

Ricerca di Sistema elettrico



Sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili per il comparto agroindustriale. Attività sperimentale condotta applicando carichi termici e frigoriferi specifici di un'azienda vinicola e una azienda agrituristica (LA4.17)

Fernando Antonio Cancellara, Antonino Ciappa, Biagio Di Pietra, Giovanni Puglisi

Sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili per il comparto agroindustriale. Attività sperimentale condotta applicando carichi termici e frigoriferi specifici di un'azienda vinicola e una azienda agrituristica (LA 4.17)

Fernando Antonio Cancellara, Antonino Ciappa, Biagio Di Pietra, Giovanni Puglisi (ENEA)

Con il contributo di: Emilio Monno (ENEA), Maria Malvoni (ENEA)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: LA 4.17

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Biagio Di Pietra, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 01/2022

Mese inizio effettivo: 01/2022

Mese fine previsto: 12/2024

Mese fine effettivo: 12/2024

Indice

1	Risultati attesi.....	6
2	Risultati ottenuti	7
3	Prodotti attesi.....	12
4	Prodotti sviluppati	13
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	14
6	Sintesi delle attività svolte	15
7	Dettaglio delle attività svolte	16
7.1	Composizione dell'impianto e Area di Applicazione	16
7.2	Installazione di nuovi componenti idraulici nell'impianto di Poligenerazione	18
7.3	Ingegnerizzazione e modifica nella parte software	20
7.4	Logica di automazione della sezione "emulatore carico termico"	22
7.4.1	Emulazione carico Termico estivo ed invernale.	23
7.4.2	Logica di controllo della pompa P5 – lato sorgente	24
7.4.3	Attivazione della logica del circolatore P6 per emulare il carico termico.....	26
7.4.3.1	Correlazione tra percentuale di velocità del circolatore P6 e potenza termica	26
7.4.4	Logica di controllo del circolatore P6.....	28
7.5	Applicazione del profilo di carico termico estivo di un caso studio: Cantina vinicola	30
7.5.1	Prova sperimentale di inseguimento del profilo giornaliero di carico termico estivo di un giorno tipo del mese di settembre – caso studio cantina	31
7.5.1.1	Profilo di carico termico frigorifero tipo	31
7.5.1.2	Prova sperimentale con il sistema di poligenerazione in condizioni estive ...	32
7.5.2	Prova sperimentale di inseguimento del profilo di carico termico invernale del caso studio relativo ad un giorno invernale (03 gennaio).....	35
7.5.2.1	Prova sperimentale con il sistema di poligenerazione in configurazione invernale	35
7.6	Valutazione nel lungo periodo delle prestazioni energetiche, economiche ed ambientali di sistemi di poligenerazione al servizio di una utenza (caso studio cantina)	38
7.6.1	Valutazione potenziali benefici energetici ed economici estesi al periodo estivo	38

7.6.2	Valutazione potenziali benefici energetici ed economici estesi al periodo invernale	39
7.6.3	Sintesi del vantaggio di utilizzo dell'impianto di poligenerazione estivo ed invernale - Caso studio Cantina	41
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte	42
9	Pubblicazioni scientifiche.....	43
10	Eventi di disseminazione	44

Indice delle figure

Figura 1 - Configurazione d'impianto precedente triennio.....	7
Figura 2 - Particolare (configurazione del triennio precedente) del collegamento idraulico tra la pompa di calore aria-acqua e il serbatoio ausiliario collegato alla pompa di circolazione denominata "P5"	8
Figura 3 - Nuova Configurazione d'impianto lato emulazione dei profili di carico termico con nuovo "Serbatoio 1" e "Serbatoio 2" esistente.....	9
Figura 4 - Serbatoio 1 "Aermec" e nuovo circolatore "P6"	9
Figura 5 - Schermata del software di controllo lato emulazione dei profili di carico termico ..	10
Figura 6 - Schermata del software di controllo Pompa P6 e Flussimetro F12	10
Figura 7 -Particolare del collegamento idraulico tra la pompa di calore aria-acqua e il serbatoio ausiliario collegato alla pompa di circolazione denominata "P5" - (configurazione impianto triennio precedente).....	17
Figura 8 - Impianto Poligenerazione configurazione precedente al triennio 22-24.....	17
Figura 9 - Schema Area emulazione del carico termico	18
Figura 10- Installazione nuovo serbatoio inerziale da 500 litri - foto impianto.....	19
Figura 11-Area Simulazione del carico termico: collegamenti e posizionamento dei circolatori	19
Figura 12 -Posizionamento flussimetro F11	20
Figura 13- Schermata home e di comando delle diverse aree del software di controllo	20
Figura 14-Pagina del software per il controllo della Pompa P6	21
Figura 15- Sinottico impianto poligenerazione: particolare nuovo circolatore "Pompa P6"	21
Figura 16 -Pagina del software per il monitoraggio del Flussimetro F11	22
Figura 17 -Pagina del software per il monitoraggio delle temperature dei serbatoi rilevate dalle PT100.....	22
Figura 18- Schema sezione d'impianto "emulazione carico termico"	23

Figura 19-Schema sezione di Emulazione del Carico termico- Ipotesi di funzionamento carico termico estivo	23
Figura 20-Pagina del software di controllo della sezione emulazione del carico termico	24
Figura 21 -Pompa P5 : Attivazione disattivazione soglia sup/inf	25
Figura 22: Pagina del software" Logica per l'Attivazione pompa P5	26
Figura 23 -Parte dell'impianto relativa alla Logica del circolatore P6.....	26
Figura 24: Correlazione velocità e carico termico erogato.....	28
Figura 256-Pagina del software" Logica per l'attivazione del circolatore P6": sezione emulazione carico termico	29
Figura 26 -Configurazione estiva del sistema di poligenerazione	30
Figura 27-Configurazione invernale del sistema di poligenerazione	31
Figura 28-Andamento Potenza frigorifera richiesta in 24 ore dai locali della Cantina Vitivinicola simulata.....	32
Figura 29 -Andamento del profilo di carico Termico Simulato.....	32
Figura 30 -Inseguimento emulazione del Carico e risposta lato energia fonti rinnovabili	33
Figura 31: Carico termico del caso studio emulato - potenza generata dal sistema di poligenerazione.....	34
Figura 32 -Andamento Potenza termica Richiesta in 24 ore di un giorno invernale (gennaio). 35	
Figura 33 -Configurazione invernale del sistema di poligenerazione	36
Figura 34 -Andamento del Profilo di Carico Simulato invernale (W) richiesto nelle 24 ore (mese di gennaio)	37
Figura 355 -Inseguimento emulazione del Carico e risposta lato energia fonti rinnovabili	37

Indice delle tabelle

Tabella 1-Parametri di partenza per caratterizzare il circolatore P6.....	27
Tabella 2 - Prove sperimentali di variazione di velocità del circolatore P6 correlazione con la potenza termica scambiata con il Serbatoio 2	27
Tabella 3 Correlazione percentuale (%) della velocità del circolatore P6 e carico termico (Power)	29

Tabella 4 -Profilo di Carico Termico Simulato: correlazione tra % Velocità Pompa P6 Carico termico nelle 24 ore.....	33
Tabella 5: Valori di fabbrica prestazionali della pompa di calore geotermica	34
Tabella 6: Profilo di Carico Termico Simulato Invernale: correlazione tra % Velocità Pompa P6 Carico termico nelle 24 ore	36
Tabella 7: Analisi energetica dei consumi periodo estivo caso studio cantina	38
Tabella 8: -Parametri e coefficienti utilizzati per il gas	39
Tabella 9: Risultati di calcolo utilizzando gas naturale	39
Tabella 10: Parametri e coefficienti utilizzati (con elettricità prelevata dalla rete elettrica)...	39
Tabella 11: - Risultati del calcolo (con elettricità prelevata dalla rete)	40
Tabella 12: -Parametri e coefficienti utilizzati (per alimentare una caldaia a biomassa).....	40
Tabella 13: Risultati del calcolo (per alimentare una caldaia a biomassa)	40
Tabella 14: Confronto dei costi energetici per soddisfare il fabbisogno termico stagionale....	41

1 Risultati attesi

- Ingegnerizzazione del software del sistema di controllo di poligenerazione da fonti rinnovabili (di ogni singolo componente del sistema di poligenerazione si potranno gestire e modificare tutti i suoi parametri di comando).
- Monitoraggio sperimentale delle configurazioni del sistema di poligenerazione e successiva ottimizzazione delle relative strategie di controllo e regolazione.
- Acquisizione di un maggiore consapevolezza circa le eventuali problematiche connesse alla realizzazione e gestione di sistemi di poligenerazione complessi, che prevedano l'integrazione di molteplici tecnologie di produzione di energia da fonti rinnovabili e di sistemi di accumulo.
- Validazione delle tipologie di utenze considerate più appropriate all'applicazione delle differenti configurazioni del sistema di poligenerazione.
- Valutazione delle prestazioni energetiche, economiche ed ambientali di sistemi di poligenerazione al servizio di differenti tipologie di utenze.

2 Risultati ottenuti

Nelle precedenti annualità è stato realizzato presso il Centro Didattico-Sperimentale 'P. Martucci' a Valenzano (BA) il sistema di poligenerazione che integra diverse fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica e termica come riportato nello schema Figura 1. In particolare, l'impianto è composto da un campo fotovoltaico, una pompa di calore geotermica, una caldaia a biomassa, un impianto di solar heating and cooling e sistemi di accumulo. È suddiviso in cinque aree: Fotovoltaica (produzione di energia elettrica), Solar Cooling (raffrescamento termico), Caldaia a Biomassa e Pompa di Calore Geotermica, Interno alla Serra (simulazione di un ambiente agricolo) e Simulatore del Carico.

L'ottimizzazione dell'impianto di poligenerazione, oggetto della presente linea d'attività, ha permesso di studiare e valutare l'autoconsumo locale e la gestione della domanda energetica di un caso studio (cantina vitivinicola). In particolare, grazie all'installazione delle nuove soluzioni per l'emulazione dei profili di carico di specifiche utenze e all'ottimizzazione del sistema di controllo del sito sperimentale è stato possibile riprodurre in modo molto preciso e puntuale i carichi termici previsti e richiesti dal caso studio. Con l'aggiornamento del sistema di controllo rispetto alla versione utilizzata nel precedente triennio è stato possibile monitorare e gestire, in modo simultaneo, la sezione d'impianto a fonte rinnovabile, controllando in modo più efficace le macchine e gli accumuli ad essi collegati. Ciò ha permesso di raggiungere lo scopo di ridurre al minimo il fabbisogno di energia prelevata dalla rete nelle fasce orarie critiche e nelle ore in cui il sistema di poligenerazione è in grado di fornire energia.

Durante la stagione sperimentale precedente, le prove avevano evidenziato una differenza tra le portate idrauliche gestite dalla pompa di calore aria-acqua e quelle della pompa di circolazione denominata "P5" lato rinnovabili (vedi Figura 2). L'obiettivo era quello di generare un profilo di carico termico realistico utilizzando la pompa di calore come generatore di carico simulato, per poi testare la capacità delle fonti rinnovabili (biomassa, solar cooling, geotermia, campo solare) di rispondere e adattarsi dinamicamente a tali richieste, in un'ottica di integrazione efficiente e ottimizzazione del mix energetico.

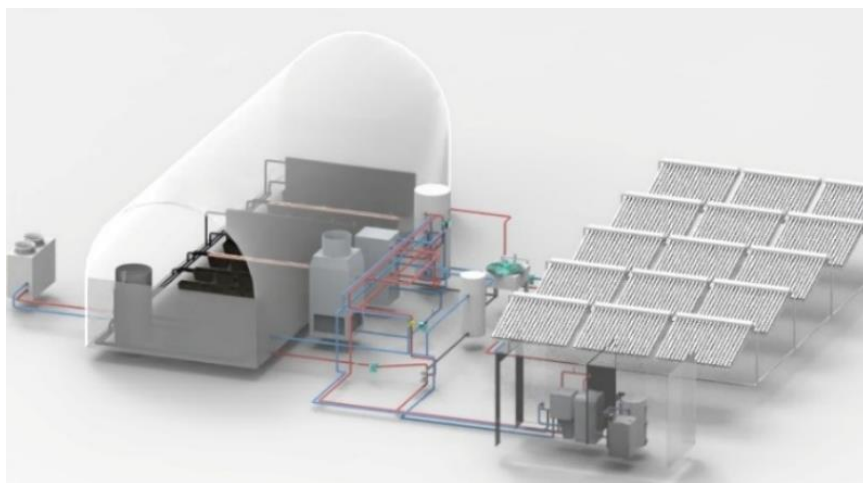


Figura 1 - Configurazione d'impianto precedente triennio

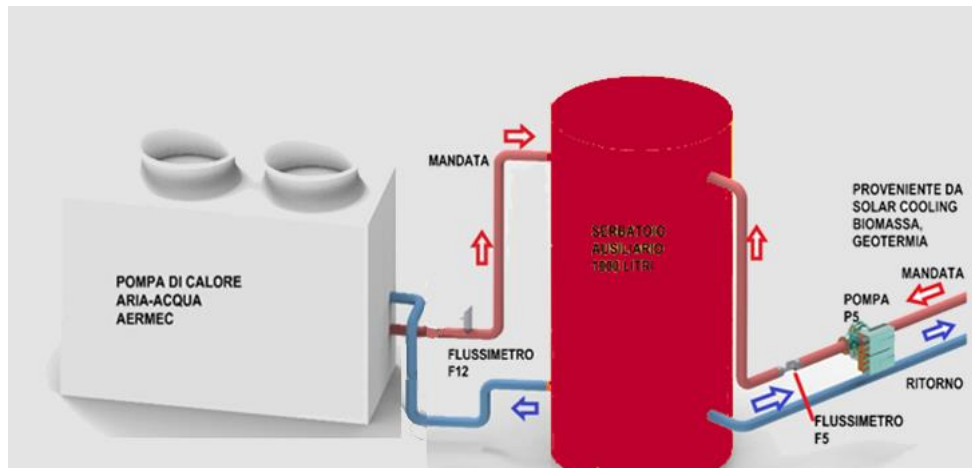


Figura 2 – Particolare (configurazione del triennio precedente) del collegamento idraulico tra la pompa di calore aria-acqua e il serbatoio ausiliario collegato alla pompa di circolazione denominata “P5”

Tuttavia, è emerso che la pompa di calore lavora con portate fisse e non modificabili, regolate direttamente dalla macchina, e che queste risultavano fino a cinque volte superiori rispetto a quelle gestite dal circolatore “P5”. Questo disequilibrio idraulico ha reso non sempre eseguibile la simulazione dei carichi da testare nel seguire il profilo termico imposto.

