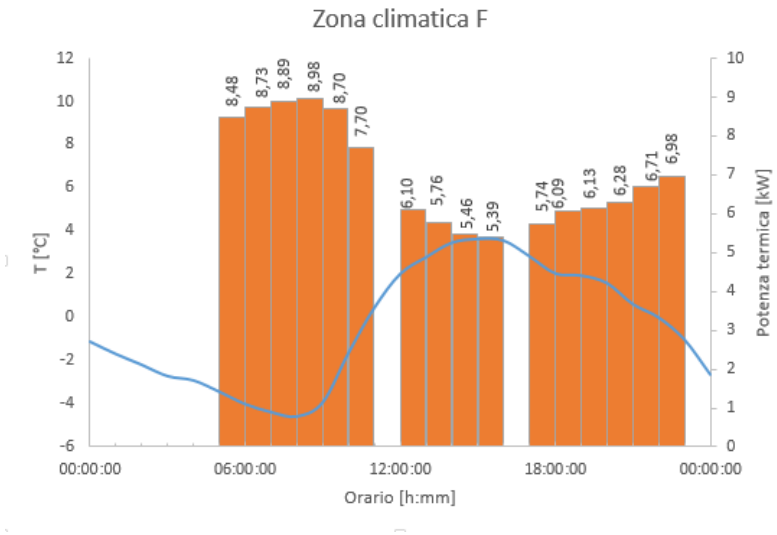

Figura 2. Distribuzione potenza termica richiesta dall'utenza in zona climatica F

I test sono stati eseguiti con temperatura di mandata all'utenza di 45 °C. Essendo la PdC di potenza nominale di 30 kW, si è ipotizzato di servire due utenze, raddoppiando le potenze richieste rispetto ai valori di Figura 2. I test sono stati eseguiti separatamente per le tre fasce orarie.

- *Test fascia oraria 5-11*

Questa fascia oraria è caratterizzata da temperature ambientali comprese tra -4,6 °C e -1,68 °C.
La Tabella 1 riporta, in sintesi, i valori di ECOP (rapporto tra energia termica prodotta ed elettrica assorbita) riscontrati ora per ora durante il test in esame. L'ultimo dato si riferisce all'ECOP nel momento dell'ottenimento dell'energia termica totale richiesta nel blocco orario in esame, evento che può accadere entro o anche oltre il termine dell'ultima ora del blocco.

Tabella 1. Riepilogo prestazioni del test del blocco orario 5-11 (zona F, T acqua 45 °C, Inverter 50 Hz)

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Quinta ora	Sesta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh $_{th}$]	17,61	15,68	17,88	19,81	16,57	16,44	102,96
Energia elettrica assorbita [kWh $_{th}$]	8,18	6,99	7,38	8,39	7,02	6,68	43,88
ECOP [kWh_{th}/kWh_{el}]	2,15	2,24	2,42	2,36	2,36	2,46	2,35

Pur con le basse temperature esterne di questa fascia oraria, non si sono avuti cicli di sbrinamento (che si attiva quando la temperatura di evaporazione scende sotto il valore di set-point per un certo tempo) anche per l'elevato numero di on-off. Di conseguenza, gli ECOP in questa fascia oraria non hanno subìto apprezzabili variazioni.

- *Test fascia oraria 12-16*

Questa fascia oraria è caratterizzata da temperature ambientali comprese tra 2 °C e 3,6 °C.
È aumentato il numero di on-off per la maggior resa termica e il maggior COP della PdC a temperature ambientali superiori. I dati di ECOP misurati sono riassunti in tabella 2.

Tabella 2. Riepilogo prestazioni del test del blocco orario 12-16 (zona F, T acqua 45 °C, Inverter 50 Hz)

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh $_{th}$]	13,54	9,98	10,55	10,09	45,42
Energia elettrica assorbita [kWh $_{th}$]	5,61	4,03	4,20	4,04	18,37
ECOP [kWh_{th}/kWh_{el}]	2,41	2,48	2,51	2,50	2,47

- *Test fascia oraria 17-23*

Questa fascia oraria è caratterizzata da temperature esterne comprese tra 0 °C e 2,8 °C. La tabella 3 riporta i valori di ECOP riscontrati ora per ora durante il test in esame.

Tabella 3. Riepilogo prestazioni del test del blocco orario 17-23 (zona F, T acqua 45 °C, Inverter 50 Hz)

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Quinta ora	Sesta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh $_{th}$]	12,51	10,93	12,83	12,01	13,14	15,14	75,78
Energia elettrica assorbita [kWh $_{th}$]	5,19	4,43	5,28	4,77	5,41	6,18	30,96
ECOP [kWh_{th}/kWh_{el}]	2,41	2,47	2,43	2,51	2,43	2,45	2,44

Anche in questa fascia oraria, in virtù dell'elevato numero di on-off, non si sono registrati cicli di sbrinamento.

- *Riepilogo risultati zona climatica F*

Si riepilogano i dati principali dei tre test eseguiti per ogni fascia oraria: tempo nel quale la PdC è spenta; numero di accensioni; assorbimento elettrico medio in funzionamento; picco massimo di potenza elettrica; energie richieste/prodotte ed elettriche; ECOP.

Tabella 4. Riepilogo Prestazioni PdC su giorno invernale tipo della zona climatica F

Fascia oraria	Durata periodo spegnimento [%]	Numero accensioni	Potenza elettrica media [kW]	Potenza di picco [kW]	Energia Richiesta/ Prodotta [kWh_{th}]	Energia elettrica [kWh]	ECOP [-]
5-11	24,05	11	9,77	10,98	103,99	44,65	2,33
12-16	56,3	10	10,07	11,80	44,16	17,88	2,47
17-23	49,1	15	10,15	12,35	76,56	31,26	2,45

Il consumo elettrico stimato ammonta a 46,9 kWh per utenza al giorno. Anche per la zona climatica F l'elevato numero di on-off acuisce il problema dell'instabilità della temperatura di ritorno sulle prestazioni della PdC a CO_2.
Una possibile soluzione per la mitigazione di tale problematica è stata individuata nell'adozione di una rigenerazione interna, che è stata testata in laboratorio.

7.1.2 Test HiL per la zona climatica F con rigenerazione interna

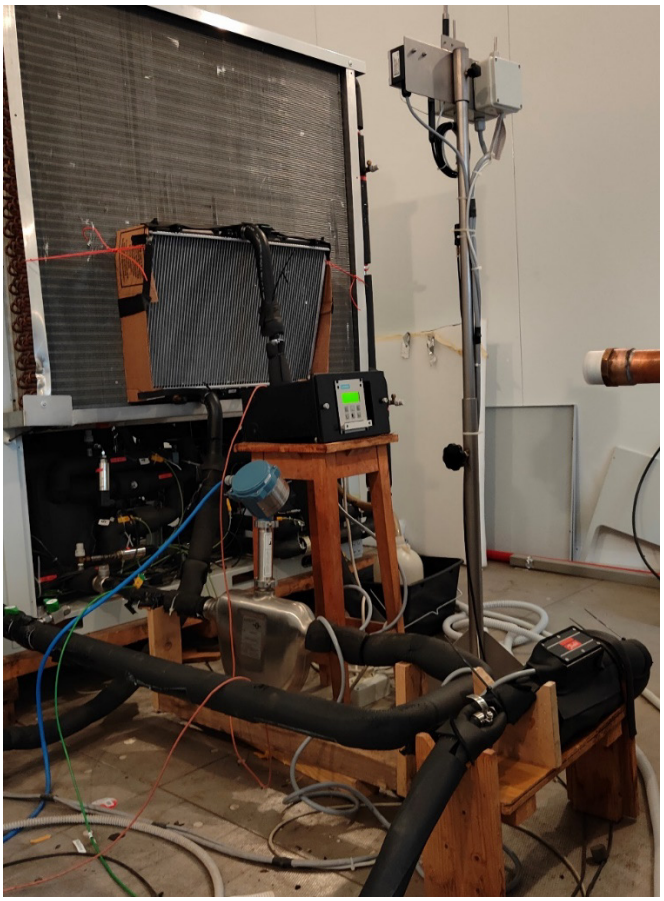

Figura 3. Installazione della soluzione di rigenerazione interna in camera climatica

I test con rigenerazione interna sono stati realizzati in modalità: HiL, simulando condizioni tipiche della zona climatica F, e in modalità continua sull'apparato costruito in camera climatica (Figura 3).

- *Test fascia oraria 5-11 con rigenerazione*

La Figura 4 mostra come l'uso della rigenerazione abbia stabilizzato le condizioni di ingresso dell'acqua in PdC, riducendo i picchi di 35°C del test senza rigenerazione.

