



Ricerca di Sistema elettrico

## Realizzazione della rete termica indoor presso il laboratorio LPSAT del CR Enea Portici

Luigi Mongibello, Aniello Borriello

Report RdS/PTR2021/152

REALIZZAZIONE DELLA RETE TERMICA INDOOR PRESSO IL LABORATORIO LPSAT DEL CR ENEA PORTICI

Luigi Mongibello, Aniello Borriello (ENEA)

Con il contributo di: M. Atrigna, M. Caliano, C. Cancro, G. Ciniglio, M. Di Somma, S. Esposito, G. Fiorenza, G. Graditi, A. Guglielmo, D. Mele, F. Pascarella, A. Pontecorvo (ENEA)

Luglio 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *4 - Reti energetiche integrate*

Linea di attività: *LA4.17 - Realizzazione di una rete termica indoor presso il laboratorio LPSAT del CR Enea Portici (2 di 3)*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package (LA4.16-LA4.33): Luigi Mongibello

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE .....	5
2 LAYOUT DEI CIRCUITI DELLA RETE TERMICA INDOOR.....	5
3 CARATTERISTICHE DEI COMPONENTI PRINCIPALI DELLA RETE TERMICA INDOOR.....	9
3.1 POMPE DI CALORE .....	10
3.2 SCAMBIATORI DI CALORE.....	12
3.3 SENSORI E VALVOLE .....	14
4 CONCLUSIONI .....	16

## Sommario

Questo documento riguarda le attività svolte durante la seconda annualità del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico per quanto concerne la realizzazione di una rete termica indoor presso il laboratorio LPSAT del CR Enea Portici.

È possibile dividere le attività svolte durante la presente annualità in due fasi distinte e consecutive. Nella prima fase, l'attività del gruppo di lavoro Enea si è focalizzata sull'acquisto dei componenti della rete termica, ovvero sulla preparazione della documentazione tecnica, e sull'espletamento delle procedure di acquisto. Nella seconda, l'attività ha riguardato la realizzazione vera e propria della rete termica, ovvero l'assemblaggio delle strutture di supporto, il montaggio dei componenti idraulici, la composizione dei quadri elettrici e di automazione, il cablaggio dei componenti elettrici, e infine la realizzazione dell'interfaccia software per effettuare le misure e per la gestione della rete termica.

## 1 Introduzione

Il presente report riguarda la realizzazione di una rete termica indoor presso il laboratorio LPSAT del CR Enea Portici, finalizzata a validare sperimentalmente, in scala di laboratorio, risultati numerici ottenuti dalla simulazione e dall'ottimizzazione numerica di reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento a bassa temperatura, ovvero di reti termiche caratterizzate da temperature di mandata relativamente basse, in cui le sottostazioni di scambio presso le utenze sono integrate o sostituite con pompe di calore elettriche, il cui compito è quello di amplificare l'energia termica o l'energia refrigerante proveniente dalle reti termiche.

Come descritto nel report sulle attività svolte durante la prima annualità del presente progetto, l'interesse per le reti termiche a bassa temperatura è dovuto essenzialmente a due fattori: il primo è rappresentato dalla crescente elettrificazione dei sistemi per il condizionamento ambientale sia in ambito civile che commerciale, e quindi dal bisogno crescente di utilizzare dispositivi ad alta efficienza alimentati elettricamente, come ad esempio le pompe di calore condensate ad acqua che tipicamente si utilizzano in ambito geotermico, in modo da massimizzare l'utilizzo di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili; il secondo fattore è rappresentato dalla possibilità, con le reti termiche che lavorano a bassa temperatura, di sfruttare una maggiore quantità di calore di scarto, con conseguenti benefici sia in termini di consumi di energia primaria che di emissioni inquinanti.

Nella prima parte del documento vengono riportati e descritti il layout finale della rete termica, e i sinottici dei circuiti che compongono l'intera rete, che sono stati fissati in maniera definitiva in funzione dei componenti della rete acquistati durante la presente annualità. Nella seconda parte sono riportate le caratteristiche dei componenti principali della rete termica che sono stati acquistati durante la presente annualità, ovvero le pompe di calore, gli scambiatori di calore, i sensori e gli attuatori.

## 2 Layout dei circuiti della rete termica indoor

La Figura 1 mostra il layout della rete termica nella configurazione ad anello. La rete termica consiste in una pompa di calore centrale condensata ad acqua (PDC RETE) che simulerà il generatore di calore/energia refrigerante a bassa temperatura per la rete termica, un sistema di accumulo ad acqua da 1000 litri che opererà da buffer per la pompa di calore della rete, e da 2 file da 4 pompe di calore condensate ad acqua (PDC UT) che saranno impiegate per simulare sperimentalmente le pompe di calore delle utenze. In Figura 1 è schematizzato soltanto il circuito della rete termica, ovvero il ramo carico della pompa di calore centrale, mentre gli altri circuiti che compongono l'intero impianto sperimentale sono dettagliati più avanti.