Per ovviare a tali criticità si è reso necessario modificare l’impianto, prevedendo:

- Un serbatoio tampone da 500 litri (“Serbatoio Aermec”), collegato direttamente alla pompa di calore, con funzione di disaccoppiamento idraulico tra il circuito della pompa di calore e il circuito delle rinnovabili (Figura 3);
- Una nuova pompa di circolazione identificata nel software del sistema di controllo come “Pompa P6” (vedi Figura 3).

Il nuovo circolatore “pompa P6”, gemello del circolatore “pompa P5”, ristabilisce la simmetria nella circolazione idraulica e consente un efficace inseguimento del carico da parte delle fonti rinnovabili. Essa è inoltre dotata per l’integrazione nei sistemi di supervisione e controllo.

Questa nuova configurazione impiantistica (Figura 3) consente ora di mantenere attiva la pompa di calore come generatore termico stabile, e al contempo pilotare in modo dinamico il contributo delle fonti rinnovabili, le quali risultano ora in grado di rispondere in maniera coerente, modulabile e flessibile al profilo di carico termico simulato.

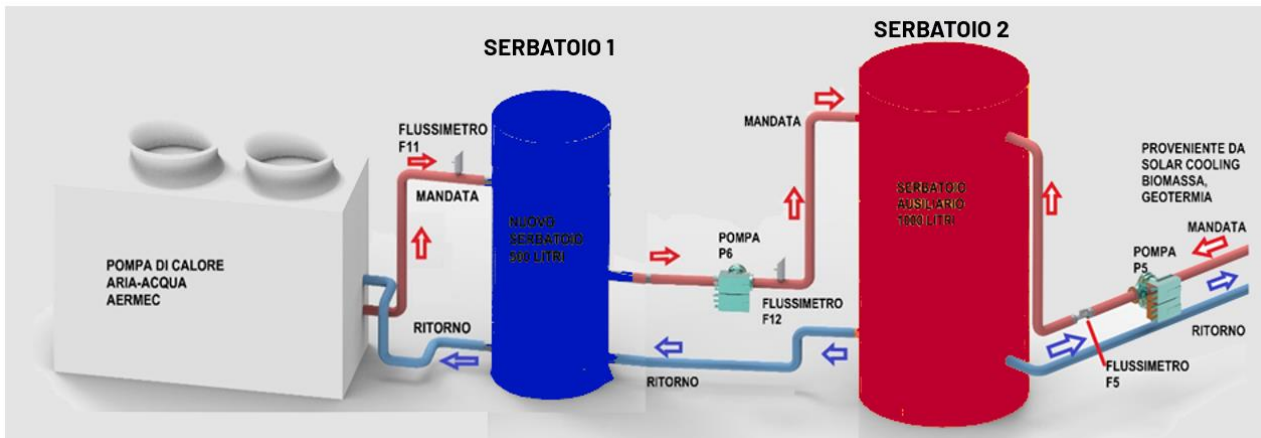


Figura 3 - Nuova Configurazione d'impianto lato emulazione dei profili di carico termico con nuovo "Serbatoio 1" e "Serbatoio 2" esistente



Figura 4 - Serbatoio 1 "Aermec" e nuovo circolatore "P6"

Nella parte software del sistema di controllo dell'impianto di poligenerazione sono state apportate alcune innovazioni anche in relazione ai nuovi componenti dell'impianto. In particolare, è stato inserito un'interfaccia del monitoraggio e controllo del nuovo circolatore "P6" e del nuovo flussimetro "F11" per il monitoraggio del flusso e temperatura del liquido riscaldato/raffreddato proveniente dal serbatoio da 500 litri, serbatoio Aermec. (Figura 5 - Figura 6) Sono state inserite n. 9 nuove temperature rilevate dalle nuove sonde PT100 sistemate in prossimità dei circolatori lungo tutte le mandate e corrispettivo tubo di ritorno, ed inserita logica (attraverso un algoritmo) che permette di far variare la percentuale di velocità della girante del nuovo circolatore "P6".

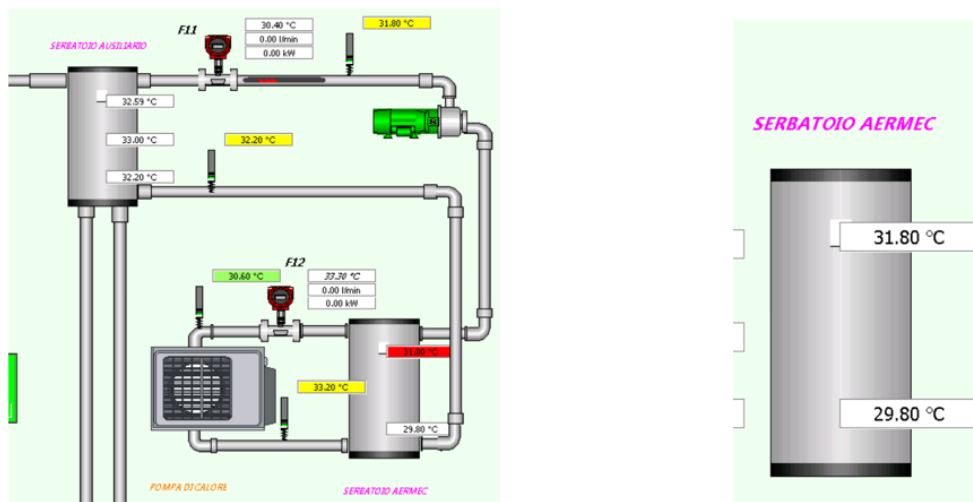


Figura 5 - Schermata del software di controllo lato emulazione dei profili di carico termico

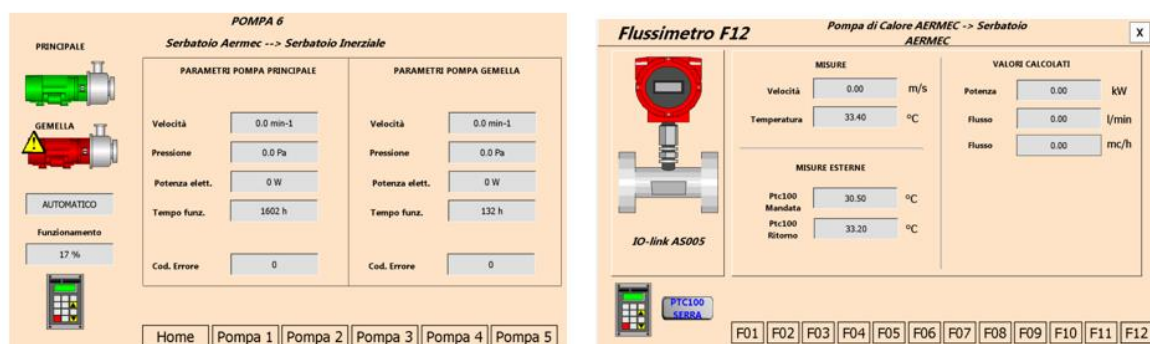


Figura 6 - Schermata del software di controllo Pompa P6 e Flussimetro F12

Il sistema di controllo si è arricchito di allarmi relativi a disconnessioni e interruzione della rete elettrica

Lo studio sperimentale di un profilo energetico termico del caso studio (Cantina vitivinicola - climatizzazione delle zone di lavorazione e di stoccaggio e non del processo produttivo), si è prestato ad essere modellato e replicato in ambiente controllato.

La validazione della cantina come caso studio si è basata su un'analisi comparativa tra i dati simulati di consumo (climatizzazione delle zone di lavorazione e di stoccaggio e non del processo produttivo) e le capacità del sistema sperimentale di emulare, mediante l'impiego della pompa di calore da una parte e delle fonti rinnovabili dall'altra, il comportamento termico ed energetico dell'utenza cantina. Il confronto ha mostrato che i profili di carico emulati erano coerenti in termini di ampiezza, frequenza e dinamica temporale con quelli tipici simulati di una cantina di cui eravamo in possesso dei consumi orari.

Inoltre, l'utilizzo della pompa di calore aria-acqua come generatore di carico termico simulato, e la possibilità di far "inseguire" a tale carico i contributi delle diverse fonti rinnovabili (biomassa, solar cooling, geotermia, campo solare), ha consentito di verificare la flessibilità del

sistema di poligenerazione nell'adattarsi a diverse condizioni operative, anche in presenza di variabilità climatica e stagionale.

Il sistema di poligenerazione è risultato un modello replicabile in altri contesti produttivi grazie a:

- Variabilità stagionale dei carichi termici/frigoriferi.
- Autosufficienza energetica durante le ore critiche.
- Riduzione del carico sulla rete e maggiore resilienza energetica.

Tecnologie integrate:

- Solar cooling, Fotovoltaico, Caldaia a biomassa, Pompa di calore geotermica, campo solare

Vantaggi:

- Stabilità dei flussi energetici
- Gestione dinamica tramite sistema di controllo avanzato
- Massimizzazione dell'autoconsumo
- Benefici economici e ambientali concreti

3 Prodotti attesi

Report di dettaglio, contenente la descrizione delle attività condotte e dei risultati ottenuti

4 Prodotti sviluppati

Report di dettaglio, contenente la descrizione delle attività condotte e dei risultati ottenuti.

Principali contenuti:

- Descrizione dell'impianto di poligenerazione e ambito di applicazione
- Interventi su componenti idraulici e aggiornamenti software
- Logiche di automazione per l'emulazione del carico termico estivo e invernale
- Strategie di controllo sulle pompe lato generazione (circolatore P5) e lato carico (circolatore P6)
- Correlazione tra velocità del circolatore P6 e profilo carico termico generato
- Applicazione a un caso studio emulato (cantina vinicola)
- Prove sperimentali di inseguimento del profilo termico giornaliero (estate e inverno)
- Analisi delle prestazioni energetiche, economiche e ambientali
- Benefici per l'utenza e per il sistema elettrico nazionale

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono stati riscontrati scostamenti tecnici/economici rilevanti rispetto al capitolato della presente LA4.17

6 Sintesi delle attività svolte

Presso il Centro Didattico-Sperimentale "P. MARTUCCI", situato nell'agro di Valenzano (BA), è operativo un impianto sperimentale di poligenerazione integrata da fonti rinnovabili, composto da una pompa di calore aria-acqua, un impianto solar cooling, un campo fotovoltaico, una pompa di calore geotermica (sonde verticali a 120 m di profondità) e una caldaia a biomassa, collegati a una rete di distribuzione termica, accumulo e sistema di supervisione. L'attività ha previsto nel primo semestre test sulla risposta della pompa di calore all'inseguimento di un profilo di carico con ΔT minimi di 1°C. Nel secondo semestre è stato riconfigurato il circuito ausiliario con serbatoio da 500 L, circolatore "P6" e flussimetro. Nel terzo semestre è stato aggiornato il software di controllo, con 9 sonde PT100 e gestione valvole. Nel quarto semestre implementato simulatore di carico e regolazione modulante del circolatore "P6". Nel quinto e sesto semestre, in condizioni estive e invernali, si è ottenuto con successo l'inseguimento del profilo termico e un bilanciamento coerente della richiesta mediante le fonti rinnovabili.