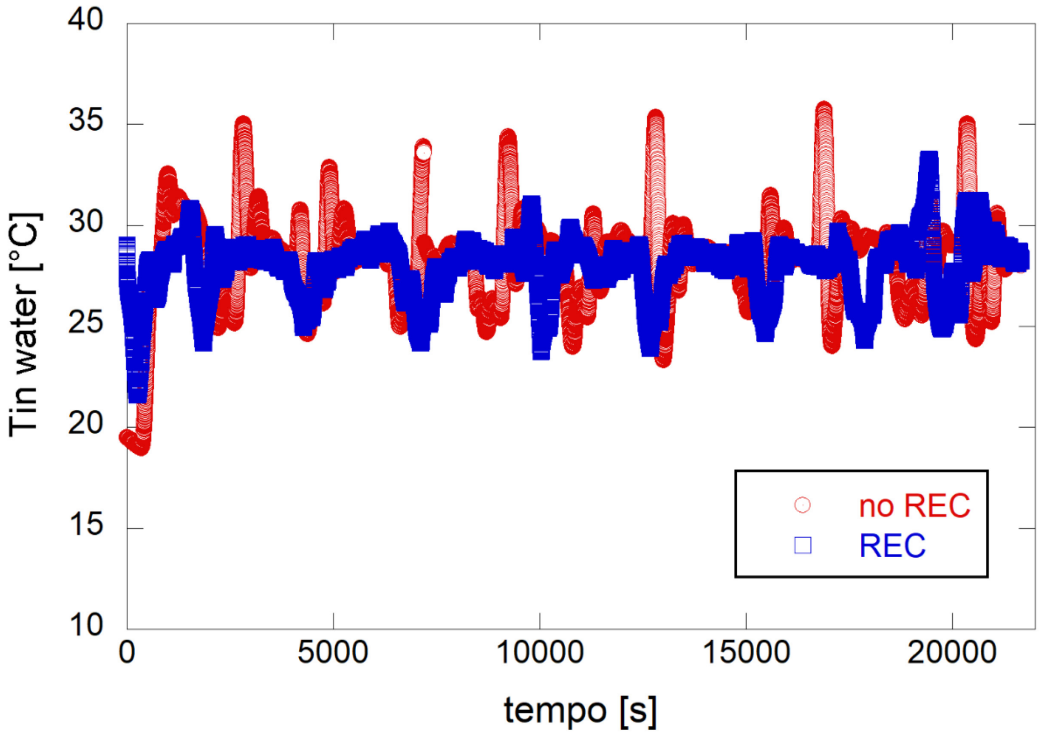

Figura 4. Temperatura acqua ingresso PdC con e senza rigenerazione interna – test zona F ore 5-11

L'effetto sulla temperatura di evaporazione, che aumenta marcatamente, soprattutto nelle prime due ore di test è evidente in Figura 5:

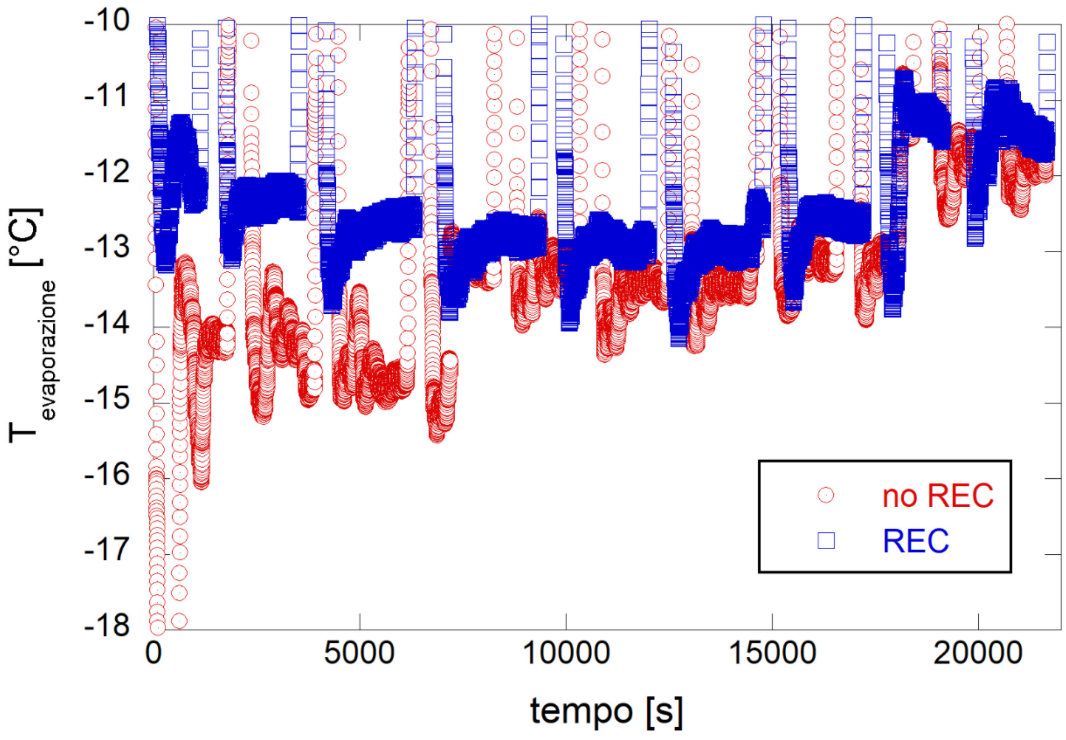

Figura 5. Temperatura evaporazione con e senza rigenerazione interna – test zona F ore 5-11

D'altra parte, la potenza assorbita non è variata significativamente perché la potenza rigenerata è stata pari al 5÷7 % della potenza all'evaporatore. Invece la potenza termica trasferita all'utenza è stata più bassa nel

test con recuperatore, in virtù del minore salto termico allo scambiatore primario rispetto a quello al gas-cooler (Figura 6).

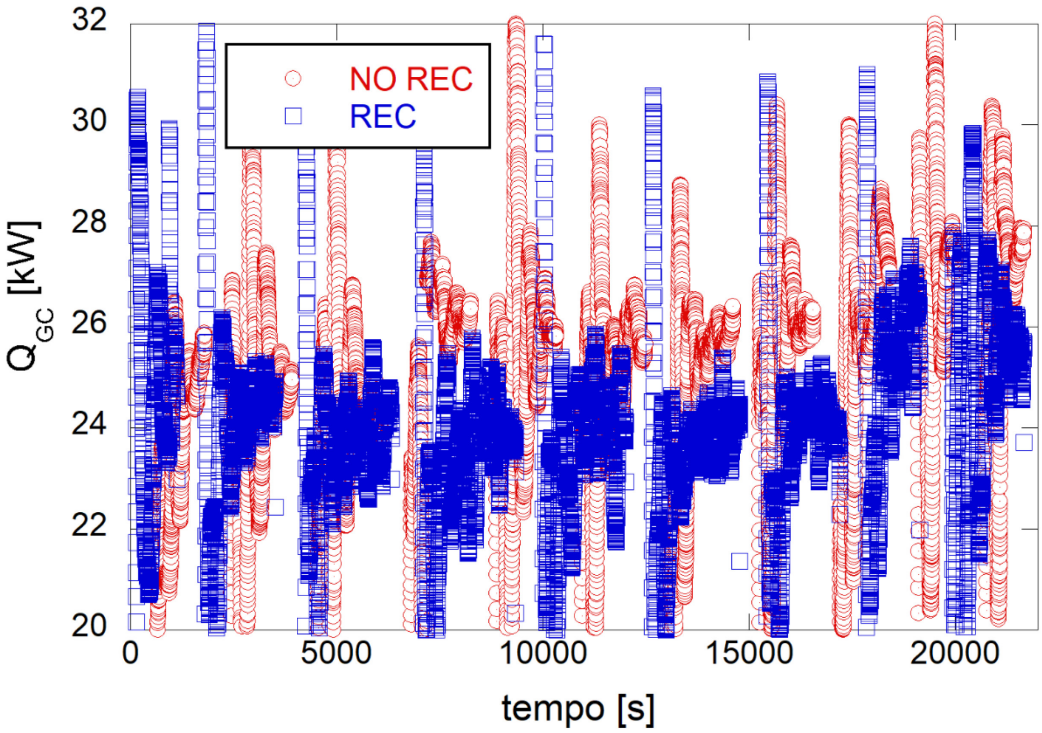

Figura 6. Potenza termica erogata all'utenza con e senza rigenerazione interna – test zona F ore 5-11

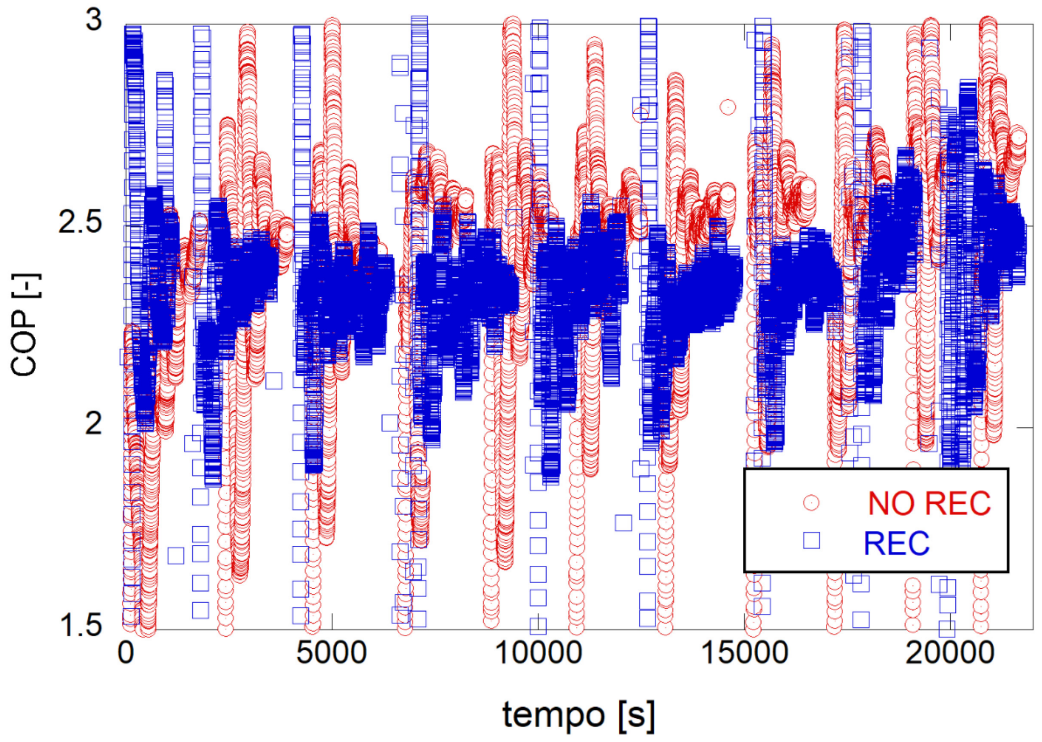

Figura 7. COP con e senza rigenerazione interna – test zona F ore 5-11

Di conseguenza, il COP con recuperatore è inferiore rispetto all'altra configurazione (assorbimento elettrico invariato e potenza termica trasferita all'utenza diminuita) (Figura 7).