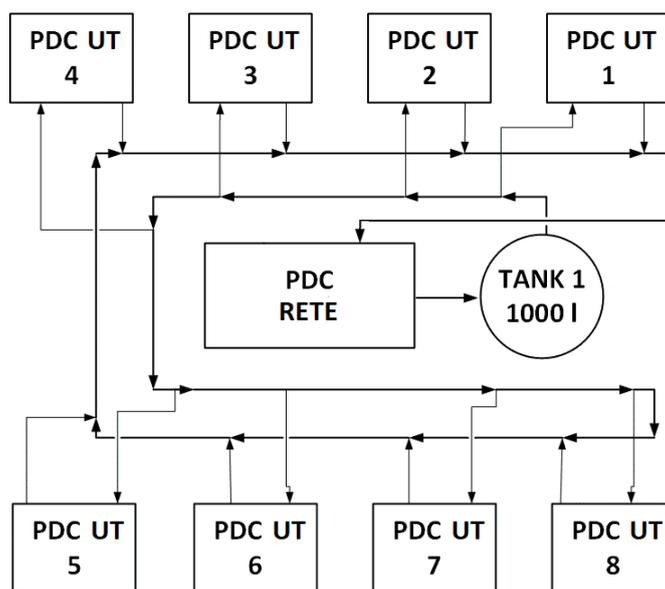


Figura 1. Layout rete termica nella configurazione ad anello.

La Figura 2 mostra uno schema più dettagliato della rete termica, che, come detto in precedenza, rappresenta il ramo carico della PDC RETE, e che è collegato ai rami sorgente delle PDC UT. Inoltre, in Figura 2 è schematizzato anche il ramo sorgente della PDC RETE, collegato ai rami carico delle PDC UT tramite un recuperatore. Chiaramente, per quanto riportato in precedenza, il blocco PDC RETE include anche il sistema di accumulo da 1000 litri, mentre i blocchi utenze includono le PDC UT.

Con riferimento alla rete termica, a questa sono collegate le linee di mandata e quelle di ritorno rispettivamente verso e dalle utenze. Tali linee possono essere collegate direttamente ai rami sorgente delle pompe di calore delle utenze (PDC UT), oppure a sottostazioni di scambio. In ognuna delle linee di collegamento tra la rete termica e le utenze sono presenti due sensori di temperatura PT100 e due sensori di pressione per misurare rispettivamente la temperatura e la pressione a monte e a valle del blocco utenza, un sensore di portata, e una valvola modulante per il controllo della portata.

Relativamente al ramo sorgente della PDC RETE, questo è collegato a un recuperatore per permettere la simulazione delle utenze termiche evitando di disperdere tutto il carico relativo alle utenze. Invero, utilizzando il recuperatore è possibile simulare il carico termico delle utenze tramite un controllo della temperatura di uscita dalle PDC UT, e tramite un dry cooler per disperdere l'energia elettrica assorbita dalle macchine se si simula la stagione invernale, o un heater se si simula la stagione estiva, al netto delle perdite termiche nei vari circuiti.