7 Dettaglio delle attività svolte

Il sistema di poligenerazione presso il Centro Didattico-Sperimentale 'P. Martucci' a Valenzano (BA) integra diverse fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica e termica. Composto da un campo fotovoltaico, una pompa di calore geotermica, una caldaia a biomassa, un impianto di solar heating and cooling e sistemi di accumulo, è suddiviso in cinque aree: Fotovoltaica (produzione di energia elettrica), Solar Cooling (raffrescamento termico), Caldaia a Biomassa e Pompa di Calore Geotermica, Interno alla Serra (simulazione di un ambiente agricolo) e Simulatore del Carico. Quest'ultima, inizialmente configurata con una pompa di calore aria acqua collegata a un serbatoio ausiliario e gestita dal circolatore P5, ha mostrato un bilanciamento non ottimale tra la portata del sistema Aermec e l'accumulo delle fonti rinnovabili, fornendo la base per miglioramenti successivi volti a ottimizzare l'efficienza e il bilanciamento termico complessivo. Questo ha permesso di studiare e valutare in condizioni reali di funzionamento l'autoconsumo locale e la gestione della domanda energetica associata all'applicazione di un sistema di poligenerazione ad un caso studio costituito da una Cantina Vinicola.

7.1 Composizione dell'impianto e Area di Applicazione

L'impianto è suddiviso in 5 principali aree energetiche:

- Area Fotovoltaica: Potenza di picco: 7,38 kWel (collegato alla rete), composta da due sottosistemi: 5,76 kWel (monitorato e misurato dal sistema di controllo) e 1,62 kWel
- Area Solar Cooling: Campo solare: 15 pannelli (collettori solari) con un totale di 75 l/min per m², ciascun pannello contiene 20 tubi sottovuoto ed una macchina ad Assorbimento Yazaki WFC SC-5: che utilizza una soluzione di H₂O e BrLi come fluido di lavoro (acqua come refrigerante e bromuro di litio come assorbente), con una potenza frigorifera di 17,6 kW.
- Area Caldaia a Biomassa e Pompa di Calore Geotermica: Pompa di calore geotermica Fiorini mod. GEO HFE: Potenza termica da 10,2 kW (T acqua calda: 40-45°C) e una Potenza frigorifera: 16,6 kW (T acqua fredda: 10°C); Generatore di calore a biomassa legnose che utilizza pellet e biomasse agroindustriali residuali (nocciolino di sansa, di frutta, ecc.) con Potenza nominale da 30 kW (T acqua calda fino a 95°C)
- Area Interno alla Serra: progettata per simulare e monitorare l'utilizzo di energia termica in ambienti protetti, come una serra agricola, al fine di studiare l'interazione tra i sistemi di riscaldamento e raffrescamento.
- Area Simulatore del Carico: una pompa di calore Aermec ANLI101XL da 31 kW collegata direttamente a un serbatoio ausiliario da 1000 litri al quale è connessa anche la sezione di generazione termica (lato fonti rinnovabili). Figura 7

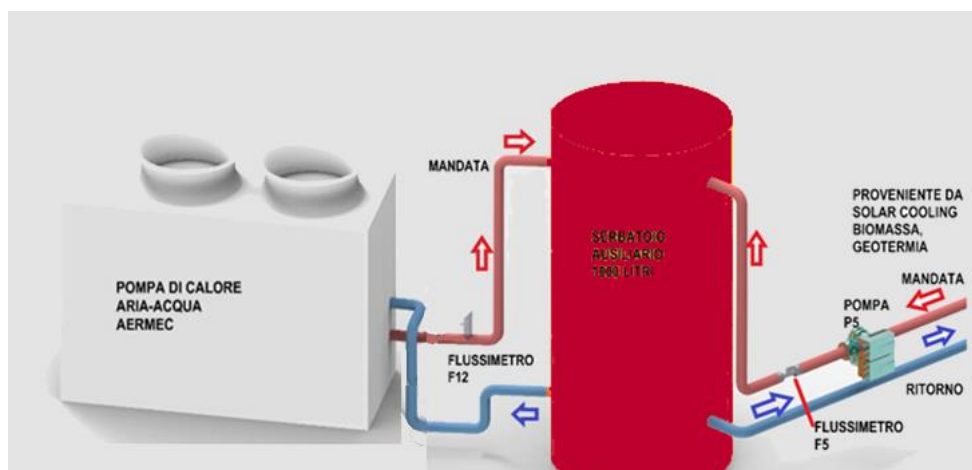


Figura 7 -Particolare del collegamento idraulico tra la pompa di calore aria-acqua e il serbatoio ausiliario collegato alla pompa di circolazione denominata "P5" - (configurazione impianto triennio precedente)

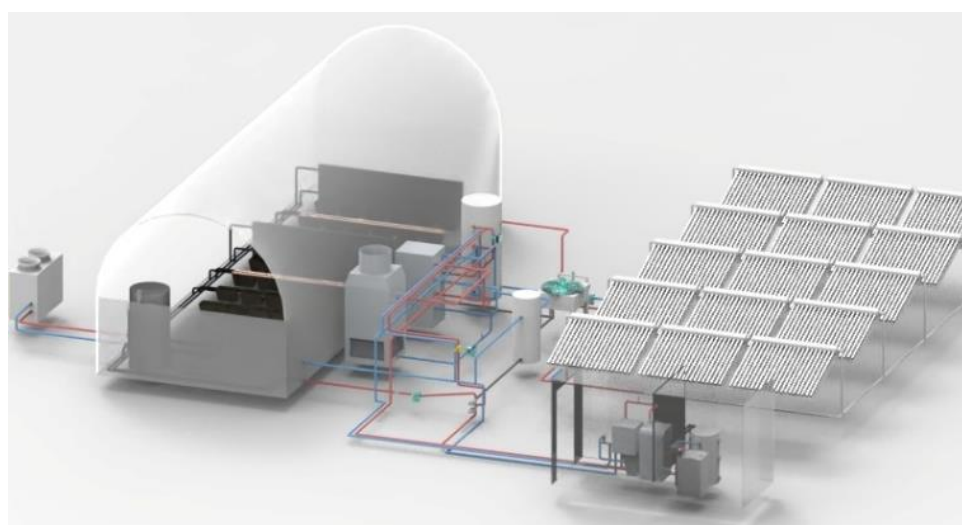


Figura 8 - Impianto Poligenerazione configurazione precedente al triennio 22-24

Dalle prove sperimentali condotte nella presente linea d'attività è emerso che la configurazione pompa di calore-serbatoio ausiliario non è sufficiente a garantire una riproduzione fedele del profilo di carico termico simulato. In particolare, il bilanciamento tra la pompa di calore aria acqua e il serbatoio ausiliario risulta inadeguato, poiché la portata della pompa di calore non veniva efficacemente bilanciata dal circuito generazione termica (lato fonti rinnovabili).

Per questo motivo, come descritto di seguito, si è resa necessaria una modifica e integrazione del circuito esistente, attraverso l'introduzione di nuovi componenti al fine di controllare il carico termico simulato.

Relativamente alla parte software, come descritto nei paragrafi successivi, è stato ottimizzato il sistema di monitoraggio e controllo sia del lato generazione (fonti rinnovabili) sia del lato emulazione del carico termico (pompa di calore aria-acqua) gestendo in modo più efficace la produzione dalle macchine e gli accumuli ad essi collegati. Ciò ha permesso di raggiungere lo

scopo di ridurre al minimo il prelievo di potenza dalla rete nelle fasce orarie critiche e nelle ore in cui il sistema di poligenerazione è in grado di fornire energia.

7.2 Installazione di nuovi componenti idraulici nell'impianto di Poligenerazione

L'installazione di nuovi componenti nell'impianto di poligenerazione si è resa necessaria per riprodurre in scala reale i profili di carico termico estivo e invernale del caso studio (cantina vitivinicola). È stato sviluppato un sistema capace di modulare e verificare con precisione un profilo istantaneo di carico termico, utile per studiare l'applicazione del sistema a diverse tipologie di utenze. Come mostrato in Figura 9, sono stati aggiunti un serbatoio da 500 l e un nuovo circolatore P6 (pompa Wilo Strato-MAXO D 40/0,5-16), consentendo di scollegare il funzionamento della pompa di calore dal profilo termico generato. Questo ha permesso alla macchina di operare secondo gli standard di fabbrica, senza alterare sicurezza, sequenza operativa o comunicazione con altri dispositivi. Il nuovo circolatore P6 convoglia nel serbatoio ausiliario il fluido termico proveniente dal serbatoio da 500 l (Sorgente), seguendo una portata predefinita per simulare il carico del caso studio (Figura 9, Figura 10).

Con questa configurazione (Figura 11), il sistema risulta ora adattabile a qualsiasi utenza con profilo di carico noto, rendendo il simulatore uno strumento flessibile per testare e ottimizzare strategie di autoproduzione e autoconsumo da fonti rinnovabili.

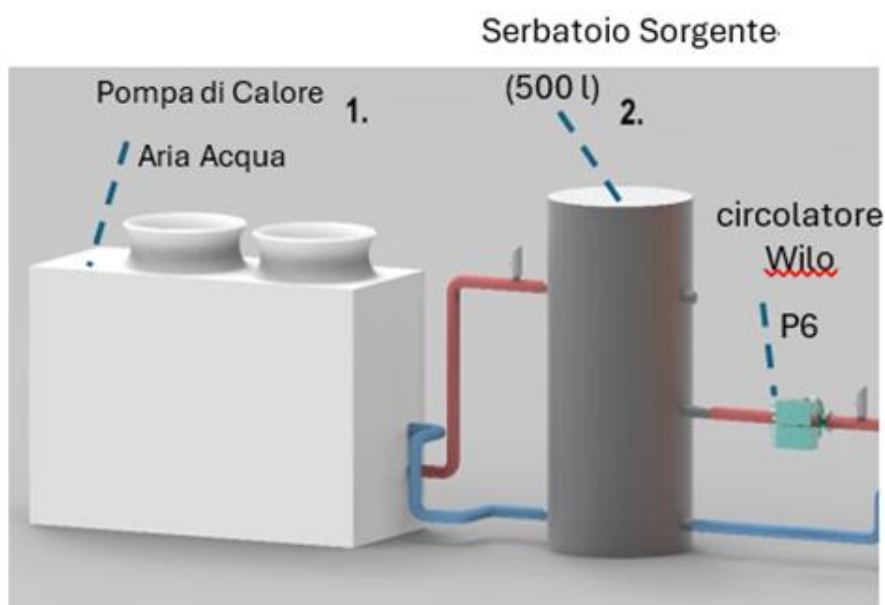


Figura 9 - Schema Area emulazione del carico termico



Figura 10- Installazione nuovo serbatoio inerziale da 500 litri - foto impianto

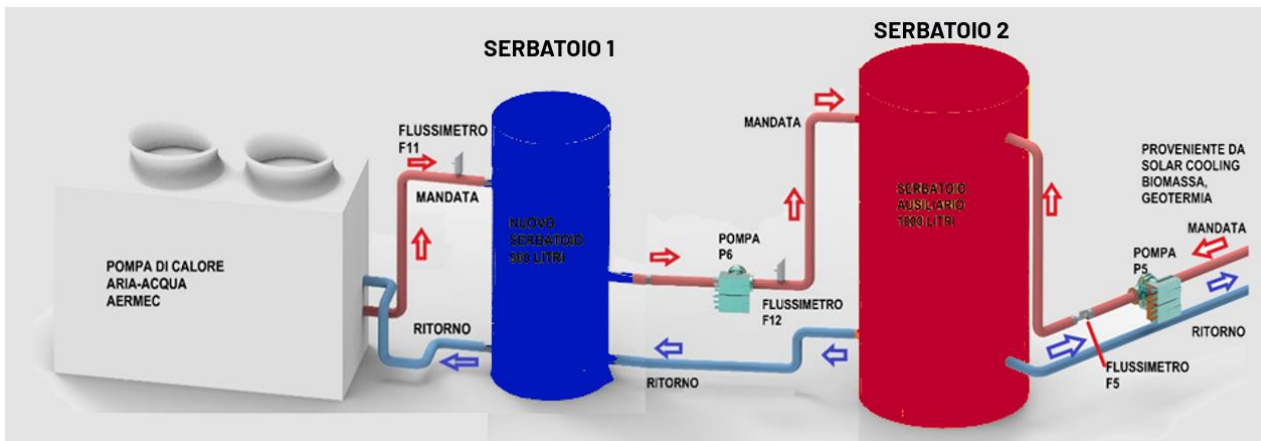


Figura 11-Area Simulazione del carico termico: collegamenti e posizionamento dei circolatori

Per monitorare il profilo di carico con il circolatore modulabile (pompa P6), sono stati installati sensori di temperatura e flusso: due sonde PT100 nel serbatoio da 500 l e un flussimetro AS005 Autosen con interfaccia IO-Link (Figura 12), per rilevare portata e temperatura e calcolare la potenza termica a valle del circolatore P6 (Figura 10 e in Figura 11)



Figura 12 -Posizionamento flussimetro F11

7.3 Ingegnerizzazione e modifica nella parte software

Nella parte software del sistema di controllo dell'impianto di poligenerazione sono state apportate alcune innovazioni in relazione ai nuovi componenti dell'impianto. In particolare, è stata inserita l'interfaccia del monitoraggio e controllo del nuovo circolatore P6 come indicato nelle figure riportate di seguito. (Figura 13, Figura 14)