In termini di energia, l'ECOP nel test con rigenerazione tende a raggiungere il valore asintotico più rapidamente (Figura 8), ma il valore finale è inferiore.

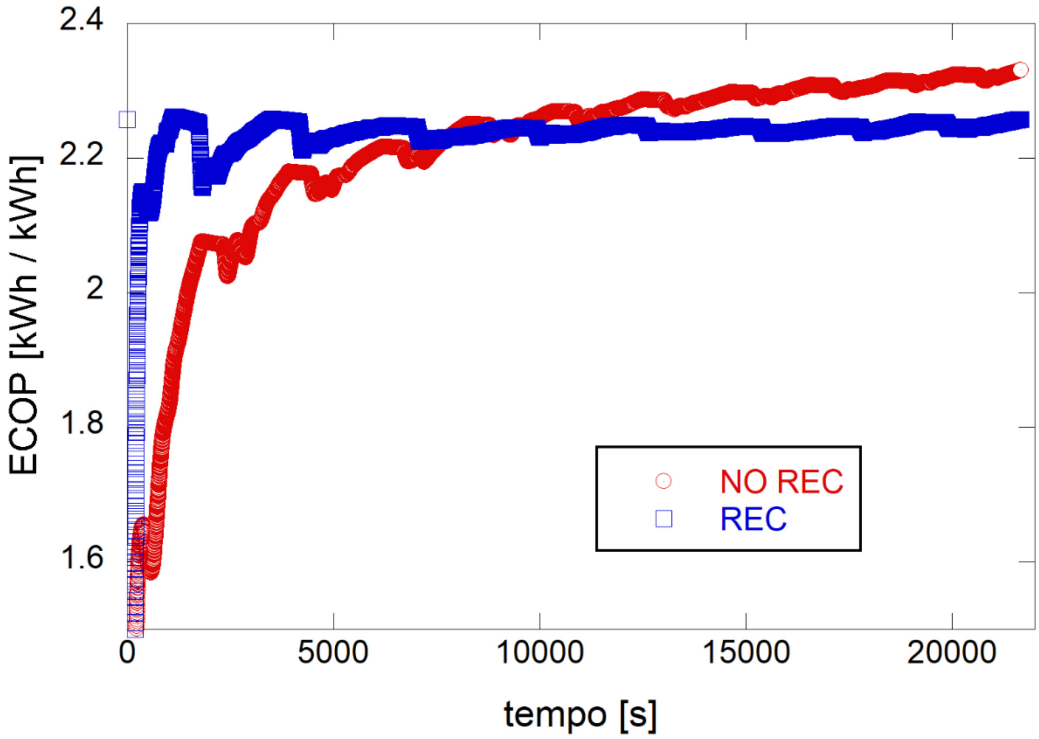

Figura 8. ECOP con e senza rigenerazione interna – test zona F ore 5-11

Tabella 5. Confronto ECOP per il test del blocco orario 5-11 con (R) e senza rigenerazione (NR) (zona F, T acqua 45 °C, Inverter 50 Hz, fan 50%)

	Prima ora		Seconda ora		Terza ora		Quarta ora		Quinta ora		Sesta ora		Al pareggio termico	
	NR	R	NR	R	NR	R	NR	R	NR	R	NR	R	NR	R
Energia termica prodotta [kWh $_{th}$]	17,61	18,14	15,68	14,46	17,88	19,00	19,81	19,3	16,57	15,28	16,44	19,46	102,00	102,00
Energia elettrica assorbita [kWh $_{th}$]	8,18	8,03	6,99	6,60	7,38	8,45	8,39	8,5	7,02	6,88	6,68	8,32	43,88	45,32
ECOP [kWh_{th}/kWh_{el}]	2,15	2,26	2,24	2,19	2,42	2,25	2,36	2,26	2,36	2,22	2,46	2,24	2,32	2,25

La tabella 5 riporta i valori di energia prodotta e assorbita nelle ore funzionamento. La rigenerazione non ha migliorato le prestazioni, per le basse potenze in gioco. Infatti, nel test con rigenerazione, il misuratore di portata installato sul ramo di bypass ha provocato alte perdite di carico, non consentendo di variare molto la portata su quel ramo: di conseguenza la potenza trasferita all'evaporatore è stata bassa (circa 1,75 kW). Per questo, l'effetto sul ciclo frigorifero è stato troppo piccolo per garantire una riduzione consistente del lavoro di compressione. Si ricorda infine che, nei test HiL, la PdC non ha mai lavorato in condizioni prossime al brinamento, a causa dei numerosi on-off.

7.1.3 Test in modalità continua

Per valutare l'utilità del sistema di rigenerazione in condizioni di maggior probabilità di brinamento sono stati eseguiti dei test in modalità continua con temperature ambientali (T_{amb}) di 2 °C e di -5°C, con e senza sistema di rigenerazione.

Nel primo test con T_{amb} di 2°C, è stata impostata la temperatura dell'acqua prodotta dalla PdC (T_w) a 45°C e la portata sul ramo di rigenerazione al 7% della totale. Con questa configurazione non si sono riscontrati miglioramenti dell'efficienza (COP medio, senza rigenerazione, pari a 2,57; con rigenerazione, pari a 2,59) e si è riscontrato un trascurabile aumento di pressione di evaporazione (25,9 bar contro 26,1 bar).

Poi sono stati eseguiti due altri test (con e senza rigenerazione) con T_{amb} 2 °C e T_w 60 °C: la configurazione con rigenerazione ha ottenuto prestazioni superiori (COP medio di 2,58 contro 2,53) con temperatura di evaporazione leggermente superiore.

I test con T_{amb} pari a -5 °C hanno ottenuto risultati molto simili, sia in termini di COP (intorno a 2,44) che di condizioni di esercizio all'evaporatore.

Da questa breve analisi sembrerebbe che i benefici del sistema di rigenerazione siano piuttosto limitati, ma i test sono stati in parte inficiati dalle alte perdite di carico provocate dal misuratore di portata del ramo di bypass. Ulteriori verifiche potrebbero essere utili incrementando la potenza scambiata sul lato di bypass.

Tabella 6. Riepilogo dati principali dei test continui con temperatura ambiente 2 °C con (R) e senza rigenerazione (NR)

		$Q_{totwater}$	Q_{bypass}	$\%Q_{bypass}$	$W_{elettrica}$	W_{user}	W_{bypass}	$\%W_{rigenerata}$	COP
		Kg/s	Kg/s	-	kW	kW_{th}	kW_{th}	%	-
TEST1	NR	0,36	0	0	10,55	27,26	0	0	2,57
(T_{wprod} = 45°C)	R	0,366	0,027	7,6	10,51	27,64	1,7	6,2	2,59
TEST2	NR	0,34	0	0	10,48	26,6	0	0	2,53
(T_{wprod} = 60°C)	R	0,24	0,04	16,7	11,04	28,54	1,77	6,2	2,58

*: dopo 3000 secondi

Tabella 7. Riepilogo dati principali dei test continui con temperatura ambiente -5 °C con (R) e senza rigenerazione (NR)

		$Q_{totwater}$	Q_{bypass}	$\%Q_{bypass}$	$W_{elettrica}$	W_{user}	W_{bypass}	$\%W_{rigenerata}$	COP
		Kg/s	Kg/s	-	kW	kW_{th}	kW_{th}	%	-
TEST1	NR	0,25	0	0	10,46	25,6	0	0	2,45
(T_{wprod} =55°C)	R	0,25	0,04	16,0	10,39	25,4	2,1	8,3	2,44
TEST2 (T_{wprod}=60°C)	R	0,20	0,033	16,5	10,51	25,3	1,7	6,7	2,41

*: dopo 3000 secondi

7.2 Sviluppo di sistema di sbrinamento a PCM per PdC

Il sistema a PCM è progettato per interfacciarsi ad una PdC di piccola taglia a R1234ze (GWP_{100}=7) sviluppata durante il PTR 2019-2021.

7.2.1 Test perdite di carico e selezione pompa di circolazione

Il componente principale del sistema di sbrinamento è il serbatoio, dotato di scambiatori acqua-PCM. Per la caratterizzazione delle perdite di carico sono stati eseguiti test su diverse geometrie di scambiatori a micro-canali presenti sul mercato (Figura 9).