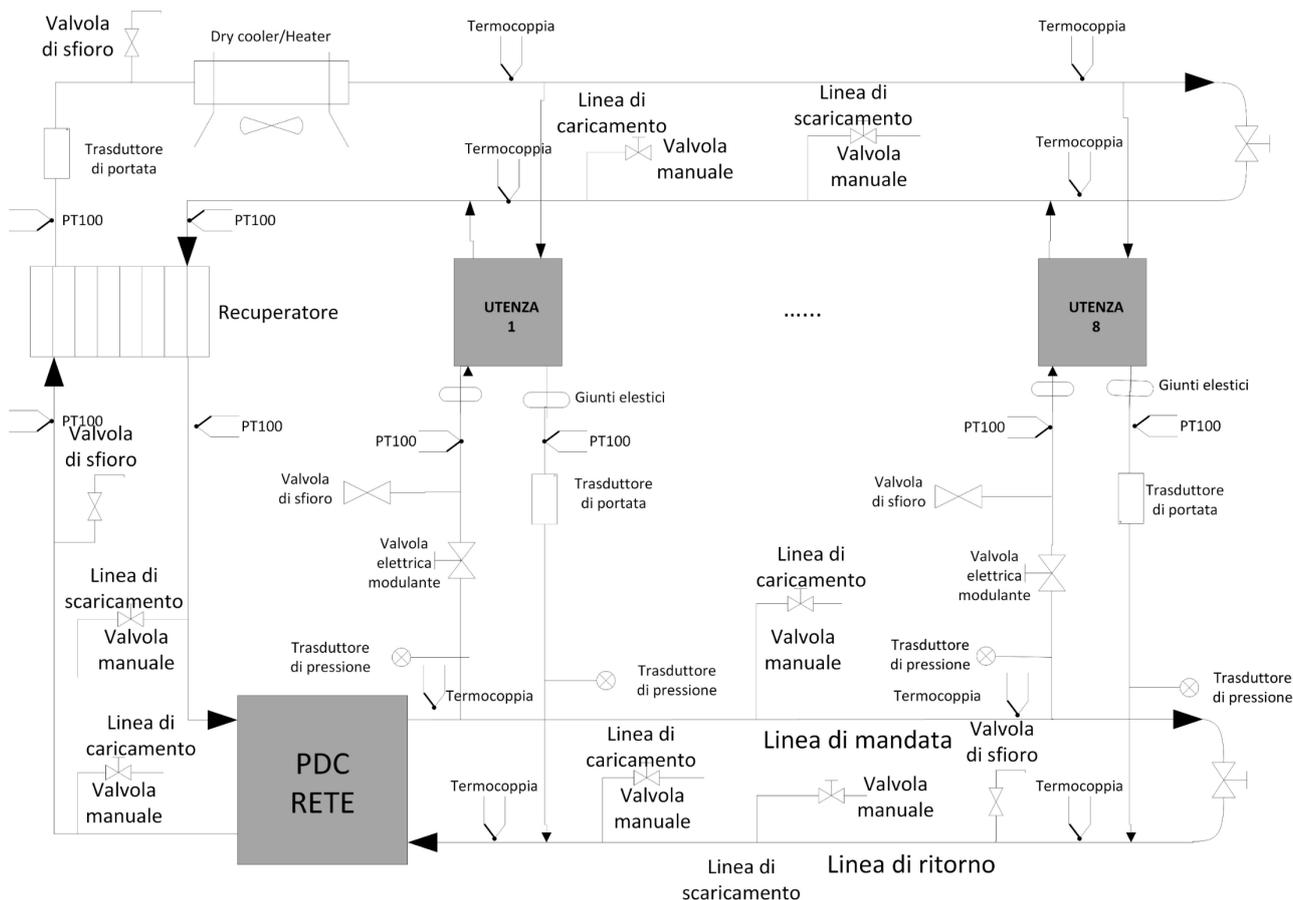
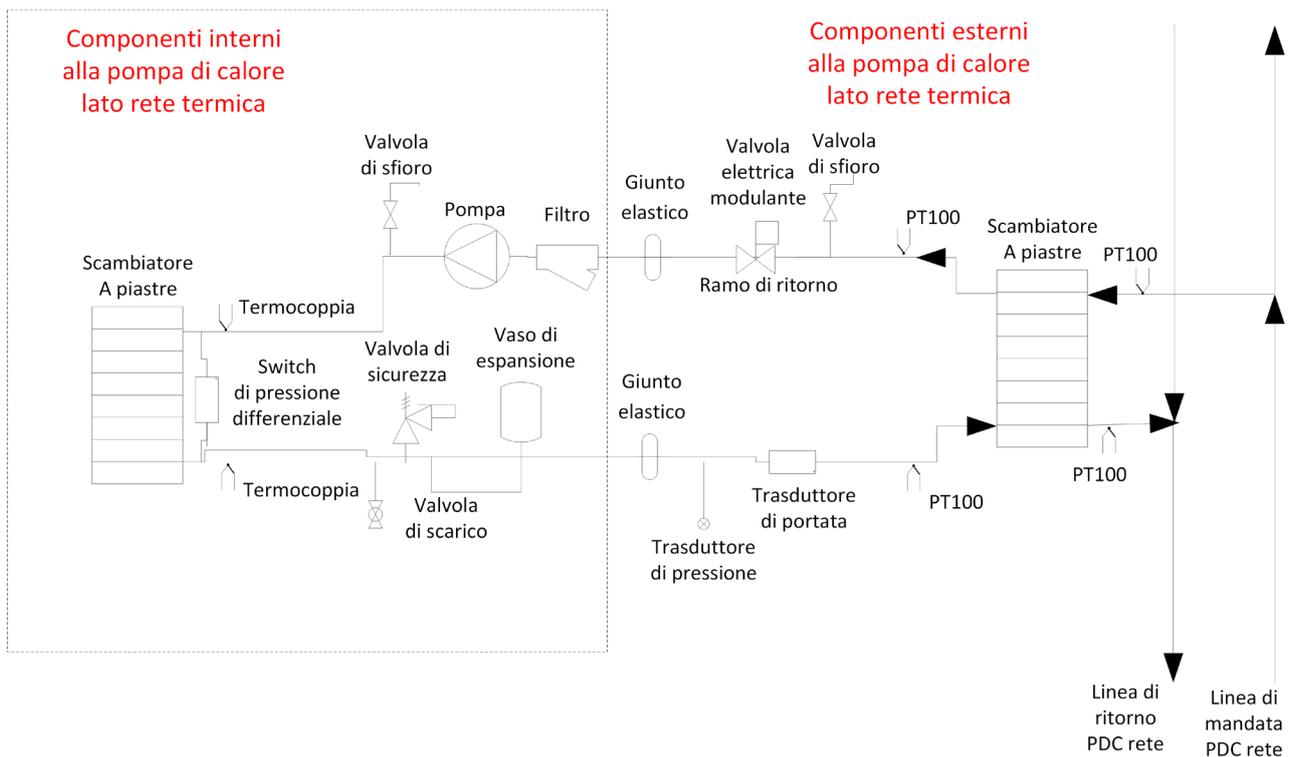


Figura 2. Schema ramo carico e circuito sorgente della pompa di calore della rete (PDC RETE).

La Figura 3 mostra una schematizzazione del circuito lato sorgente delle pompe di calore PDC UT, nel caso in cui è presente una sottostazione di scambio rappresentata dallo scambiatore di calore. Nella figura si possono distinguere i componenti interni alle pompe di calore, che dipendono dal prodotto commerciale acquistato, e quelli esterni. Con riferimento a quelli esterni, si possono notare i due sensori PT100 per la misura della temperatura a monte e valle dello scambiatore di calore, un trasduttore di pressione, un sensore di portata, e una valvola elettrica modulante per il controllo della portata. La Figura 4 mostra invece uno schema del ramo carico delle PDC UT. Similmente al ramo sorgente, anche in questo caso tra i componenti esterni alla pompa di calore sono presenti due sensori di temperatura PT100, un sensore di pressione, un sensore di portata, e una valvola modulante per il controllo della portata. In questo caso si può notare che internamente a ognuna delle PDC UT è presente un serbatoio di accumulo da 100 litri. Quanto ai componenti interni alle PDC UT, si fa notare che sia al ramo carico che al ramo sorgente le pompe di circolazione dell'acqua sono comprese nella componentistica interna delle macchine.