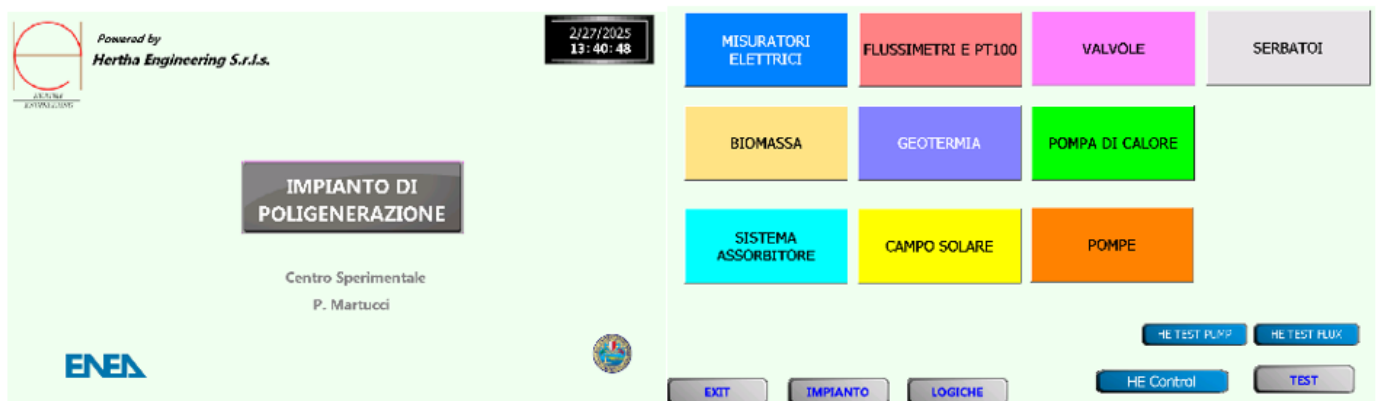


Figura 13- Schermata home e di comando delle diverse aree del software di controllo

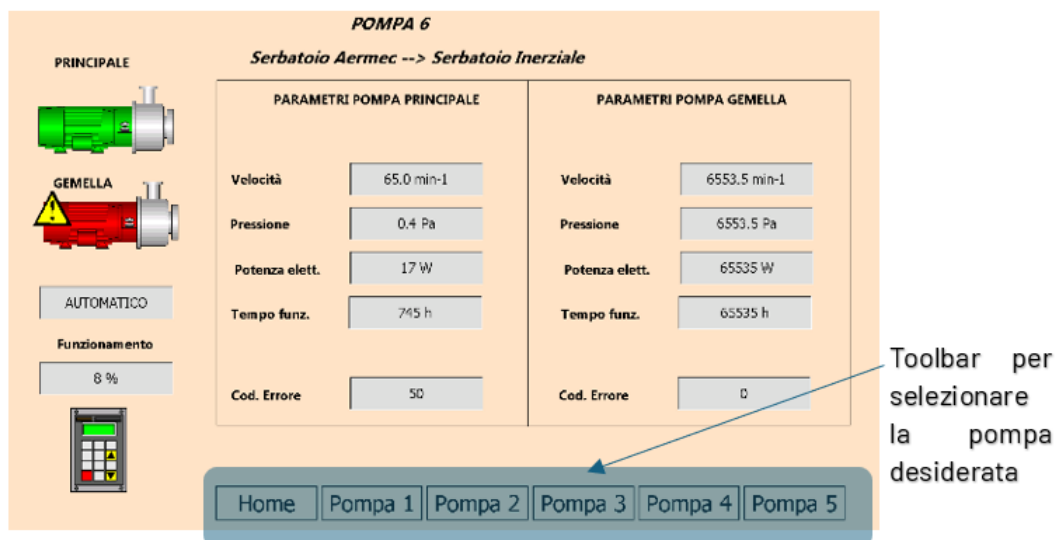


Figura 14-Pagina del software per il controllo della Pompa P6

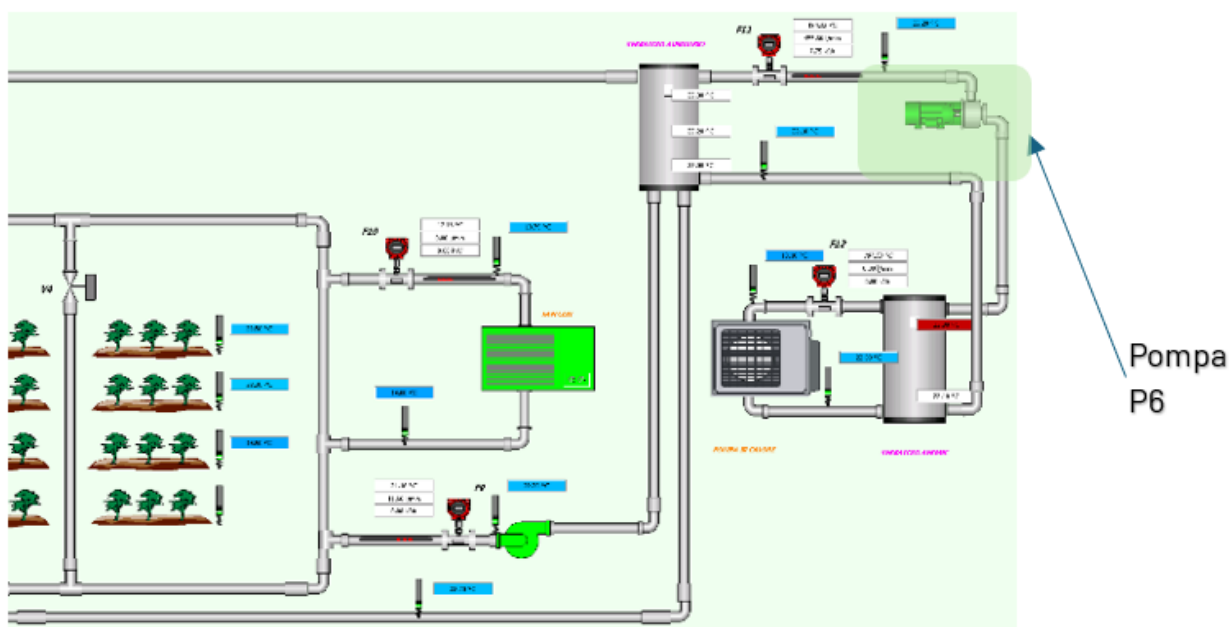


Figura 15- Sinottico impianto poligenerazione: particolare nuovo circolatore "Pompa P6"

Per migliorare il controllo e la gestione del circuito termico di mandata dell'impianto di poligenerazione è stato inserito il nuovo flussimetro F11 e altre 9 sonde termiche PT100 (n. 6 posizionate nell'area solar cooling - interfaccia web Figura 17).

Per gestire in modo ottimizzato la nuova configurazione di sensoristica è stata migliorata l'interfaccia utente, rispetto al precedente triennio, con una toolbar posta nel basso (posizionata come in Figura 14 e Figura 16) che permette di selezionare la pompa o il flussimetro desiderato in modo più veloce.

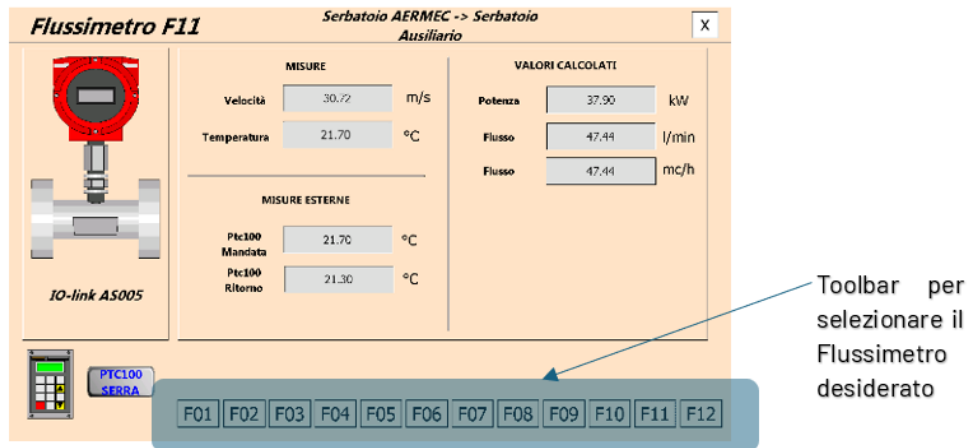


Figura 16 -Pagina del software per il monitoraggio del Flussimetro F11

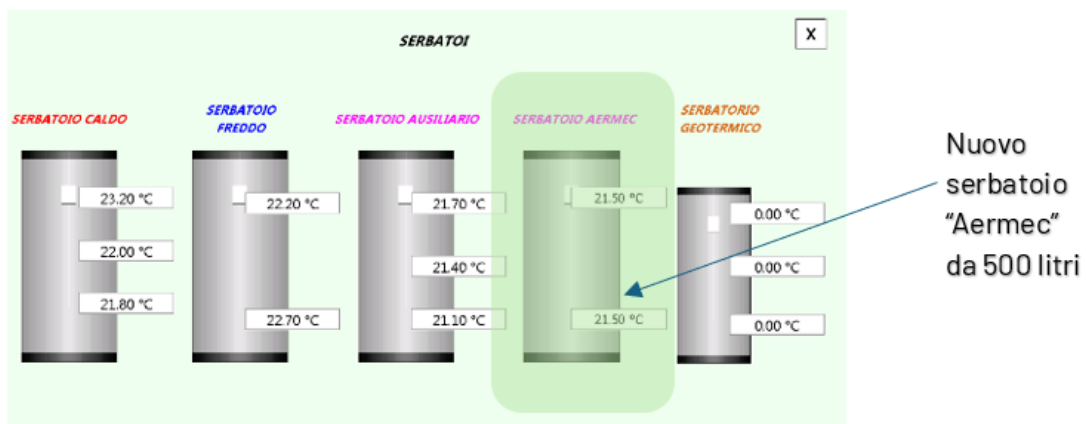


Figura 17 -Pagina del software per il monitoraggio delle temperature dei serbatoi rilevate dalle PT100

7.4 Logica di automazione della sezione "emulatore carico termico"

Per gestire la sezione dedicata all'emulazione dei profili di carico termico, riportata nello schema di dettaglio Figura 18, è stata implementata una specifica logica di automazione nella nuova piattaforma software di controllo. Il nuovo accumulo inerziale da 500 litri, funzionante da "sorgente" di carico termico, viene mantenuto in temperatura di set point (calda o fredda) dalla pompa di calore aria-acqua; gestendo da sinottico la portata del nuovo circolatore P6 si riesce a riprodurre e applicare un profilo di carico all'accumulo ausiliario da 1000 litri come di seguito descritto.

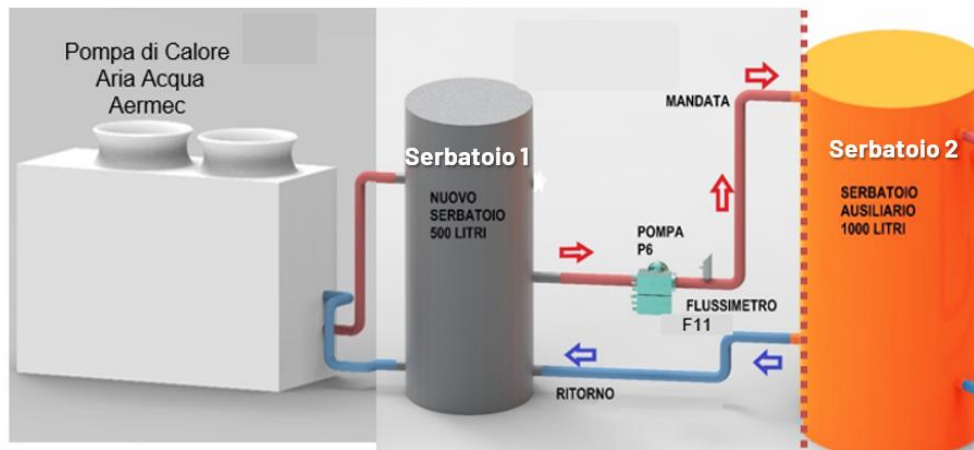


Figura 18- Schema sezione d'impianto "emulazione carico termico"

7.4.1 Emulazione carico Termico estivo ed invernale.

Come mostrato in Figura 19 e nell'interfaccia web di Figura 20, l'acqua calda fornita dal "serbatoio 1" da 500 litri (sorgente carico termico), entra nel serbatoio ausiliario dell'impianto di poligenerazione dal lato sinistro con una portata modulata dal circolatore P6 secondo il profilo di carico da generare. La figura mostra l'emulazione del profilo di carico termico in regime estivo. In modalità invernale, invece, la configurazione sarà inversa: la pompa di calore fornirà acqua fredda, mentre dal lato delle fonti rinnovabili giungerà acqua calda al sistema, simulando così il comportamento stagionale opposto.