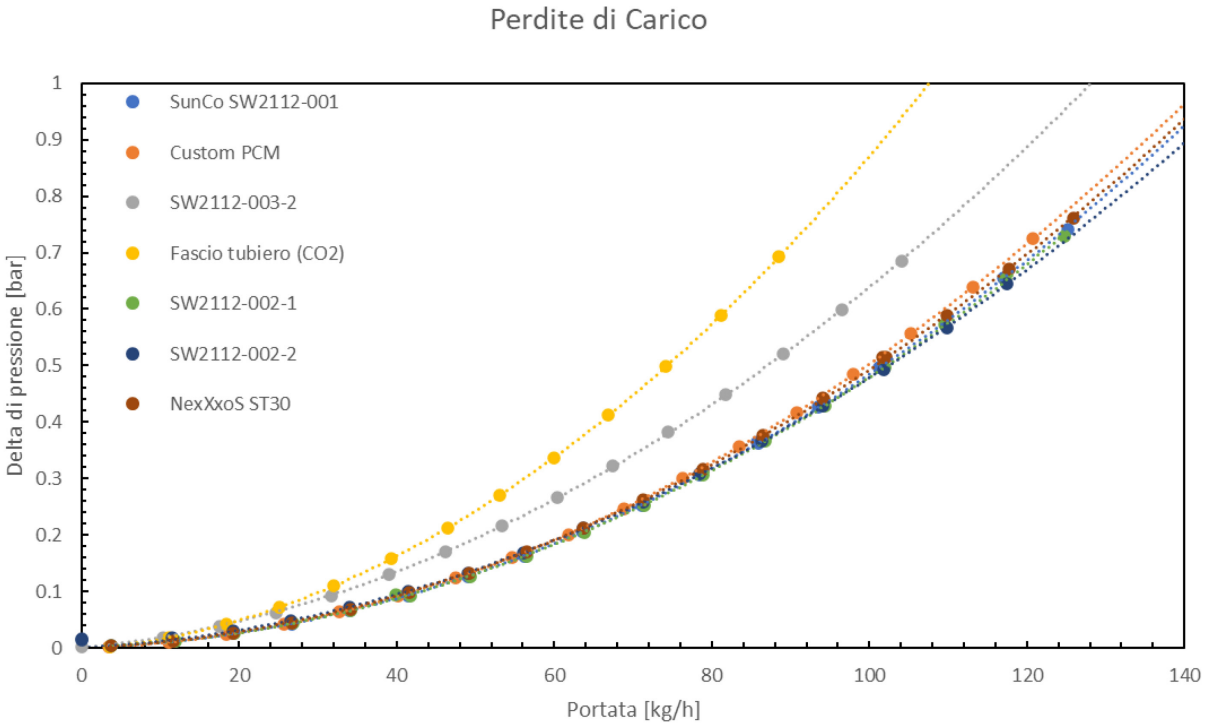

Figura 9. Curve caratteristiche misurate di perdite di carico per gli scambiatori testati

Note le perdite di carico del singolo scambiatore, è stata selezionata una pompa di circolazione in grado di erogare 2,04 m3/h con 45,28 m di prevalenza.

7.2.2 Capacità termica complessiva scambiatore a PCM

Considerando la tipologia di scambiatori installati, il volume disponibile all'interno del serbatoio a PCM e le sue caratteristiche termodinamiche è stato possibile stimare la massa di PCM inseribile nel serbatoio (30 kg) e il possibile tempo di lavoro dello stesso, pari a 4340 secondi.

7.2.3 Diagramma di impianto PCM e componentistica

Per garantire un sufficiente riscaldamento dell'aria è necessario dimensionare correttamente anche il circuito idraulico che funge da interfaccia tra PCM e aria (Figura 10).

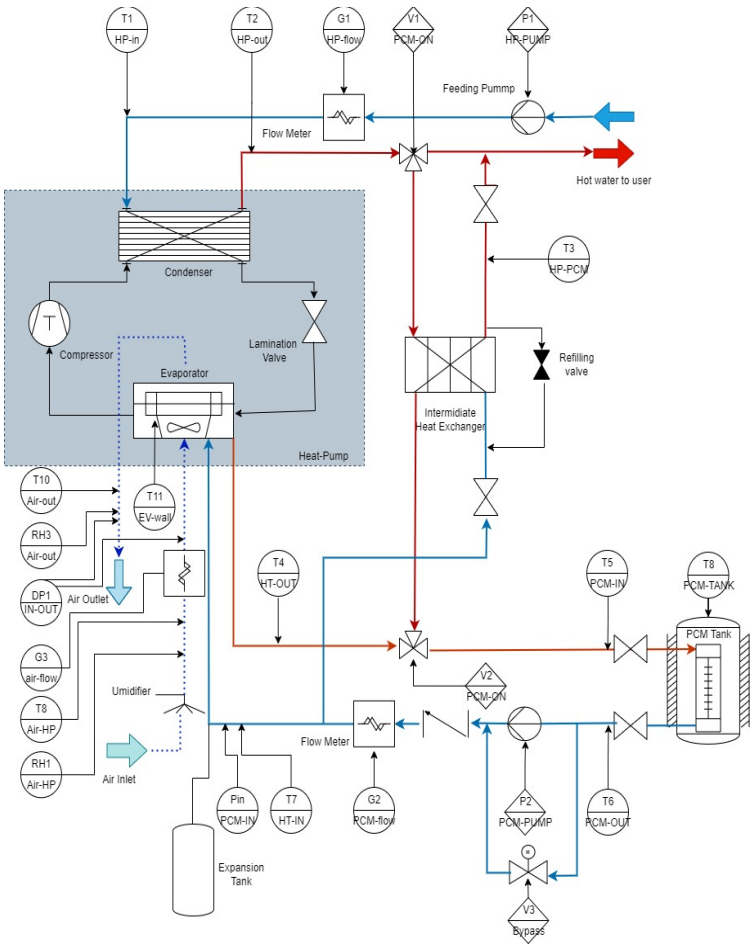

Figura 10. Schema del circuito idronico PCM

Il circuito è interfacciato con l'uscita della PdC tramite scambiatore a piastre per il riscaldamento del PCM nel serbatoio e, tramite canali dedicati, all'evaporatore della PdC. Una valvola a 3 vie consente di modificare le modalità operative (riscaldamento/sbrinamento).

7.2.4 Simulazione batteria alettata

Assieme al serbatoio a PCM è stato necessario valutare l'efficienza di scambio dell'evaporatore acqua-aria-refrigerante della PdC. Per il dimensionamento corretto del componente è stato realizzato un software in Python v3.9 in grado di calcolare i coefficienti di scambio termico e le grandezze di uscita dallo scambiatore acqua/refrigerante/aria.

- *Geometria di scambio e risultati modello*

Con il modello NTU è stato possibile simulare lo scambiatore come da Figura 11. Dalle simulazioni è stato identificato il numero di ranghi ottimale da riservare all'acqua, pari a 2. Quindi i primi due ranghi sono stati modificati per ospitare le connessioni al circuito ad acqua calda proveniente dal serbatoio a PCM.

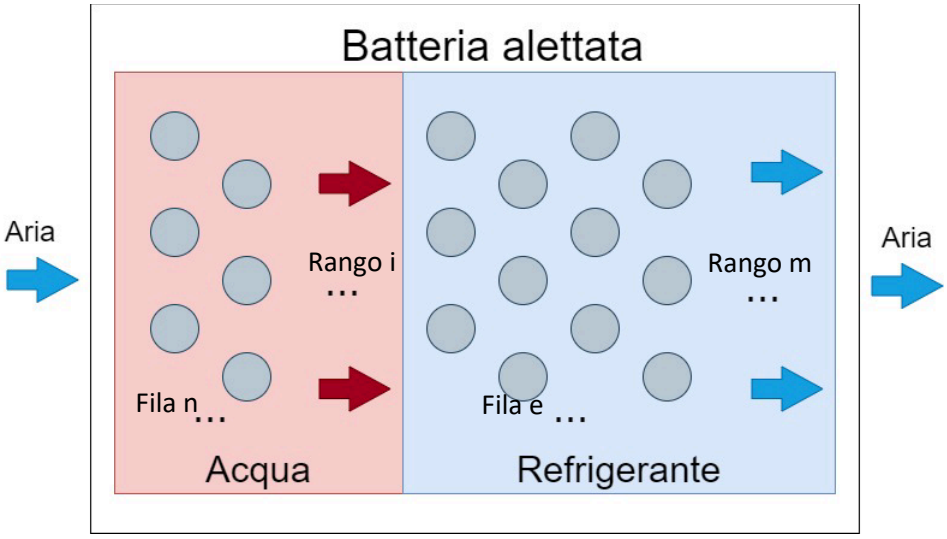

Figura 11. Geometria modello di scambio termico

7.2.5 Allestimento impianto e modifiche rispetto al progetto

Dopo aver completato la fase di dimensionamento si è proceduto alla fase di allestimento in camera climatica dell'impianto.

Durante la fase di preparazione dei componenti si è verificato un importante problema con il contenitore del PCM che non ha garantito la tenuta idraulica. Il serbatoio è stato quindi riprogettato come da figure 12 e 13.