Per quanto riguarda i circuiti collegati alla pompa di calore PDC RETE, la Figura 5 mostra i componenti relativi al ramo di carico della pompa di calore, mentre la Figura 6 mostra quelli relativi al ramo sorgente. Tutti i componenti riportati in Figura 5 e Figura 6, in Figura 2 erano inclusi nel blocco PDC RETE. Oltre ai vari sensori e alle valvole elettriche modulanti per il controllo della portata, in Figura 5 si può notare il serbatoio di accumulo da 1000 litri esterno alla pompa di calore, e che anche per la pompa di calore della rete tra i componenti interni sono presenti le pompe di circolazione dell'acqua.



**Figura 3. Schema ramo sorgente pompe di calore utenze (PDC UT).**

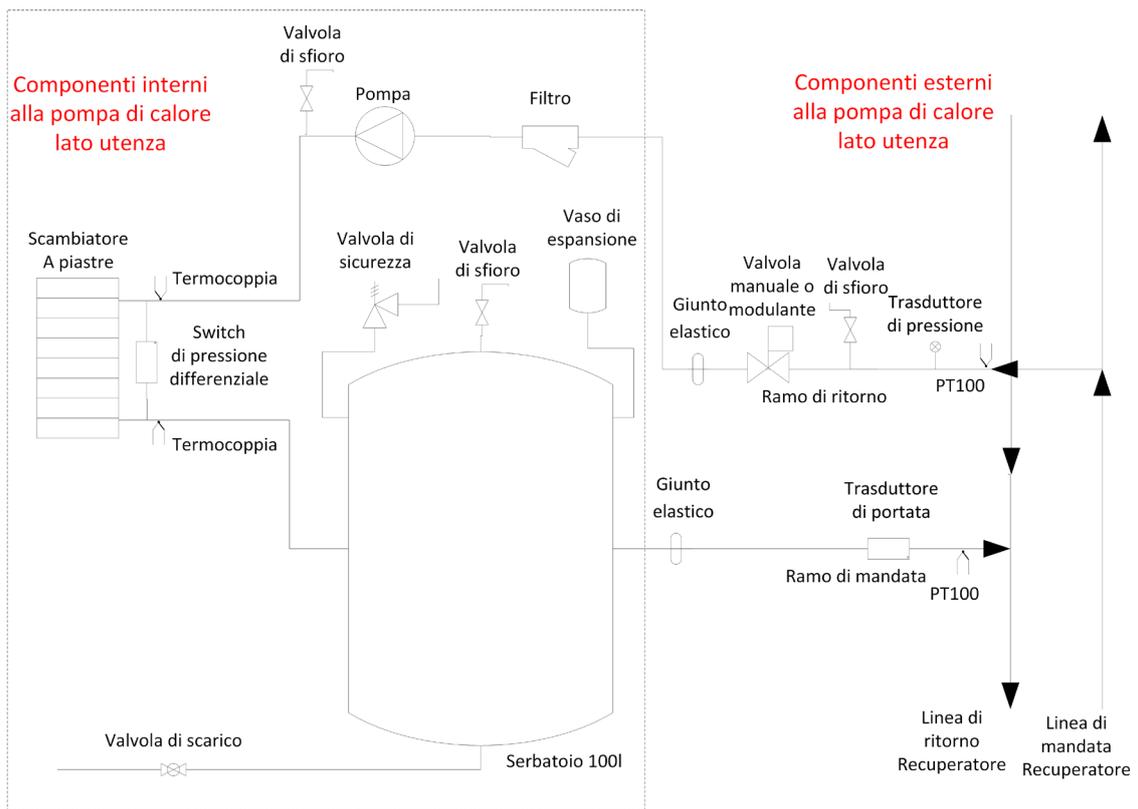


Figura 4. Schema ramo carico pompe di calore utenze (PDC UT).