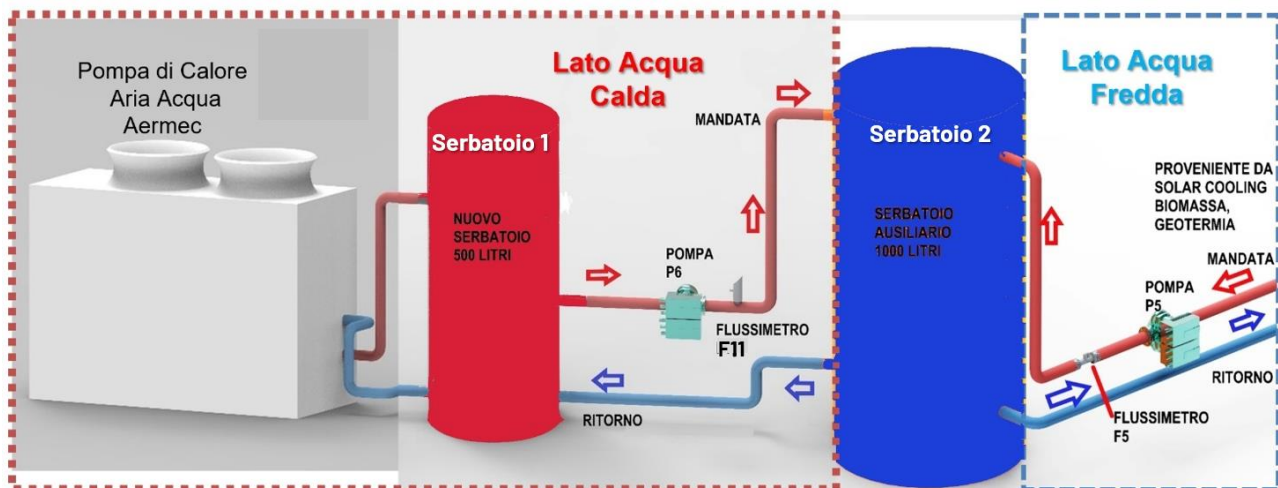


Figura 19-Schema sezione di Emulazione del Carico termico- Ipotesi di funzionamento carico termico estivo

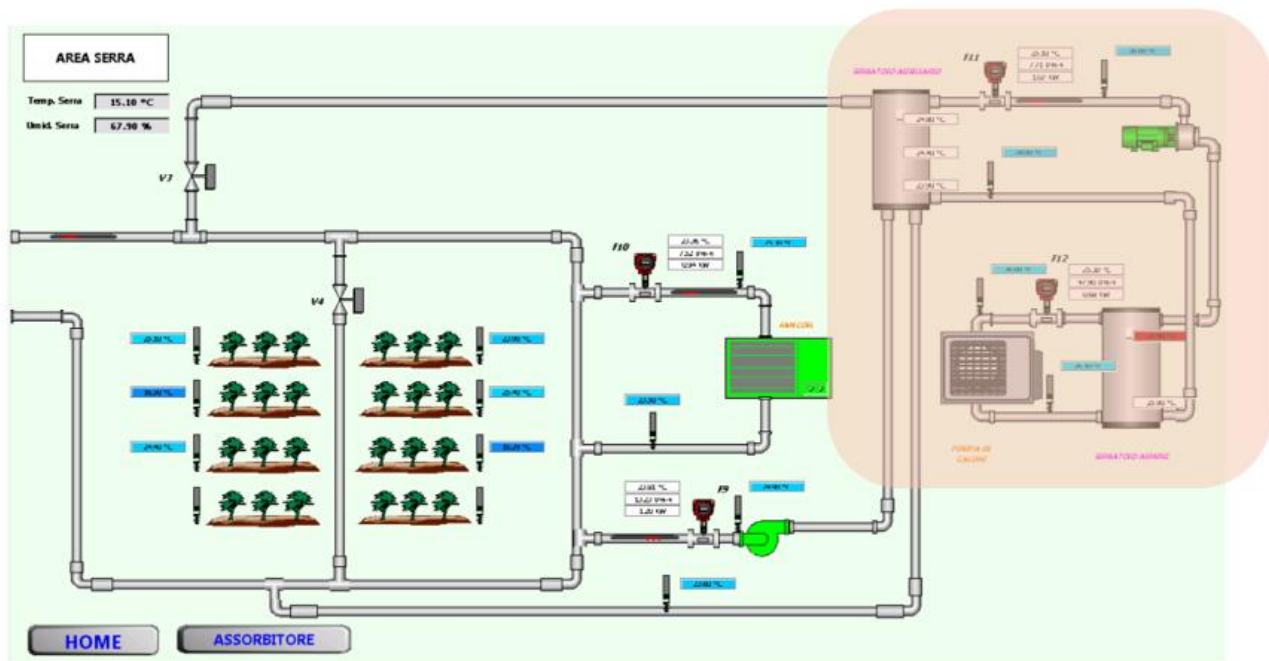


Figura 20-Pagina del software di controllo della sezione emulazione del carico termico

7.4.2 Logica di controllo della pompa P5 – lato sorgente

L'interfaccia software del PLC permette di gestire e controllare le pompe. Il funzionamento della pompa P5 è gestito da un algoritmo di controllo che regola in modo dinamico l'accensione, lo spegnimento e la modulazione della velocità del circolatore, sulla base di parametri termici misurati in tempo reale. Nello specifico, il sistema utilizza sonde di temperatura PT100 e il flussimetro "F5" installato sulla mandata in prossimità della pompa P5 per monitorare costantemente la temperatura del fluido termovettore e la portata circolante.

Nel caso del circolatore "P5", l'algoritmo impone una soglia superiore e una soglia inferiore di temperatura come limiti di riferimento (Figura 21). Quando la temperatura dell'acqua nel circuito raggiunge o supera la soglia superiore prestabilita, il circolatore P5 viene attivato automaticamente, consentendo il trasferimento dell'energia termica accumulata verso il serbatoio ausiliario o l'utenza. Al contrario, quando la temperatura scende al di sotto della soglia inferiore, il circolatore viene disattivato, interrompendo il flusso evitando inutili dispersioni energetiche e consentendo ai serbatoi di raggiungere la temperatura prestabilita.

Questa logica di controllo consente di adattare in modo reattivo e intelligente il funzionamento del sistema alle condizioni operative, garantendo una gestione efficace dell'energia termica disponibile dalle fonti rinnovabili e un corretto bilanciamento con i carichi termici emulati.

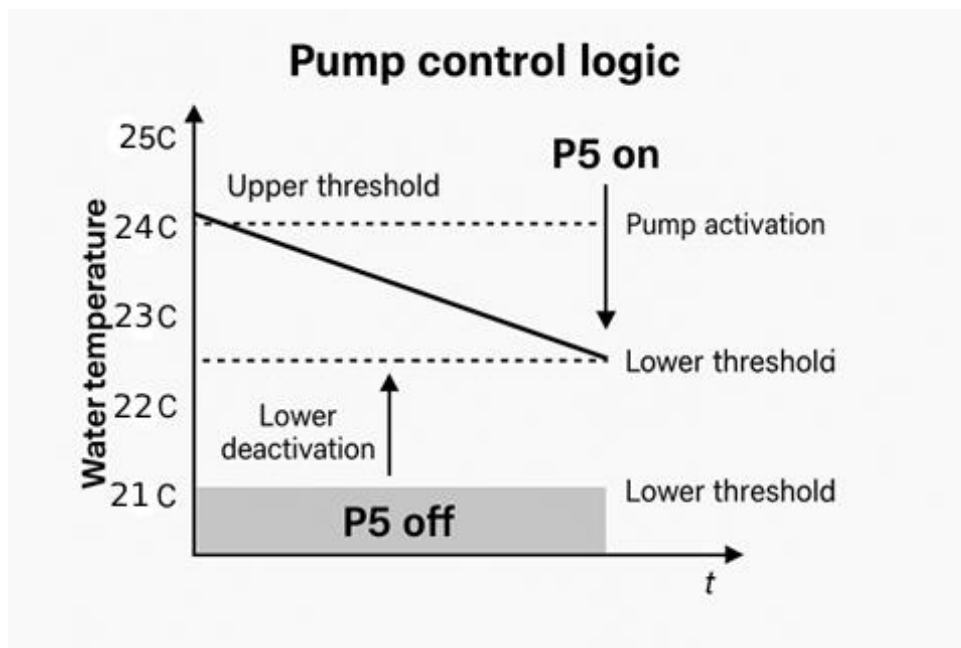


Figura 21 -Pompa P5 : Attivazione disattivazione soglia sup/inf

Nel caso della simulazione di un carico termico estivo, sulla base delle prove sperimentali effettuate, è stato stabilito che il software di controllo gestisce l'attivazione e la disattivazione del circolatore P5 (relativo al lato di produzione da fonte rinnovabile) secondo una logica a soglia, rappresentata in Figura 21. In particolare, come da interfaccia di Figura 22, il circolatore P5 viene attivato quando la temperatura dell'acqua nel serbatoio ausiliario supera un valore soglia superiore, opportunamente definito in funzione del profilo di carico simulato. Il circolatore resta in funzione fino al raggiungimento di una soglia inferiore, al di sotto della quale viene disattivato. Tale controllo si basa sulla lettura della temperatura mediante sensori PT100 e sulla portata rilevata dai flussimetri, consentendo al sistema di modulare in modo efficiente il contributo delle fonti rinnovabili, ottimizzando l'equilibrio tra generazione e richiesta termica. Nel caso di una prova invernale, la logica di attivazione del circolatore P5 è inversa rispetto a quella estiva, poiché il sistema deve fornire calore anziché sottrarlo. In questa configurazione, il software di controllo attiva il circolatore P5 quando la temperatura del serbatoio ausiliario scende al di sotto di una soglia inferiore predefinita, segnalando la necessità di integrare energia termica per soddisfare il carico simulato. Il circolatore P5 viene poi disattivato quando la temperatura del serbatoio risale oltre una soglia superiore, a indicare che il contributo energetico è stato sufficiente. Attraverso questa logica, il circolatore P5 compensa in modo dinamico il fabbisogno energetico indotto dal circolatore P6, che riproduce il profilo di carico termico, garantendo così una rappresentazione fedele della dinamica termica reale.

PANNELLO OPERATORE - LOGICHE 3

Attivazione Logica



Figura 22: Pagina del software" Logica per l'Attivazione pompa P5

7.4.3 Attivazione della logica del circolatore P6 per emulare il carico termico

7.4.3.1 Correlazione tra percentuale di velocità del circolatore P6 e potenza termica

Per caratterizzare il comportamento del circolatore P6 (installato come indicato nello schema di Figura 26), è stato stabilito un ΔT costante di 4°C (con temperatura di mandata pari a 25°C e di ritorno pari a 21°C), al quale corrisponde una potenza termica nominale di circa 6585 W, come rilevata dal flussimetro F11 (Figura 23) e come riportato in Tabella 1:

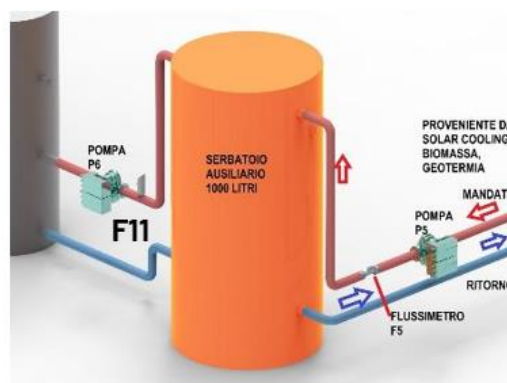


Figura 23 -Parte dell'impianto relativa alla Logica del circolatore P6

T superiore	25° C	Input
T inferiore	21° C	Input
Δ T	4° C	
Q (l/min)	23,63	Input
Power (w)	6585	

Tabella 1 - Parametri di partenza per caratterizzare il circolatore P6

Durante una serie di 13 prove sperimentali (Tabella 2), sono state variate le percentuali di velocità operative del circolatore P6. È emerso che, al di sotto del 16% della velocità nominale, il flussimetro non garantiva misurazioni attendibili, mentre il limite superiore operativo si è fissato al 40% - corrispondente a una portata di 23,63 l/min, in linea con quella massima del circolatore P5.

Prove sperimentali di variazione della % della velocità del circolatore P6 (valori letti sul flussimetro F11 e sulla pompa P6)					
n° prove	% Velocità Pompa P6	Flusso (l/min)	giri (min- 1)	Pressione (Pa)	Power (W)
1	16	10.12	65	0.5	2820
2	18	11.09	69.3	0.5	3090
3	20	12.05	77	0,6	3358
4	22	13	88.6	0.8	3623
5	24	14.4	92.3	0.9	4013
6	26	15.43	100	1.1	4300
7	28	16.39	107.7	1,3	4567
8	30	17.36	115.3	1,5	4838
9	32	18.32	123	1,7	5105
10	34	19.29	130.7	1.9	5375
11	36	21.22	138.4	2.1	5913
12	38	22.18	146.1	2.3	6181
13	40	23.63	153.8	2.6	6585

Tabella 2 - Prove sperimentali di variazione di velocità del circolatore P6 correlazione con la potenza termica scambiata con il Serbatoio 2

Considerando la tabella con dati relativi al circolatore (P6) con le diverse percentuali di velocità e i parametri correlati come il flusso (l/min), giri (min⁻¹), pressione (Pa), e potenza (W), si è cercata una legge matematica che descrivesse la correlazione tra la velocità della pompa e la potenza termica erogata permettendo di prevedere in modo accurato la produzione termica in funzione della regolazione della velocità. Da un'analisi delle correlazioni quella che meglio li approssima, ad esempio, potenza termica applicata all'accumulo ausiliario in funzione della velocità della pompa, del flusso o della pressione è la seguente:

$$P(W)=154.51 \cdot V(\%)+271.15$$

dove:

$P(W)$ è la potenza termica in watt,

$V(\%)$ è la velocità della pompa espressa in percentuale.