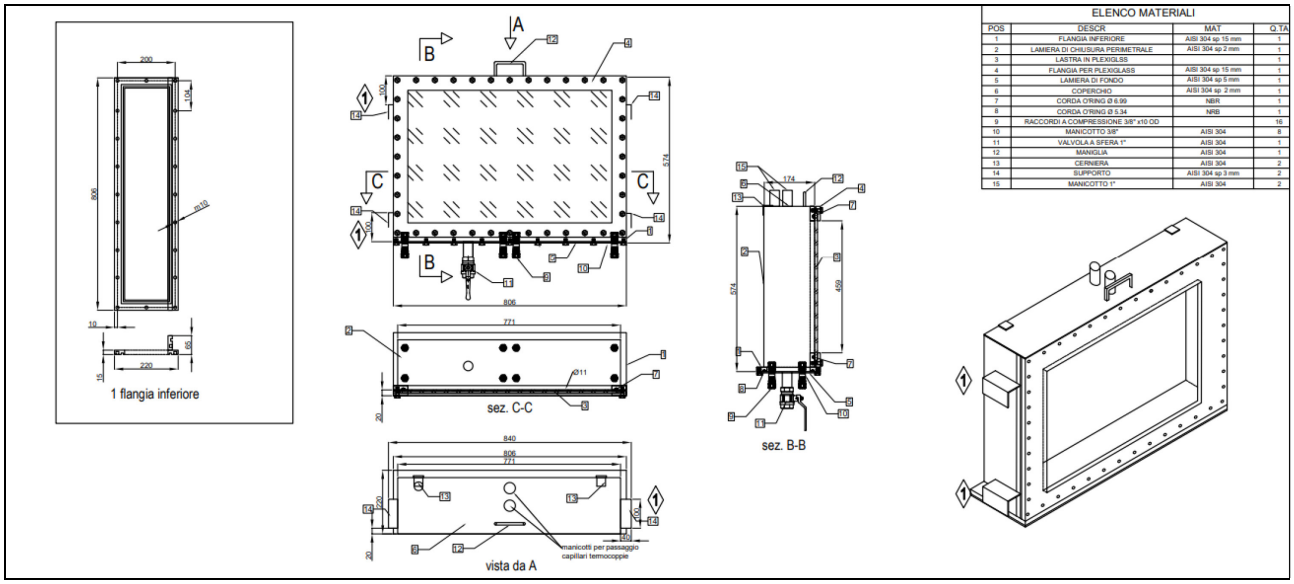

Figura 12. Disegno esecutivo contenitore per PCM

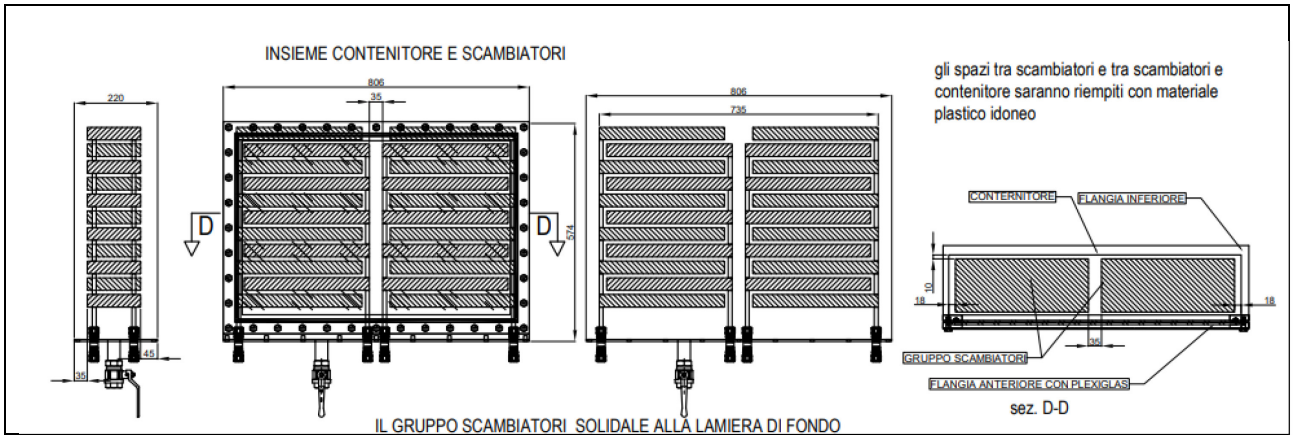

Figura 13. Alloggiamento del gruppo scambiatori all'interno del contenitore per PCM

Le immagini seguenti mostrano l'impianto in fase di assemblaggio.

Figura 14. Vista impianto per test sbrinamento con PCM lato serbatoio

Figura 15. Vista impianto per test sbrinamento lato PdC

Figura 16. Particolare scambiatore sezionatore e valvola a tre vie

Una volta completato il collegamento elettrico per l'alimentazione dei dispositivi elettrici installati (pompa di circolazione, valvole motorizzate, ecc.) e dopo aver predisposto i sistemi di trasmissione di segnali di input

dai sensori e di output verso gli strumenti da controllare, sono state implementate le catene di misura e di controllo (tabelle 8-10).

Figura 17. Scambiatore evaporatore Pdc con tubazioni acqua su rango inferiore

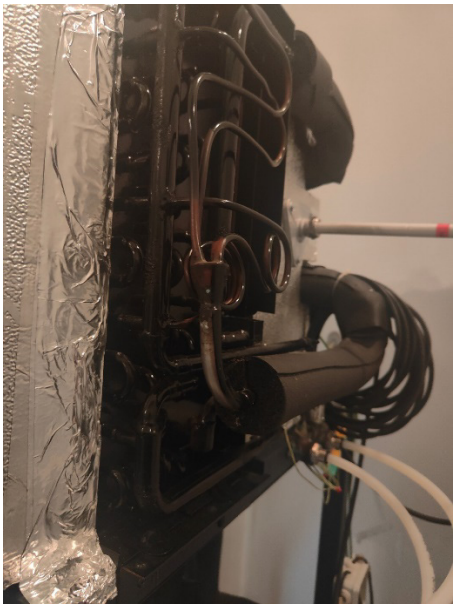

Figura 18. Particolare scambiatore recuperatore con ranghi utilizzati per sbrinamento

Tabella 8. Catena di misura sensori su impianto con serbatoio a PCM

Grandezza misurata	Sigla	Progr.	Modulo	Tipo Scheda NI
Temperatura uscita compressore	ToutCP	0	cDAQ2Mod6/ai0	NI 9213
Temperatura uscita separatore olio	ToutSEP	1	cDAQ2Mod6/ai1	NI 9213
Temperatura ingresso condensatore	TinCOND	2	cDAQ2Mod6/ai2	NI 9213
Temperatura uscita condensatore	ToutCOND	3	cDAQ2Mod6/ai3	NI 9213
Temperatura uscita ricevitore liquido	ToutRICLIQ	4	cDAQ2Mod6/ai4	NI 9213
Temperatura ingresso filtro	TinFILTRO	5	cDAQ2Mod6/ai5	NI 9213
Temperatura ingresso valvola elettronica	TinEEV	6	cDAQ2Mod6/ai6	NI 9213
Temperatura uscita valvola elettronica	ToutEEV	7	cDAQ2Mod6/ai7	NI 9213
Temperatura ingresso evaporatore	TinEV	8	cDAQ2Mod6/ai8	NI 9213
Temperatura uscita evaporatore	ToutEV	9	cDAQ2Mod6/ai9	NI 9213
Temperatura ingresso separatore di liquido	TinSEPLQ	10	cDAQ2Mod6/ai10	NI 9213
Temperatura acqua ingresso PdC	TinWater	11	cDAQ2Mod6/ai11	NI 9213
Temperatura acqua uscita PdC	ToutWater	12	cDAQ2Mod6/ai12	NI 9213
Temperatura ambiente	Tambiente	13	cDAQ2Mod1/ai6	NI 9213
Temperatura ingresso compressore	TinCP	14	cDAQ2Mod6/ai13	NI 9213
Temperatura uscita separatore di liquido	ToutSEPL	15	cDAQ2Mod6/ai14	NI 9213
Pressione ingresso compressore	pinCP	16	cDAQ2Mod7/ai0	NI9205
Pressione uscita compressore	poutCP	17	cDAQ2Mod7/ai1	NI9205
Pressione uscita separatore olio	poutSEP	18	cDAQ2Mod7/ai2	NI9205
Pressione ingresso condensatore	pinCOND	19	cDAQ2Mod7/ai3	NI9205
Pressione uscita condensatore	poutCOND	20	cDAQ2Mod7/ai4	NI9205
Pressione uscita ricevitore liquido	poutRICLIQ	21	cDAQ2Mod7/ai5	NI9205
Pressione ingresso valvola elettronica	pinEEV	22	cDAQ2Mod7/ai7	NI9205
Pressione uscita valvola elettronica	poutEEV	23	cDAQ2Mod7/ai16	NI9205
Pressione ingresso evaporatore	pinEV	24	cDAQ2Mod7/ai17	NI9205
Pressione uscita evaporatore	poutEV	25	cDAQ2Mod7/ai18	NI9205
Pressione ingresso separatore di liquido	pinSEPLQ	26	cDAQ2Mod7/ai19	NI9205
Assorbimento elettrico (da misuratore 1)	W_ass	27	cDAQ2Mod4/ai1	NI9205
Portata acqua	Gwater	28	cDAQ2Mod4/ai2	NI9205
Assorbimento elettrico (da misuratore 2)	W_ass2	29	cDAQ2Mod4/ai3	NI9205
Corrente	Corrente	30	cDAQ2Mod4/ai4	NI9205
Cosfi	Cosfi	31	cDAQ2Mod4/ai5	NI9205
Voltaggio	Voltaggio	32	cDAQ2Mod6/ai6	NI9205
Temperatura uscita scambiatore separatore	T3 HP_PCM	33	cDAQ2Mod1/ai3	NI 9213
Temperatura ingresso acqua in serbatoio a PCM	T5 PCM_IN	34	cDAQ2Mod1/ai5	NI 9213
Temperatura uscita acqua in serbatoio a PCM	T6 PCM_OUT	35	cDAQ2Mod1/ai1	NI 9213
Temperatura in acqua rango batteria alettata	T7 HT_IN	36	cDAQ2Mod2/ai9	NI 9213
Temperatura out acqua rango batteria alettata	T4 HT_OUT	37	cDAQ2Mod2/ai8	NI 9213
Portata acqua su ramo servizio serbatoio PCM	G2 PCM_flow	38	cDAQ2Mod7/ai20	NI 9205
Pressione in acqua rango batteria alettata	Pin PCM_IN	39	cDAQ2Mod4/ai16	NI 9205
Temperatura aria in batteria alettata (canale)	T8_airHPin	40	cDAQ2Mod2/ai3	NI 9213
Temperatura aria out batteria alettata (canale)	T9_airHPout	41	cDAQ2Mod2/ai6	NI 9213
Umidità aria in batteria alettata (canale)	Umidità AIRIN	42	cDAQ2Mod3/ai2	NI9205
Umidità aria out batteria alettata (canale)	Umidità AIROUT	43	cDAQ2Mod3/ai3	NI9205
Portata aria su batteria alettata (canale)	G3 AirFlowChannel	44	cDAQ2Mod3/ai6	NI9205
Pressione aria in batteria alettata (canale)	p_AIRinChannel	45	cDAQ2Mod3/ai18	NI9205
Diff. Pressione aria su batteria alettata (canale)	DP_AIRChannel	46	cDAQ2Mod3/ai17	NI9205
Temperatura aria (da sensore umidità) in batteria	TairIN_send umidità	47	cDAQ2Mod7/ai6	NI9205
Temp. Interna serbatoio 1	T_PCM alta	48	cDAQ2Mod1/ai0	NI 9213
Temp. Interna serbatoio 2	T_PCM medio alta	49	cDAQ2Mod1/ai2	NI 9213
Temp. Interna serbatoio 3	T_PCM medio	50	cDAQ2Mod1/ai4	NI 9213
Temp. Interna serbatoio 4	T_PCM medio bassa	51	cDAQ2Mod1/ai8	NI 9213
Temp. Interna serbatoio 5	T_PCM bassa	52	cDAQ2Mod1/ai7	NI 9213