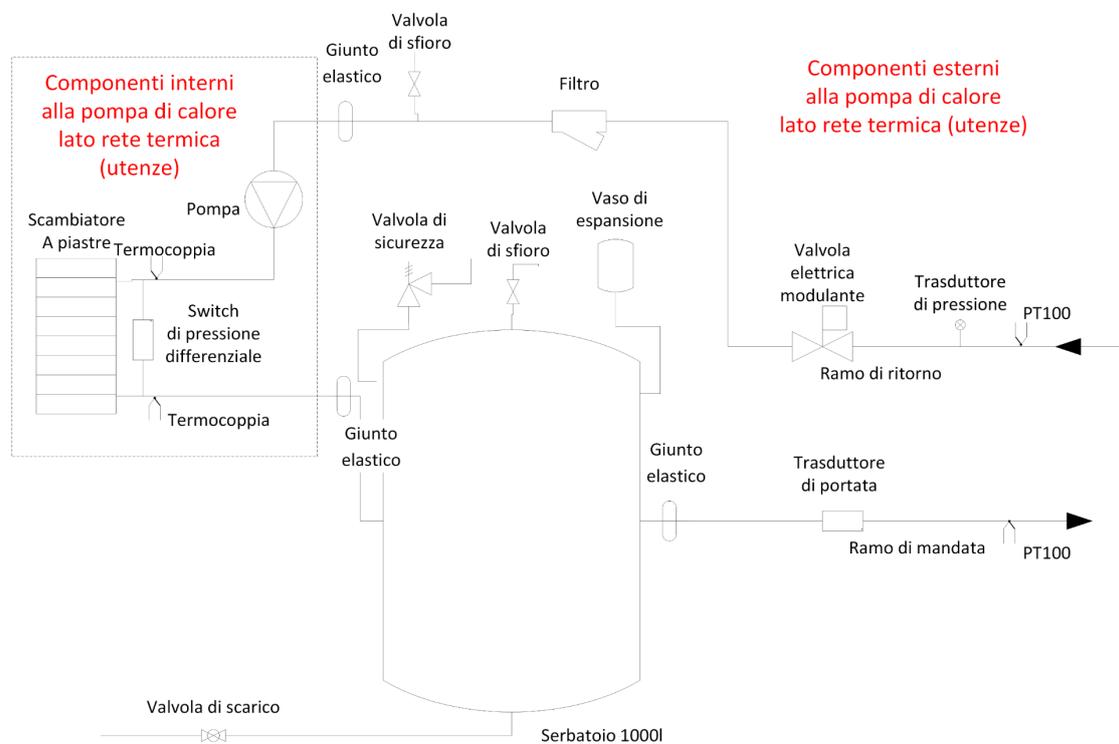


Figura 5. Schema ramo carico pompa di calore rete (PDC RETE).

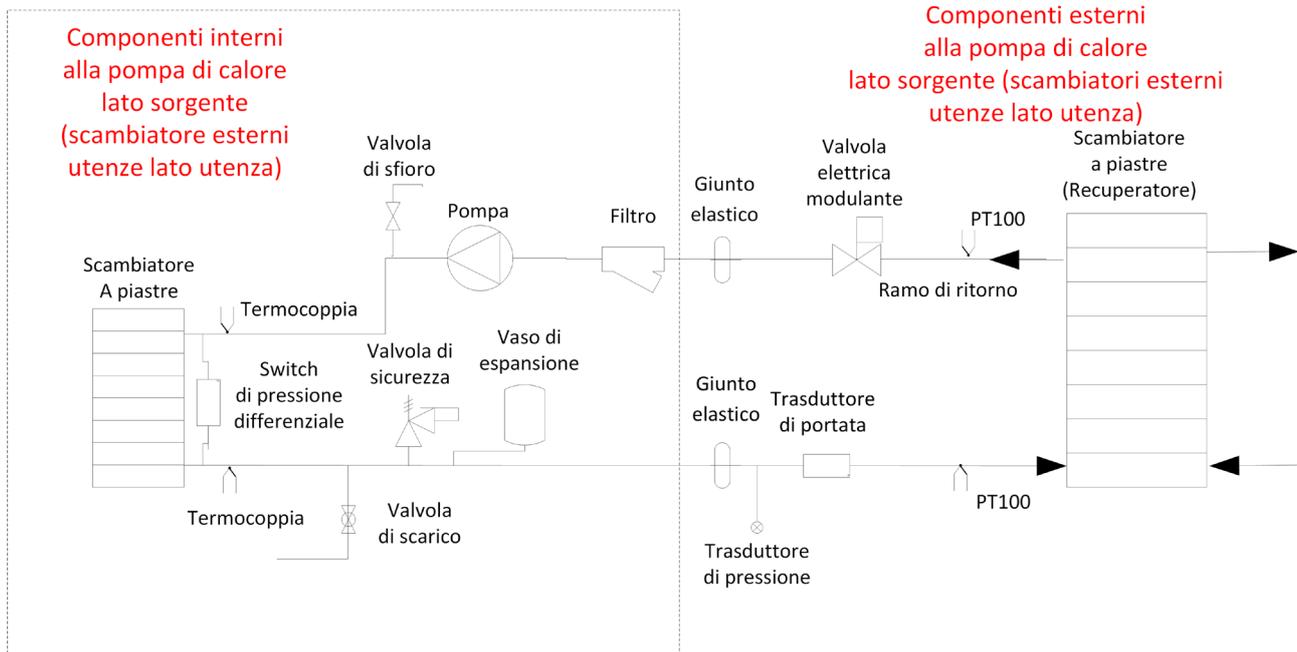


Figura 6. Schema ramo sorgente pompa di calore rete (PDC RETE).

### 3 Caratteristiche dei componenti principali della rete termica indoor

In questa sezione si riportano le caratteristiche delle soluzioni commerciali relative ai principali componenti della rete termica indoor che sono stati acquistate. La realizzazione della rete termica indoor in ENEA Portici non è stata affidata a una ditta esterna, ma è stata effettuata utilizzando personale interno ENEA, che si è occupato di tutti gli aspetti relativi alla realizzazione della rete, ovvero del montaggio dei componenti dei circuiti idraulici, della realizzazione dei quadri elettrici e di automazione, e della realizzazione dell'interfaccia software per le misure e la gestione della rete. Pertanto, i componenti di vario tipo che compongono l'intera rete sono stati acquistati separatamente mediante procedure dedicate. La Figura 7 mostra la rete termica indoor realizzata in Enea Portici.



Figura 7. Rete termica indoor.

### 3.1 Pompe di calore

Per le pompe di calore delle utenze, e la pompa di calore e il serbatoio di accumulo da 1000 litri della rete è stata fatta un'unica gara, che è stata vinta dalla ditta AERMEC S.p.A.