Si riporta in Figura 24 la correlazione tra velocità della Pompa P6 e il carico termico erogato; il coefficiente di determinazione R^2 è 0.996, che mostra la forte correlazione lineare tra i due parametri.

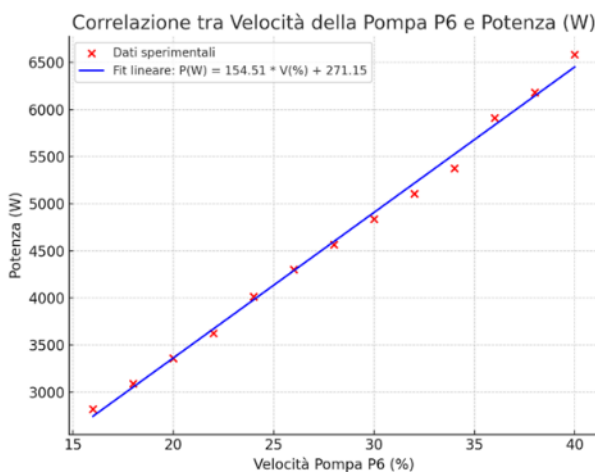


Figura 24: Correlazione velocità e carico termico erogato

7.4.4 Logica di controllo del circolatore P6

Il sistema di controllo integra un algoritmo che modula dinamicamente la velocità del circolatore P6, facendo uso di un file txt (tipicamente in formato Excel) contenente il profilo di carico target. In tale file, per ciascun intervallo temporale (ad esempio, a cadenza oraria) viene specificato il valore di potenza termica desiderata. In tempo reale, il software confronta questo valore con la potenza effettivamente misurata dal flussimetro associato al circolatore P5, (lato fonti rinnovabili). Se la potenza termica rilevata si discosta dalle soglie predefinite (cioè, se supera il limite superiore o scende sotto il limite inferiore), il sistema regola la velocità del circolatore P6 incrementandola o decrementandola di 1% per ciascun step. In questo modo, la velocità del circolatore P6 viene modulata in maniera incrementale, garantendo che il flusso termico erogato risponda fedelmente al profilo di carico simulato e ottimizzando il bilanciamento energetico dell'impianto.

Questi due aspetti – la definizione della correlazione e la logica di controllo – permettono una gestione estremamente precisa e adattativa della produzione termica, assicurando un'elevata fedeltà nella emulazione del carico termico in ambienti integrati da fonti rinnovabili.

Assumendo tale correlazione tra i dati corrispondenti alla percentuale della velocità del circolatore P6 e del carico termico (W) si ottiene la seguente Tabella 3:

% Velocità Pompa P6	Power (W)	% Velocità Pompa P6	Power (W)	% Velocità Pompa P6	Power (W)	% Velocità Pompa P6	Power (W)	% Velocità Pompa P6	Power (W)	% Velocità Pompa P6	Power (W)
1	426	18	3050	35	5680	52	8306	69	10933	86	13559
2	580	19	3210	36	5835	53	8460	70	11087	87	13714
3	735	20	3360	37	5990	54	8615	71	11242	88	13868
4	890	21	3516	38	6143	55	8770	72	11396	89	14023
5	1044	22	3670	39	6297	56	8925	73	11550	90	14177
6	1198	23	3825	40	6452	57	9078	74	11705	91	14332
7	1352	24	3980	41	6606	58	9233	75	11860	92	14486
8	1507	25	4135	42	6760	59	9387	76	12015	93	14640
9	1662	26	4290	43	6915	60	9542	77	12169	94	14795
10	1816	27	4445	44	7070	61	9696	78	12323	95	14950
11	1970	28	4600	45	7224	62	9850	79	12478	96	15104
12	2125	29	4752	46	7379	63	10005	80	12632	97	15260
13	2280	30	4907	47	7533	64	10160	81	12787	98	15413
14	2435	31	5060	48	7688	65	10315	82	12941	99	15668
15	2590	32	5215	49	7842	66	10470	83	13095	100	15722
16	2745	33	5370	50	8000	67	10624	84	13250		
17	2900	34	5525	51	8151	68	10780	85	13405		

Tabella 3 Correlazione percentuale (%) della velocità del circolatore P6 e carico termico (Power)

Dopo una fase di validazione sperimentale, è stata implementata nella relativa interfaccia operatore del software di controllo la logica gestione del circolatore P6 come riportato in Figura 256.



Figura 256–Pagina del software“ Logica per l’attivazione del circolatore P6”: sezione emulazione carico termico

7.5 Applicazione del profilo di carico termico estivo di un caso studio: Cantina vinicola

A partire dai dati della simulazione oraria degli ambienti di lavorazione e stoccaggio di una cantina si sono ottenute le curve di carico termico riferite a delle giornate tipo applicate tramite all'impianto di poligenerazione tramite il sistema pompa di calore aria acqua - accumulo. L'edificio simulato si articola in tre diverse aree: commerciale, produttiva e stagionatura. Il profilo di carico termico riprodotto dal sistema sperimentale è stato ottenuto dalla simulazione dei locali, in inverno ed estate, eseguita in regime orario dinamico, secondo la norma UNI EN ISO 52016.

Dalla Figura 26 è possibile osservare la configurazione dello schema dell'impianto di poligenerazione utilizzato durante la prova estiva. In questo scenario, il sistema ha impiegato il solar cooling e la pompa di calore geotermica per la produzione di acqua fredda, mentre la pompa di calore aria-acqua ha emulato il carico termico estivo mediante l'erogazione di acqua calda. Tale configurazione ha consentito di verificare non solo l'efficacia del bilanciamento tra le fonti rinnovabili e il carico termico richiesto, ma anche la capacità delle stesse fonti rinnovabili di coprire integralmente il profilo di carico imposto dalla pompa di calore aria-acqua. Questo risultato ha evidenziato l'elevata efficienza del sistema in condizioni estive, dimostrando la piena affidabilità e sostenibilità dell'utilizzo integrato delle fonti rinnovabili nella gestione termica stagionale.

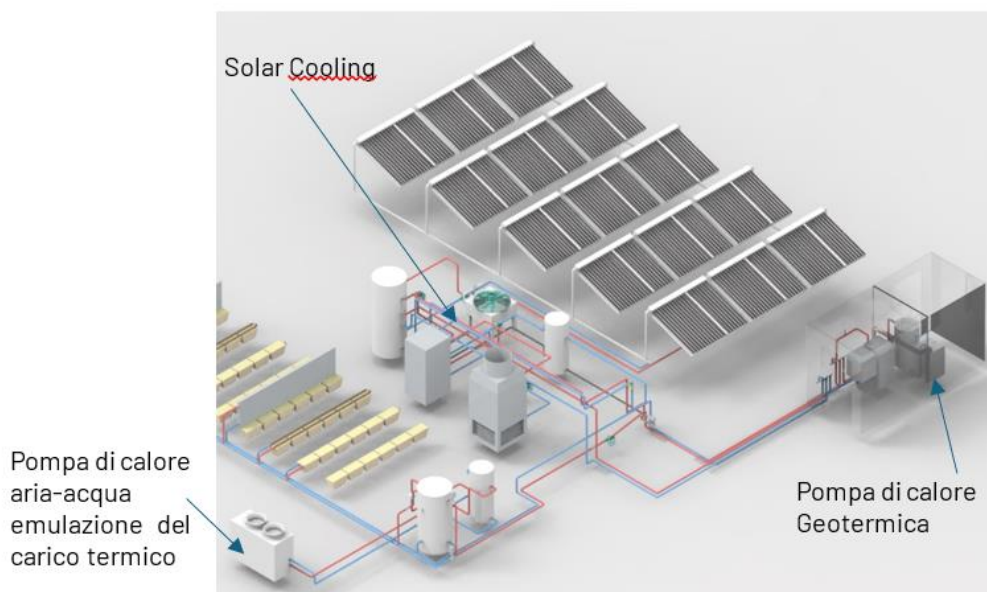


Figura 26 -Configurazione estiva del sistema di poligenerazione

La Figura 27 mostra la configurazione adottata per la prova invernale. L'impianto di poligenerazione ha integrato il campo solare, la caldaia a biomassa e la pompa di calore geotermica, i quali hanno operato in sinergia per la produzione di acqua calda destinata alla copertura del fabbisogno termico invernale. La pompa di calore aria-acqua è stata invece

impiegata in modalità inversa per generare acqua fredda, simulando un profilo termico invernale negativo, rappresentativo del carico da compensare.

Tale configurazione è per rispondere a un profilo di carico termico variabile su base oraria, in funzione della domanda emulata e della disponibilità delle fonti rinnovabili. Questo assetto ha permesso di verificare l'efficienza e la flessibilità del sistema nell'adattarsi alle condizioni reali di esercizio, assicurando la completa copertura del carico termico richiesto. I risultati hanno dimostrato un'elevata efficacia nella gestione integrata delle fonti, rafforzando l'affidabilità del sistema in chiave di autosufficienza e ottimizzazione delle risorse rinnovabili in contesti dinamici.

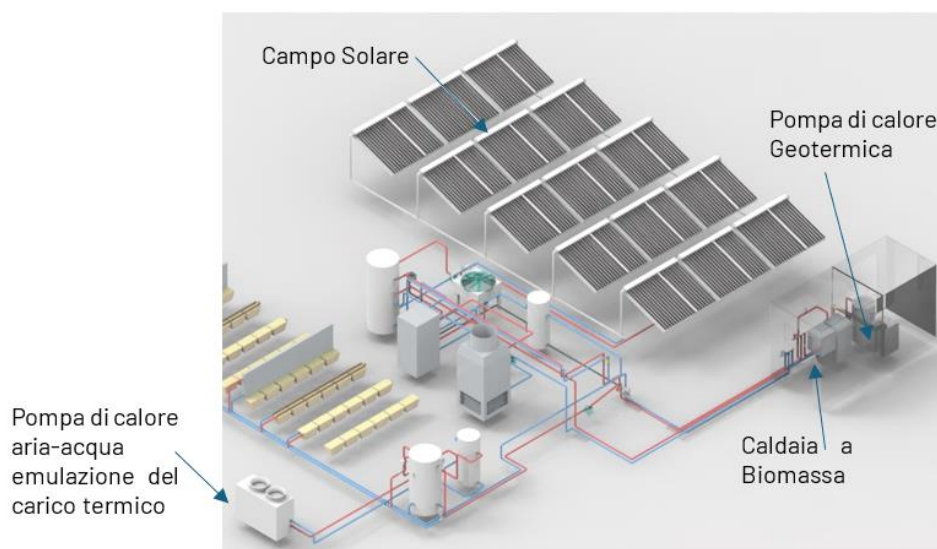


Figura 27-Configurazione invernale del sistema di poligenerazione

7.5.1 Prova sperimentale di inseguimento del profilo giornaliero di carico termico estivo di un giorno tipo del mese di settembre - caso studio cantina

7.5.1.1 Profilo di carico termico frigorifero tipo

Il carico frigorifero orario (Figura 28) è stato simulato per i locali di una cantina in un giorno tipo di settembre.



Figura 28-Andamento Potenza frigorifera richiesta in 24 ore dai locali della Cantina Vitivinicola simulata

La potenza frigorifera richiesta ha un andamento caratterizzato da:

- Basso carico costante notturno (1:00 - 11:00) di circa -3,05 kW, che indica una domanda minima continua, legata a processi di mantenimento della temperatura nei locali e nei serbatoi.
- Picco di domanda nelle ore centrali della giornata (12:00 - 16:00), con un massimo di -19,2 kW alle 14:00. Questo suggerisce un'elevata necessità di refrigerazione per la presenza di uffici e della lavorazione vinicola e mantenimento di condizioni termiche ottimali in ambienti produttivi.
- Decrescita graduale nel pomeriggio e in serata, con un rientro ai livelli notturni a partire dalle 22:00.

7.5.1.2 Prova sperimentale con il sistema di poligenerazione in condizioni estive

Come riportato dal grafico di Figura 29, il sistema di controllo riesce a modulare la pompa P6 per inseguire con precisione il profilo di carico termico del caso studio. In particolare la pompa P6, modulata come riportata in Tabella 4, varia il carico termico applicato al serbatoio ausiliario da 1000 litri, mentre la pompa di calore aria/acqua (utilizzata come generatore di carico) mantiene in temperatura l'accumulo inerziale da 500 litri.