Tabella 9. Catena di controllo per sensori con segnale di output 4-20 mA

Componente Controllato	Sigla segnale	Progressivo	Modulo	Tipo scheda NI
Canale non utilizzato	CurrentOut	0	cDAQ2Mod5/ao0	NI9265
Valvola V3 di bypass	Reg. valv V3 bypass	1	cDAQ2Mod5/ao1	NI9265
Pompa acqua su bypass PCM	Reg. pompa acqua PCM	2	cDAQ2Mod5/ao2	NI9265
Ventilatore ausiliario fan PdC	Regolazione fan PdC	3	cDAQ2Mod5/ao3	NI9265

Tabella 10. Catena di controllo tramite scheda relay

Componente controllato	Sigla segnale	Progressivo	Modulo	Tipo scheda NI
Valvola tre vie	Posizione 3 vie	0	cDAQ2Mod8/port0/line0	NI9481
Avvio fan	DigitalOut_0	1	cDAQ2Mod8/port0/line1	NI9481
Avvio pompa di circolazione	DigitalOut_1	2	cDAQ2Mod8/port0/line2	NI9481
Non utilizzato	DigitalOut_2	3	cDAQ2Mod8/port0/line3	NI9481

Per il monitoraggio e il controllo dell'impianto è stato infine realizzato, in ambiente Labview, un programma dedicato. L'utilizzatore può visualizzare varie pagine, tra cui quelle mostrate nelle figure 19 e 20.

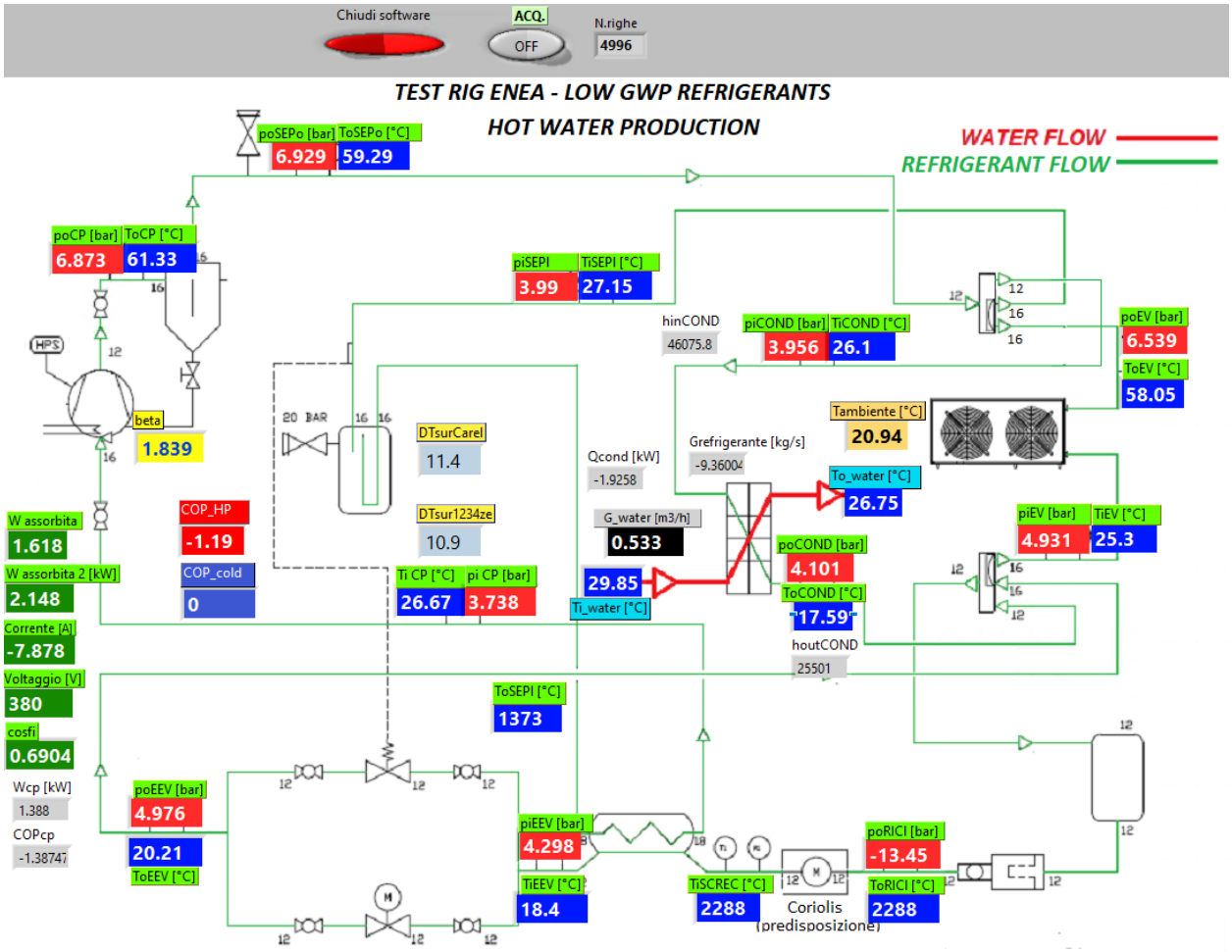

Figura 19. Interfaccia sistema di acquisizione – pagina monitoraggio PdC

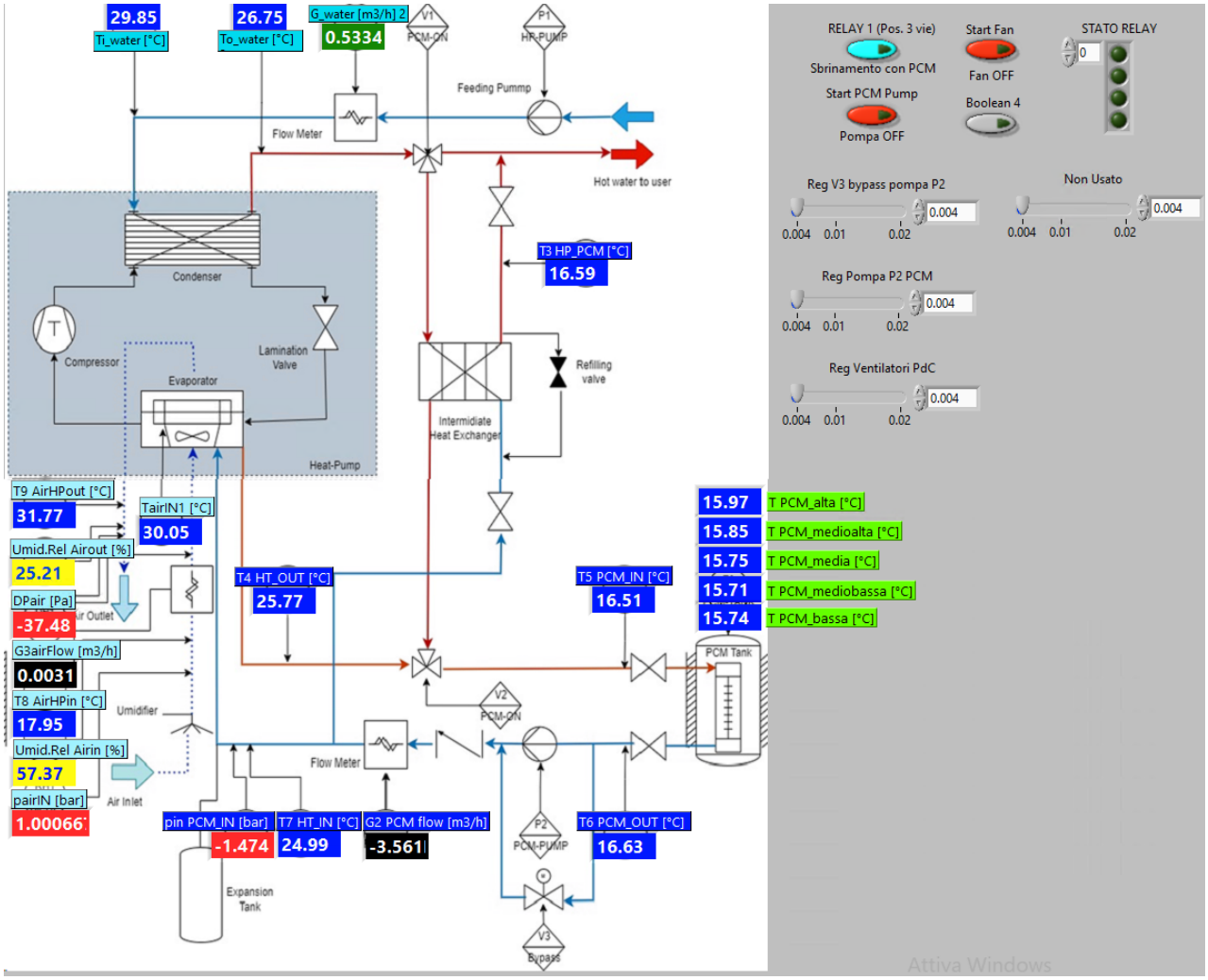

Figura 20. Interfaccia sistema di acquisizione – pagina monitoraggio circuito sbrinamento con serbatoio a PCM

7.3 Dimensionamento di impianto di produzione alimentare multilivello con PdC ad alta temperatura

Per la realizzazione di un impianto di produzione alimentare multilivello, da dotare di PdC ad alta temperatura, si è reso necessario dimensionare e selezionare una struttura apposita. L'apparato è costituito da numerosi sottosistemi, che insieme all'impianto di climatizzazione sono stati dimensionati nel corso di questa linea di attività. Nel seguito, si descriveranno le caratteristiche di tali sottosistemi, che influiscono sulla scelta e sulle modalità di gestione dei generatori termici.