La Figura 8 mostra una delle pompe di calore delle utenze. Si tratta di una pompa di calore reversibile lato gas condensata ad acqua con un compressore ermetico scroll, fluido frigorifero R-410a, e scambiatori a piastre per la produzione di acqua refrigerata e acqua calda. Essa è provvista di un sistema di accumulo dell'acqua da 100 litri integrato e isolato termicamente, di una pompa di circolazione con inverter sul lato sorgente e di una pompa di circolazione con inverter su quello del carico, entrambe integrate, e di interfaccia RS-485 per sistemi di supervisione e controllo con protocollo MODBUS per il controllo dinamico da remoto della temperatura dell'acqua prodotta.

Nel funzionamento da refrigeratore, ciascuna delle pompe di calore delle utenze possiede le seguenti performance:

- Potenza di refrigerazione nominale compresa nell'intervallo 10 kW – 12 kW;
- Potenza elettrica totale assorbita in condizioni nominali compresa nell'intervallo 2 kW – 3 kW;
- Temperatura ingresso e uscita evaporatore pari rispettivamente a 12°C e 7°C;
- Portata nominale acqua all'evaporatore compresa tra 1600 l/h e 2000 l/h, e con prevalenza utile in condizioni nominali del circolatore non inferiore a 60 kPa;
- Temperatura ingresso e uscita condensatore pari rispettivamente a 30°C e 35°C;
- Portata nominale acqua al condensatore compresa tra 1900 l/h e 2300 l/h, con prevalenza utile in condizioni nominali del circolatore non inferiore a 50 kPa.

Nel funzionamento da riscaldatore, ciascuna delle pompe di calore delle utenze possiede le seguenti performance:

- Potenza di riscaldamento nominale compresa nell'intervallo 11 kW – 13 kW;
- Potenza elettrica totale assorbita in condizioni nominali compresa nell'intervallo 3 kW – 4 kW;
- Temperatura ingresso e uscita condensatore pari rispettivamente a 40°C e 45°C;
- Portata nominale acqua al condensatore compresa tra 1900 l/h e 2300 l/h, con prevalenza utile in condizioni nominali del circolatore non inferiore a 40 kPa;
- Temperatura ingresso e uscita evaporatore pari rispettivamente a 10°C e 7°C;
- Portata nominale acqua all'evaporatore compresa tra 2500 l/h e 3000 l/h, con prevalenza utile in condizioni nominali del circolatore non inferiore a 15 kPa.

La Figura 9 mostra la pompa di calore della rete. Anche in questo caso, la pompa di calore è reversibile lato gas e condensata ad acqua, con due compressori scroll in parallelo, fluido frigorifero R-410a, e scambiatori a piastre per la produzione di acqua refrigerata e acqua calda. Essa è provvista di una pompa di circolazione con inverter sul lato sorgente e di una pompa di circolazione con inverter su quello del carico, entrambe integrate, e di interfaccia RS-485 per sistemi di supervisione e controllo con protocollo MODBUS per il controllo dinamico da remoto della temperatura dell'acqua prodotta.

Nel funzionamento da refrigeratore, la pompa di calore della rete possiede le seguenti performance:

- Potenza di refrigerazione nominale compresa nell'intervallo 90 kW – 95 kW;
- Potenza elettrica totale assorbita in condizioni nominali compresa nell'intervallo 18 kW – 22 kW;
- Temperatura ingresso e uscita evaporatore pari rispettivamente a 12°C e 7°C;
- Portata nominale acqua all'evaporatore compresa tra 15800 l/h e 16200 l/h, e con prevalenza utile in condizioni nominali del circolatore non inferiore a 100 kPa;
- Temperatura ingresso e uscita condensatore pari rispettivamente a 30°C e 35°C;
- Portata nominale acqua al condensatore compresa tra 19000 l/h e 19500 l/h, con prevalenza utile in condizioni nominali del circolatore non inferiore a 150 kPa.

Nel funzionamento da riscaldatore, la pompa di calore della rete possiede le seguenti performance:

- Potenza di riscaldamento nominale compresa nell'intervallo 103 kW – 108 kW;
- Potenza elettrica totale assorbita in condizioni nominali compresa nell'intervallo 22 kW – 26 kW;
- Temperatura ingresso e uscita condensatore pari rispettivamente a 40°C e 45°C;
- Portata nominale acqua al condensatore compresa tra 18300 l/h e 18600 l/h, con prevalenza utile in condizioni nominali del circolatore non inferiore a 90 kPa;
- Temperatura ingresso e uscita evaporatore pari rispettivamente a 10°C e 7°C;
- Portata nominale acqua all'evaporatore compresa tra 24000 l/h e 24400 l/h, con prevalenza utile in condizioni nominali del circolatore non inferiore a 110 kPa.

Infine, la Figura 10 mostra l'armadio con all'interno il serbatoio di accumulo da 1000 litri collegato alla pompa di calore della rete. Si tratta di un serbatoio cilindrico verticale isolato termicamente, fornito in un unico armadio assieme ai vasi di espansione, all'interno del quale è possibile installare anche pompe di circolazione aggiuntive.