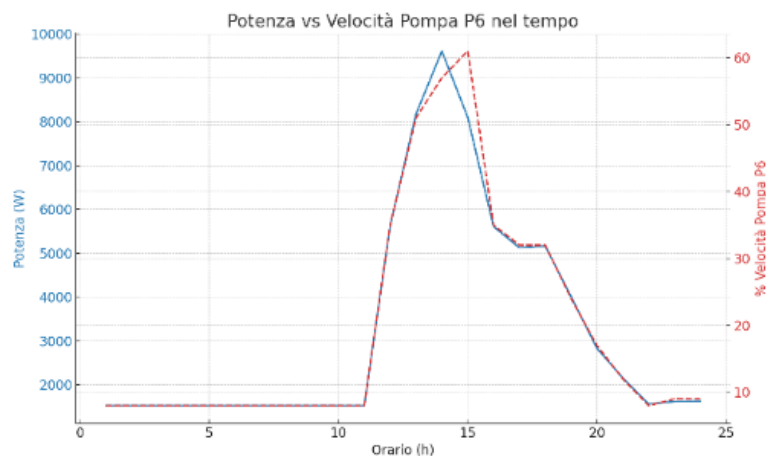


Figura 29 -Andamento del profilo di carico Termico Simulato

Tabella 4 -Profilo di Carico Termico Simulato: correlazione tra % Velocità Pompa P6 Carico termico nelle 24 ore

ora	Power (W)	% Velocità Pompa P6
1	1525	8
2	1525	8
3	1525	8
4	1525	8
5	1525	8
6	1525	8
7	1525	8
8	1525	8
9	1525	8
10	1525	8
11	1525	8
12	5619	35
13	8170	51
14	9608	57
15	8100	61
16	5608	35
17	5122	32
18	5163	32
19	4008	24
20	2831	17
21	2157	12
22	1561	8
23	1620	9
24	1627	9

Il grafico in Figura 30 mostra come il sistema, grazie all'interazione tra serbatoio da 500 l e pompa di calore aria-acqua, segua efficacemente il profilo di carico termico emulato, modulato dal circolatore P6 (dal file della logica sul software). La linea gialla indica la potenza termica effettiva erogata, confermando la capacità del sistema di riprodurre e di inseguire in modo dinamico il fabbisogno termico orario.

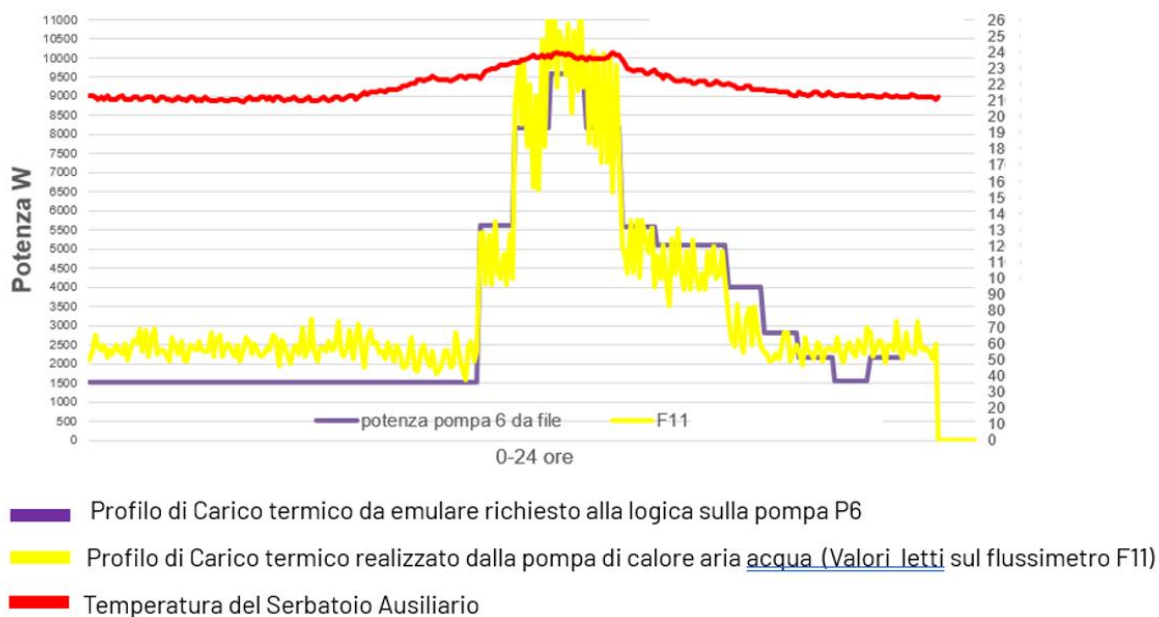


Figura 30 -Inseguimento emulazione del Carico e risposta lato energia fonti rinnovabili

Il serbatoio 1 da 500 litri (Figura 19) agisce come sorgente termica stabilizzante, assicurando al circolatore P6 l'energia necessaria per modulare con precisione portata e potenza. I valori

rilevati risultano coerenti con i target, in linea con la sensibilità del flussimetro, confermando l'efficacia del controllo adottato.

La Figura 31 evidenzia il comportamento dinamico del sistema di poligenerazione (solar cooling e pompa di calore geotermica) durante il test estivo. In fase iniziale, con richieste di circa 1,5 kW, la curva verde segue bene i gradoni di carico emulato (curva viola) grazie alla logica di regolazione. Le due curve Figura 31 si sovrappongono quasi del tutto nella parte centrale e finale, indicando un'elevata efficacia dell'inseguimento."

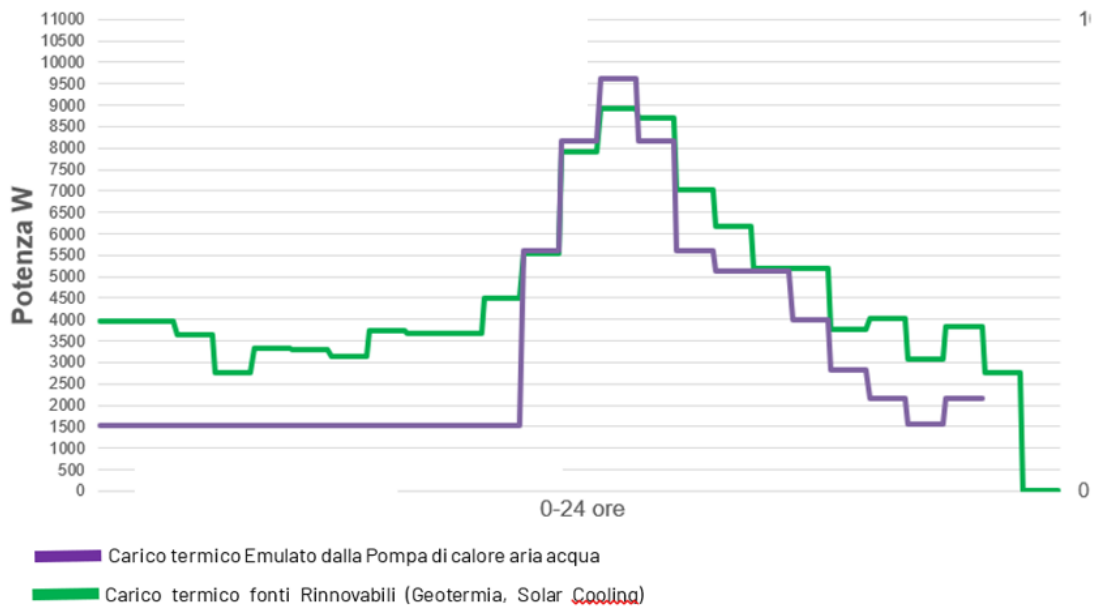


Figura 31: Carico termico del caso studio emulato – potenza generata dal sistema di poligenerazione

L'analisi termodinamica della pompa di calore geotermica mostra che, con mandata a 18 °C per ottimizzare l'EER (Tabella 5), il funzionamento in raffreddamento risulta stabile e in linea con gli obiettivi. In Figura 30 si nota come la temperatura del serbatoio ausiliario (linea rossa) resti costante, rispettando il ΔT e garantendo continuità prestazionale.

Il sistema rinnovabile compensa interamente il carico termico della pompa di calore, garantendo un bilanciamento energetico dinamico stabile ed efficiente. La configurazione adottata massimizza l'autoconsumo, riduce i consumi da rete e genera vantaggi economici, ottimizzando l'integrazione delle tecnologie nel sistema di climatizzazione.

Tabella 5: Valori di fabbrica prestazionali della pompa di calore geotermica

Funzionamento estivo B30/W18					
Potenza frigorifera	kW	9,5	12,5	16,6	20,9
potenza assorbita compressore	kW	1,3	1,5	2,1	2,8
EER		7,39	8,19	7,84	7,44

7.5.2 Prova sperimentale di inseguimento del profilo di carico termico invernale del caso studio relativo ad un giorno invernale (03 gennaio)

In Figura 32 il profilo di carico orario della cantina simulata in un giorno tipo invernale (03 gennaio).

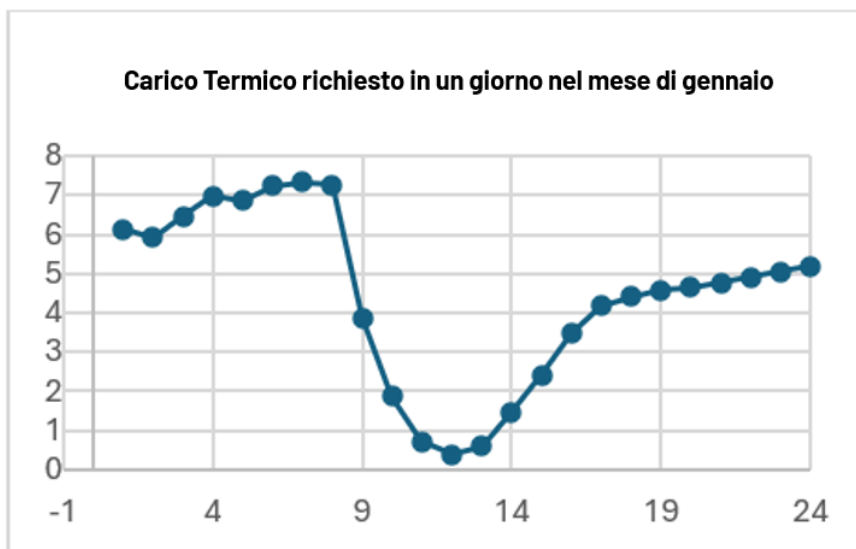


Figura 32 -Andamento Potenza termica Richiesta in 24 ore di un giorno invernale (gennaio)

La richiesta termica (Figura 32) evidenzia:

- Domanda costante notturna (1:00–5:00) con picco di 22,02 kW alle 07:00, legato alle esigenze della lavorazione vinicola.
- Carico minimo stabile (2,4 kW) tra le 9:00 e le 15:00, per mantenimento termico.
- Aumento graduale nel pomeriggio, con ritorno ai livelli notturni.

7.5.2.1 Prova sperimentale con il sistema di poligenerazione in configurazione invernale

Come per la prova estiva, il sistema di poligenerazione ha dimostrato di poter seguire il profilo di carico invernale con un contributo rinnovabile, grazie alla combinazione delle seguenti soluzioni integrate riportate nello schema di Figura 33:

- Campo solare alimentata da collettori solari termici
- caldaia a biomassa.

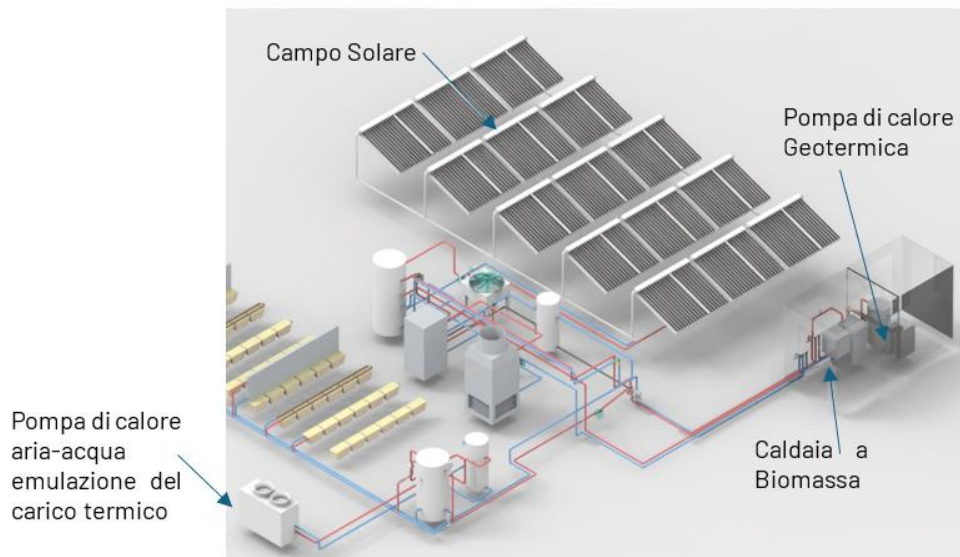


Figura 33 -Configurazione invernale del sistema di poligenerazione

Come per il caso estivo l'emulatore di carico riesce a seguire il nuovo profilo di Figura 32 grazie alla modulazione della pompa di P6 come indicato in Tabella 6 e in Figura 34.