7.3.1 Caratteristiche dell'apparato

La Fattoria Container ha le seguenti caratteristiche tecniche:

Tabella 11. Specifiche tecniche del sistema di controllo parametri climatici interni alla Fattoria Container

Range Temperatura Esterna Operativa:	da -10°C a +45°C
Range Temperatura Interna:	da +17°C a +24°C – Regolabile
Gradiente Variazione T:	2°C/h max
Precisione Controllo T:	+/-2°C
Range RH:	da 60% a 90% – Regolabile
Gradiente Variazione RH:	10%/h max
Precisione RH:	+/- 10%

La vertical farm verrà posizionata nel CR Casaccia in un'area provvista di pavimentazione in cemento armato che dovrà essere rialzata rispetto al piano di gettata per evitare gli eventuali allagamenti in quanto area soggetta a rischio idrogeologico.

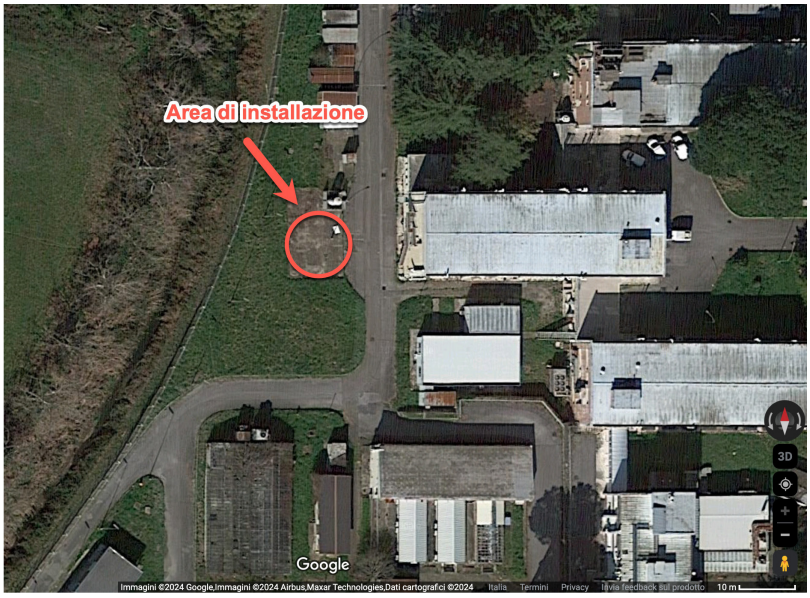

Figura 21. Area di installazione della vertical farm

7.3.2 Descrizione dei componenti e dei sottosistemi dell'apparato

L'apparato (figure 22, 23) è stato creato per instaurare un ambiente completamente artificiale avvalendosi dei seguenti sottosistemi:

- Climatizzazione e trattamento aria;
- Illuminazione e sistema idraulico per raffreddamento lampade;
- Sistemi idraulici per irrigazione e nutrimento, sterilizzazione e filtrazione;
- Comando e Controllo.

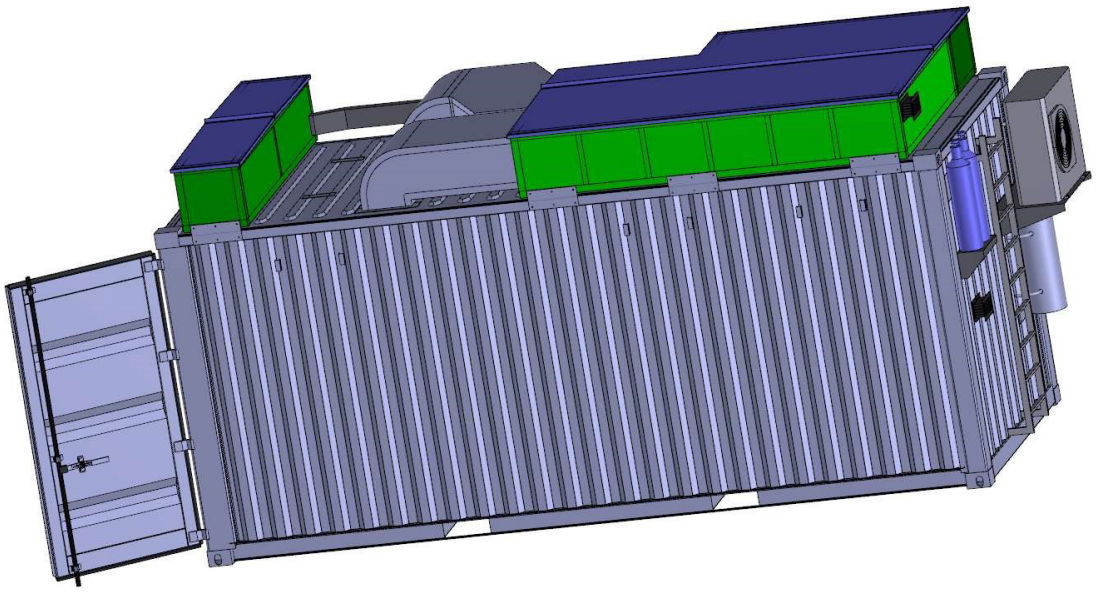

Figura 22. Vista esterna in 3D

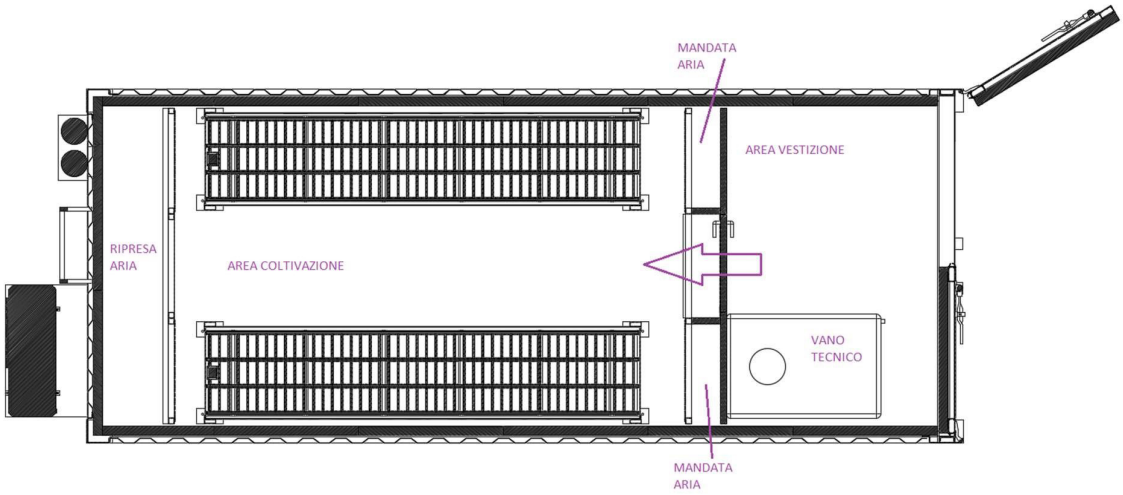

Figura 23. Esploso degli allestimenti interni

- Sottosistema climatizzazione e trattamento aria

Il sottosistema è dotato di un impianto di climatizzazione composto da gruppo frigo e unità di trattamento aria e da un circuito idraulico per il raffreddamento lampade. Il gruppo frigo originario è costituito da un chiller non invertibile, di potenza nominale in raffreddamento pari a 8 kW. Il refrigerante impiegato è R410a. In questo progetto, si è deciso di affiancare a questa unità una PdC reversibile ad alta temperatura da 10,5 kW. I vantaggi attesi dal suo impiego, risiedono nell'uso di un refrigerante naturale (R600a), nella possibilità di impiegare l'acqua prodotta ad alta temperatura anche per fini diversi da quelli della climatizzazione (es. sterilizzazione) e nel miglioramento delle prestazioni, in termini di EER. La PdC a R600a sarà integrata nell'unità di trattamento aria e nel circuito di raffreddamento lampade, in parallelo all'unità esistente. Oltre a identificare e selezionare la nuova macchina è stata necessaria la definizione dell'impianto idraulico (per il trasporto dell'acqua da un punto all'altro del container) e dell'impianto aeraulico (costituito da apparecchiature per la ventilazione, climatizzazione e condizionamento dell'aria). Sono stati definiti, inoltre, tutti i sensori necessari per il corretto comando e controllo dell'impianto.