**Figura 8. Pompa di calore di ciascun'utenza.**



**Figura 9. Pompa di calore della rete.**



**Figura 10. Serbatoio di accumulo da 1000 litri.**

### **3.2 Scambiatori di calore**

Escludendo i condensatori e gli evaporatori delle pompe di calore, nella rete termica sono presenti nove scambiatori di calore a piastre: otto sono quelli delle sottostazioni di scambio delle pompe di calore delle utenze; uno è quello relativo al recuperatore di calore che collega il circuito sorgente della pompa di calore della rete ai circuiti carico delle pompe di calore delle utenze.

La Figura 11 mostra uno degli otto scambiatori di calore a piastre, tutti uguali, che collegano la rete termica al circuito sorgente delle pompe di calore delle utenze. Il dimensionamento di questi scambiatori è stato effettuato in funzione delle caratteristiche delle pompe di calore, e con l'obiettivo di ottenere i due set di temperature lato caldo e lato freddo riportati in Figura 12 e Figura 13. Gli scambiatori alle utenze possono essere agevolmente bypassati in modo da collegare il ramo sorgente delle pompe di calore direttamente alla rete termica.



**Figura 11. Scambiatore di calore a piastre presente in ciascuna sottostazione di scambio delle pompe di calore delle utenze.**

Fluid		Hot Side	Cold side
Density	kg/m <sup>3</sup>	Water 989.6	Water 1000
Specific heat capacity	kJ/(kg·K)	4.18	4.21
Thermal conductivity	W/(m·K)	0.634	0.585
Viscosity inlet	cP	0.596	1.43
Viscosity outlet	cP	0.638	1.31
Volume flow rate	m <sup>3</sup> /h	2.3	2.8
Inlet temperature	°C	45.0	7.0
Outlet temperature	°C	41.3	10.0
Pressure drop	kPa	7.48	9.60
Heat exchanged	kW	9.820	
L.M.T.D.	K	34.6	
OHTC clean conditions	W/(m <sup>2</sup> ·K)	3294	
OHTC service	W/(m <sup>2</sup> ·K)	738.3	
Heat transfer area	m <sup>2</sup>	0.4	
Effective duty margin	%	346.2	
Relative directions of fluids		Countercurrent	

Figura 12. Set n. 1 di parametri di funzionamento degli scambiatori di calore alle utenze.

Fluid		Hot Side	Cold side
Density	kg/m <sup>3</sup>	Water 993.5	Water 1000
Specific heat capacity	kJ/(kg·K)	4.18	4.20
Thermal conductivity	W/(m·K)	0.621	0.586
Viscosity inlet	cP	0.721	1.43
Viscosity outlet	cP	0.795	1.24
Volume flow rate	m <sup>3</sup> /h	2.2	2.0
Inlet temperature	°C	35.0	7.0
Outlet temperature	°C	30.4	12.0
Pressure drop	kPa	7.21	5.30
Heat exchanged	kW	11.78	
L.M.T.D.	K	23.2	
OHTC clean conditions	W/(m <sup>2</sup> ·K)	2934	
OHTC service	W/(m <sup>2</sup> ·K)	1324	
Heat transfer area	m <sup>2</sup>	0.4	
Effective duty margin	%	121.7	
Relative directions of fluids		Countercurrent	

Figura 13. Set n. 2 di parametri di funzionamento degli scambiatori di calore alle utenze.

La Figura 14 mostra lo scambiatore di calore (recuperatore) che collega il circuito sorgente della pompa di calore della rete termica ai circuiti carico delle pompe di calore delle utenze. Chiaramente, anche in questo caso il dimensionamento dello scambiatore è stato effettuato in funzione delle caratteristiche delle pompe di calore, e con l'obiettivo di ottenere i due set di temperature lato caldo e lato freddo riportati in Figura 15 e Figura 16.



Figura 14. Recuperatore di calore.

Fluid		Hot Side	Cold side
Density	kg/m <sup>3</sup>	Water 989.7	Water 1000
Specific heat capacity	kJ/(kg·K)	4.18	4.21
Thermal conductivity	W/(m·K)	0.634	0.585
Viscosity inlet	cP	0.596	1.43
Viscosity outlet	cP	0.645	1.31
Volume flow rate	m <sup>3</sup> /h	17.3	24.1
Inlet temperature	°C	45.0	7.0
Outlet temperature	°C	40.7	10.0
Pressure drop	kPa	28.2	65.0
Heat exchanged	kW	84.52	
L.M.T.D.	K	34.4	
OHTC clean conditions	W/(m <sup>2</sup> ·K)	5139	
OHTC service	W/(m <sup>2</sup> ·K)	1126	
Heat transfer area	m <sup>2</sup>	2.2	
Effective duty margin	%	356.4	
Relative directions of fluids		Countercurrent	

**Figura 15. Set n. 1 di parametri di funzionamento del recuperatore.**

Fluid		Hot Side	Cold side
Density	kg/m <sup>3</sup>	Water 993.3	Water 1000
Specific heat capacity	kJ/(kg·K)	4.18	4.20
Thermal conductivity	W/(m·K)	0.621	0.586
Viscosity inlet	cP	0.721	1.43
Viscosity outlet	cP	0.780	1.24
Volume flow rate	m <sup>3</sup> /h	19.4	14.4
Inlet temperature	°C	35.0	7.0
Outlet temperature	°C	31.2	12.0
Pressure drop	kPa	35.8	24.5
Heat exchanged	kW	84.14	
L.M.T.D.	K	23.6	
OHTC clean conditions	W/(m <sup>2</sup> ·K)	4561	
OHTC service	W/(m <sup>2</sup> ·K)	1632	
Heat transfer area	m <sup>2</sup>	2.2	
Effective duty margin	%	179.5	
Relative directions of fluids		Countercurrent	

**Figura 16. Set n. 2 di parametri di funzionamento del recuperatore.**

### 3.3 Sensori e valvole

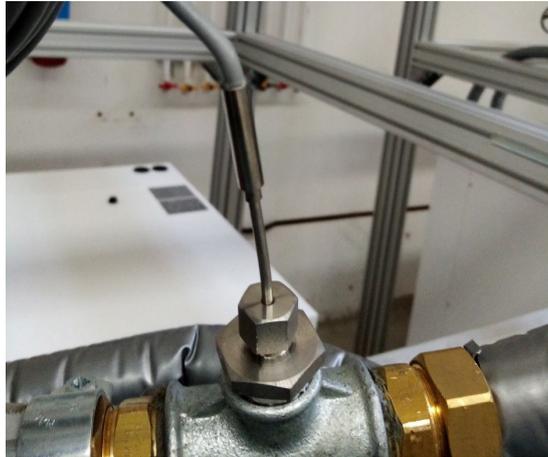
In tutti i rami dei vari circuiti che compongono la rete termica vengono misurate la temperatura, la pressione, e la portata, e viene effettuato il controllo della portata tramite valvole elettriche modulanti.

Le misure di temperatura vengono effettuate tramite Pt100 a 4 fili, come quella mostrata in Figura 17. Si tratta di PT100 a singolo elemento sensibile (classe A IEC60751), con guaina in AISI316L di diametro 3 mm e lunghezza 100 mm, con bussolotto di transizione in resina e cavo schermato isolato in PVC, montate tramite un raccordo scorrevole filettato con ogiva deformabile in acciaio inox cilindrico. Oltre alle PT100, nella rete termica sono presenti anche delle termocoppie tipo T classe I per effettuare misure ridondanti di temperatura.

Le misure di pressione relativa sono effettuate con trasduttori di pressione piezoresistivi con accuratezza pari allo 0,5% V.M. - 1% F.S., come quello mostrato in Figura 18, con alimentazione 10-30 V DC, range di misura fino a 6 bar, e uscita 4-20 mA, mentre le misure di portata sono effettuate tramite sensori magnetici come quello mostrato in Figura 19, con un'accuratezza del 2% del valore misurato nel range di variazione della portata, e uscita 4-20 mA.

Il controllo della portata nei vari circuiti che compongono la rete termica viene effettuato mediante valvole elettriche, come quella mostrata in Figura 20, con attuatori rotativi da 5 Nm nei circuiti da 1" alimentati dalle pompe di circolazione delle pompe di calore delle utenze, e attuatori da 20 Nm nei circuiti da 2" alimentati dalle pompe di circolazione della pompa di calore della rete. Tutti gli attuatori sono alimentati in DC 24 V, modulanti con tempo di azionamento motore 90 s / 90°, campo di lavoro 2...10 V e feedback posizione 2...10 V.

Infine, tutte le misure e i controlli sono effettuati mediante moduli National Instruments montati su due controller cRIO-9066 della NI, utilizzando il software Labview.



**Figura 17. Sensore di temperatura PT100.**



**Figura 18. Trasduttore di pressione piezoresistivo.**



**Figura 19. Sensore di portata magnetico.**

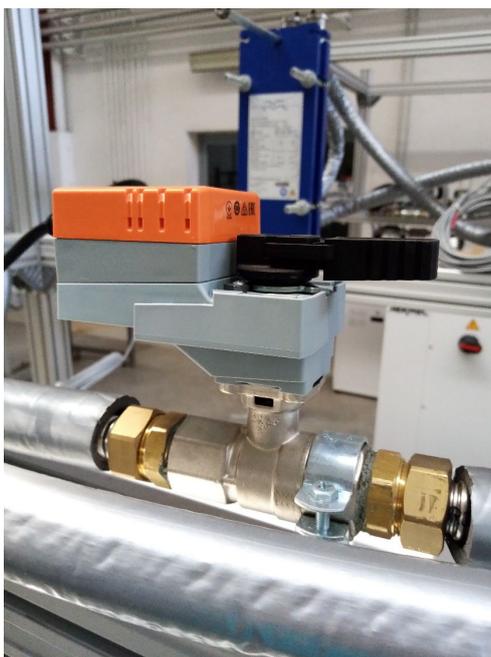


Figura 20. Valvola modulante con attuatore da 5 Nm.

## 4 Conclusioni

In questo documento sono state descritte le attività relative alla realizzazione della rete termica indoor a bassa temperatura presso il laboratorio LPSAT del CR Enea Portici, secondo quanto previsto dal Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico. La rete termica che è stata realizzata consentirà di testare sperimentalmente differenti soluzioni sia per quanto riguarda la tipologia e la taglia dei componenti principali della rete (generatori, carichi, ecc.), sia per quanto concerne la topologia della rete termica. Pertanto, grazie alla rete termica realizzata si potranno raggiungere gli obiettivi previsti per l'ultima parte del triennio, ovvero la validazione sperimentale dei risultati numerici ottenuti dalla simulazione e dall'ottimizzazione numerica di reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento innovative, che saranno conseguiti nell'ambito della linea di attività LA 4.21, e di individuare linee guida per la progettazione di reti termiche di ultima generazione.