- Sottosistema illuminazione e raffreddamento lampade

L'illuminamento dell'area di coltivazione è effettuato con lampade basate su tecnologia LED realizzate con dispositivi allo stato solido e consente di ottenere una distribuzione multi spettrale ottimizzata per la crescita vegetale. La lampada è dotata, oltre che dei componenti elettronici, di canali per la dissipazione termica tramite liquido (in figura 24**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** lo schema idraulico), che saranno alimentabili dalla macchina originaria o dalla nuova unità, a seconda dell'eventuale uso di quest'ultima per altre concomitanti necessità (es. impiego in modalità PdC). È dotata inoltre di alettatura per la dissipazione ad aria.

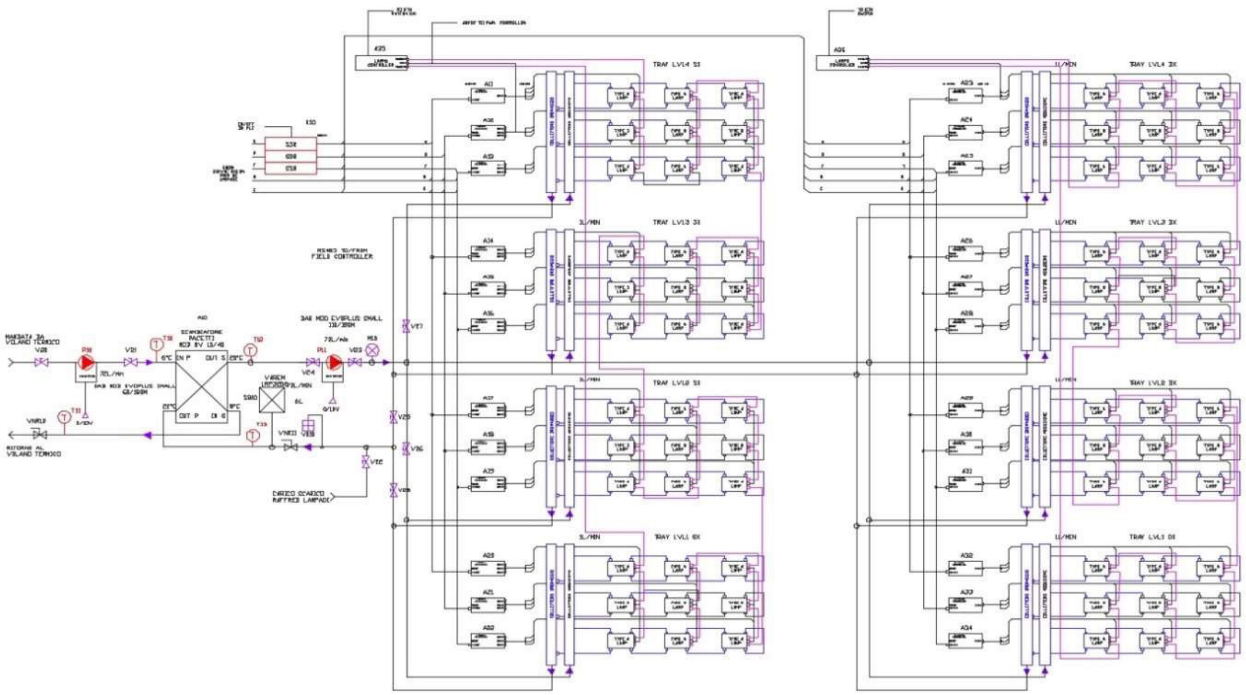

Figura 24. Schema Idraulico Raffreddamento Lampade

- Sottosistema idraulico irrigazione, nutrimento, sterilizzazione

Si riporta di seguito lo schema idraulico del sistema di fertirrigazione:

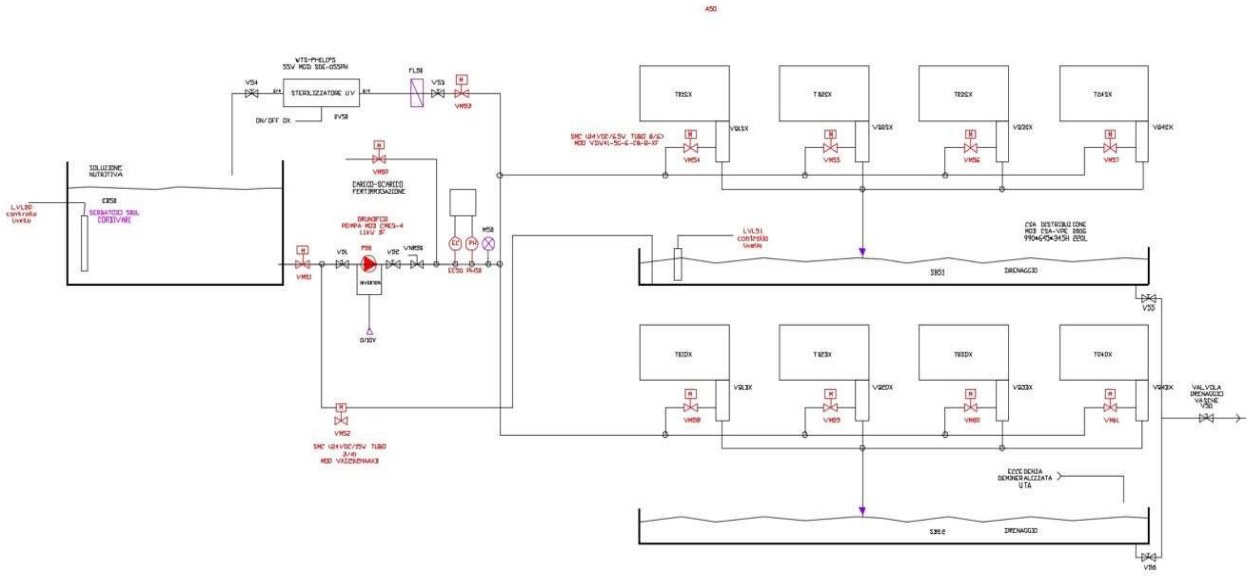

Figura 25. Schema Idraulico Fertiirigazione

Anche questo sistema può interagire con le macchine per la climatizzazione in quanto comprende la sezione di sterilizzazione che può richiedere acqua ad alta temperatura.

- Sottosistema Comando e controllo

L'impianto di comando e controllo, di cui si riporta lo schema a blocchi in figura 26, è costituito da una interfaccia che permette la comunicazione verso e da tutti i sottosistemi, sensori, attuatori, ecc..

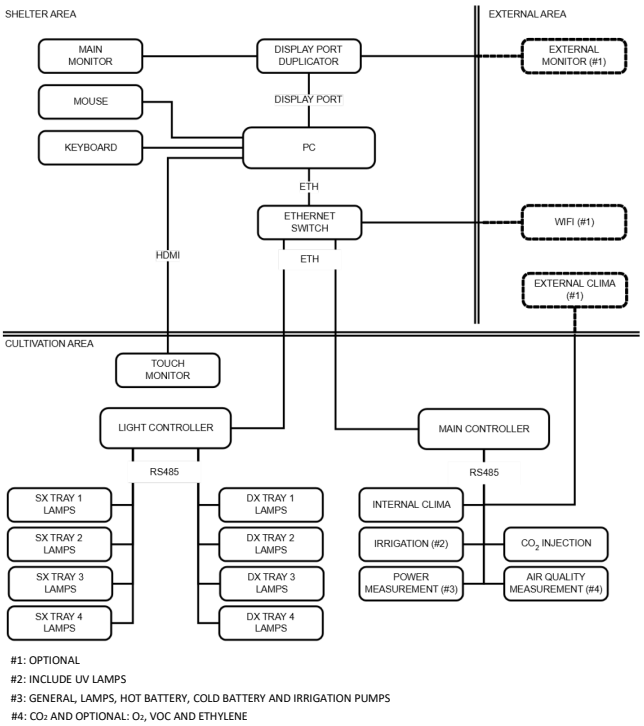

Figura 26. Schema a blocchi di comando e controllo

Per quanto concerne la sensoristica per il controllo ambientale, è stata adottata la piattaforma ARANET, costituita da una stazione base a cui possono essere collegati fino a 100 diversi sensori wireless. I principali parametri da monitorare, l'intervallo di lettura e la risoluzione dei sensori impiegati sono riportati in tabella 12. L'apparato è stato dotato anche di sistemi di analisi di immagine RGB e termica per il monitoraggio del sistema di coltivazione.

Tabella 12. Parametri ambientali ed intervalli di misura.

Parametro	Misura	Range sensori	Risoluzione	Range misura
Temperatura	*°C*	-40÷60	0,1	0÷30
UR aria	*%*	0÷100%	0,1	0÷100%
CO2	*ppm*	0 ÷9999		0÷6000
O2	*%*	0÷25 (100 opz)	0,2	0÷25
VOC	*%*	0÷100		
PM 2,5-10	$\mu g/m^3$	0÷1000	5	0÷1000
Vel Flusso aria	*m/s*	0÷20	0,3	0÷20
Pressione	*mbar*	300÷1100	1	300÷1100
Press. diff.	*Pa*	-500÷500	0,02	-500÷500
PAR (PPFD)	$\mu mol/m^2/s$	0÷4000	1	0÷4000
Umid. Substr (VWC)	m^3/m^3	1÷80	0,01	1÷80
Conduc. elettrica	*mS/cm*	0÷20	0,001	0÷20

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

In questa linea di attività, non ci è avvalsi di attività di consulenza.

9 Pubblicazioni scientifiche

Non sono state presentate pubblicazioni scientifiche inerenti questa linea di attività. Per quanto riguarda le attività di diffusione saranno riportate nel report dedicato alla descrizione di questo tipo di attività.

10 Eventi di disseminazione

Non sono stati organizzati eventi di disseminazione scaturiti dall'attività svolta.