Tabella 6: Profilo di Carico Termico Simulato Invernale: correlazione tra % Velocità Pompa P6 Carico termico nelle 24 ore

ora	Power (W)	Velocità della pompa %P6
1	6,123	38
2	5,912	37
3	6,451	40
4	6,971	43
5	6,862	42
6	7,238	45
7	7,342	46
8	7,256	45
9	3,879	23
10	1,861	10
11	0,705	3
12	0,375	1
13	0,601	2
14	1,473	8
15	2,402	14
16	3,475	20
17	4,170	25
18	4,414	27
19	4,578	28
20	4,640	28
21	4,775	29
22	4,896	30
23	5,050	31
24	5,194	32

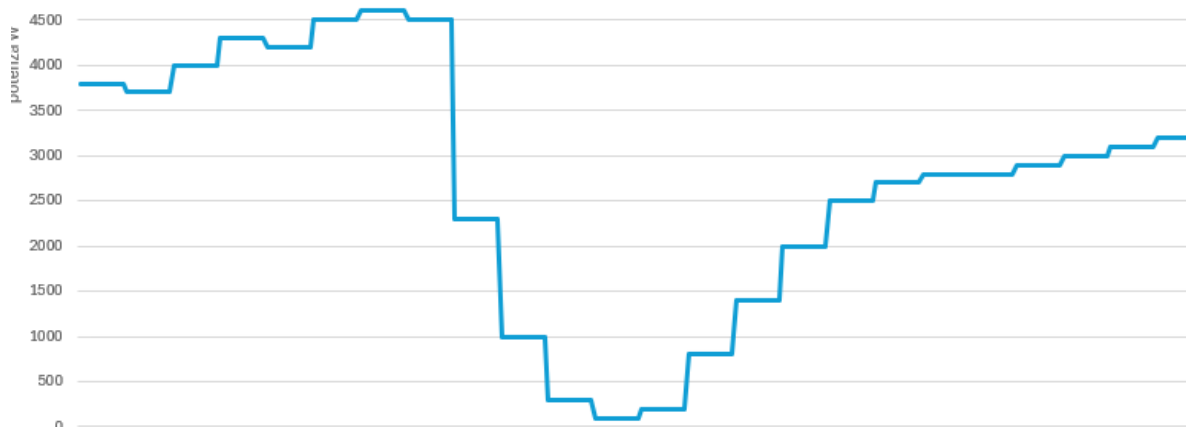


Figura 34 -Andamento del Profilo di Carico Simulato invernale (W) richiesto nelle 24 ore (mese di gennaio)

Il grafico in Figura 355 mostra che la temperatura del serbatoio ausiliario (linea rossa) resta stabile, rispettando il ΔT impostato. Ciò indica un efficace bilanciamento tra produzione termica da fonti rinnovabili (caldaia a biomassa e campo solare) e domanda simulata della pompa di calore, gestita dal circolatore P6. La capacità del sistema di seguire i carichi richiesti, anche con variazioni atmosferiche o accensioni della caldaia, conferma l'affidabilità dell'impianto e della configurazione. Il funzionamento on-off del circolatore P5 (linea gialla) è coerente con i picchi osservati Figura 355.

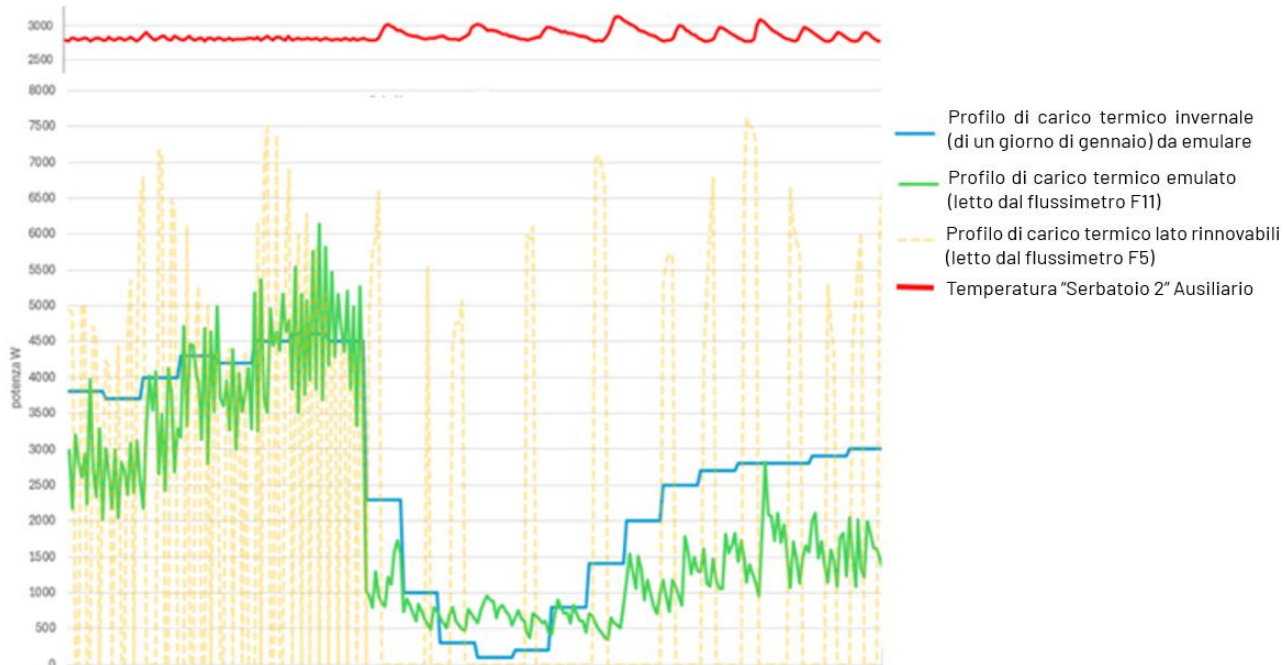


Figura 355 -Inseguimento emulazione del Carico e risposta lato energia fonti rinnovabili

Nonostante il funzionamento discontinuo, la configurazione ha garantito un apporto termico adeguato, mantenendo il serbatoio alle condizioni previste e assicurando il corretto supporto del simulatore. Il sistema ha raggiunto un equilibrio stabile, massimizzando l'autoconsumo rinnovabile e riducendo quasi del tutto l'uso di energia da rete. Ciò conferma l'efficacia della configurazione per l'efficientamento energetico e la gestione ottimizzata delle risorse, con minori consumi e maggiore stabilità nel tempo.

7.6 Valutazione nel lungo periodo delle prestazioni energetiche, economiche ed ambientali di sistemi di poligenerazione al servizio di una utenza (caso studio cantina)

Si riporta in questa sezione una analisi delle prestazioni energetiche, economiche e ambientali del sistema di poligenerazione applicato al caso studio emulato (cantina vitivinicola), con l'obiettivo di verificarne l'efficacia nel coprire i carichi termici, massimizzare l'autoconsumo rinnovabile e ridurre consumi e impatto ambientale.

7.6.1 Valutazione potenziali benefici energetici ed economici estesi al periodo estivo

Estendendo le misure ottenute dalle prove sperimentali nelle giornate tipo estive sono state elaborate in Tabella 7 i consumi frigoriferi relativi all'intera stagione e i potenziali benefici energetici ed economici ottenibili dal funzionamento dell'impianto di poligenerazione.

Tabella 7: Analisi energetica dei consumi periodo estivo caso studio cantina

Parametro	Valore	Unità	Note
Carico termico frigorifero giornaliero	159,6	kWh	
COP	2,5		medio
Energia elettrica giornaliera	63,84	kWh/giorno	Calcolata da 159,6 kWh / 2,5
Durata del periodo considerato	120	giorni	
Energia elettrica evitata (stagionale)	7.660,80	kWh	63,84 kWh/giorno × 120 giorni
Costo unitario dell'energia elettrica	0,25	€/kWh	Valore medio ipotizzato
Risparmio economico (stagionale)	1.915,20	€	7.660,8 kWh × 0,25 €/kWh
Fattore di emissione CO ₂ (mix elettrico medio)	0,4	kgCO ₂ /kWh	
Riduzione emissioni di CO₂ (stagionale)	3.064,32	kgCO₂	7.660,8 kWh × 0,4 kgCO ₂ /kWh

Risultati Finali Sintetici

- Energia elettrica evitata: 7.660,8 kWh
- Risparmio economico stagionale: 1.915,20 €
- Riduzione delle emissioni di CO₂: 3.064,32 kgCO₂

7.6.2 Valutazione potenziali benefici energetici ed economici estesi al periodo invernale

Estendendo le misure ottenute dalle prove sperimentali nelle giornate tipo invernali sono state elaborate i consumi relativi all'intera stagione e i potenziali benefici energetici ed economici ottenibili dal funzionamento dell'impianto di poligenerazione. In particolare, si riporta in Tabella 8 i parametri dei coefficienti utilizzati nel caso di utilizzo di gas naturale e in Tabella 9 i risultati di calcolo con i costi per una stagione invernale. In Tabella 10 i parametri e coefficienti utilizzati di elettricità prelevata dalla rete e in Tabella 11 i costi relativi. In Tabella 12 i parametri e coefficienti utilizzati per alimentare una caldaia a biomassa e in Tabella 13 i relativi costi. Il confronto con l'utilizzo di una caldaia a metano, la pompa di calore alimentata dalla rete elettrica e la caldaia a biomassa è nella Tabella 14.

Tabella 8: -Parametri e coefficienti utilizzati per il gas

Parametro	Valore	Unità	Note
Energia giornaliera	104,76	kWh/giorno	Consumo medio simulato
Durata del periodo	180	giorni	Periodo di funzionamento stagionale
Fattore di conversione kWh → gas naturale	0,24	m ³ /kWh	Rendimento medio di una caldaia tradizionale
Costo del gas naturale	0,75	€/m ³	Prezzo medio stimato del gas

Tabella 9: Risultati di calcolo utilizzando gas naturale

Risultato	Valore	Unità	Calcolo
Energia termica stagionale richiesta	18.874,26	kWh	104,757 kWh/giorno × 180 giorni
Consumo di metano (evitato)	4.528	m ³	18.874,26 kWh × 0,24 m ³ /kWh
Costo stagionale per riscaldamento a gas	3.396,00	€	4.528 m ³ × 0,75 €/m ³

Tabella 10: Parametri e coefficienti utilizzati (con elettricità prelevata dalla rete elettrica)

Parametro	Valore	Unità	Note
Energia termica stagionale richiesta	18.874,26	kWh termici	Identica a quella usata per il confronto col gas
COP della pompa di calore	3	-	Coefficiente prestazione medio riscaldamento

Parametro	Valore	Unità	Note
Fattore conversione (kWh termici/elettrici)	1/3	kWh e/kWh	1 kWh elettrico produce 3 kWh termici
Costo dell'elettricità	0,23	€/kWh	Prezzo medio della rete elettrica (senza FV)

Tabella 11: - Risultati del calcolo (con elettricità prelevata dalla rete)

Risultato	Valore	Unità	Calcolo
Energia elettrica necessaria	6.291,42	kWh	18.874,26 kWh ÷ COP 3
Costo stagionale per riscaldamento elettrico	1.447,03	€	6.291,42 kWh × 0,23 €/kWh

Tabella 12: -Parametri e coefficienti utilizzati (per alimentare una caldaia a biomassa)

Parametro	Valore	Unità	Note
Consumo giornaliero di biomassa	60	kg	Dato sperimentale
Potere calorifico del nocciolino	4,5	kWh/kg	Valore medio per nocciolino essiccato
Costo del nocciolino essiccato	0,15	€/kg	Prezzo medio
Durata stagione di riscaldamento	180	giorni	

Tabella 13: Risultati del calcolo (per alimentare una caldaia a biomassa)

Risultato	Valore	Unità	Note
Energia termica prodotta (giornaliera)	270	kWh	60 kg × 4,5 kWh/kg
Costo biomassa per giorno	9	€	60 kg × 0,15 €/kg
Costo biomassa per stagione (180 giorni)	1.620	€	9 € × 180 giorni
CO₂ risparmiata	6.366,32	kg CO₂	In funzione dell'energia evitata rispetto a fonte fossile

Tabella 14: Confronto dei costi energetici per soddisfare il fabbisogno termico stagionale

Fonte/Sistema	Energia elettrica o combustibile necessario	Costo totale (€)	CO ₂ emessa/risparmiata (kg)	Note
Gas naturale	4.528 m ³ (0,24 m ³ /kWh)	3.396 €	Emissioni elevate	Caldaia a gas naturale
Rete elettrica (COP 3)	6.291,42 kWh	1.447 €	Emissioni moderate	Pompa di calore elettrica
Biomassa (nocciolino)	10.800 kg per stagione (60 kg/giorno)	1.620 €	6.366,32 kg CO ₂ evitate	Costo contenuto, CO ₂ molto bassa se biomassa sostenibile

7.6.3 Sintesi del vantaggio di utilizzo dell'impianto di poligenerazione estivo ed invernale – Caso studio Cantina

L'utilizzo dell'impianto di poligenerazione consente di coprire il fabbisogno energetico stagionale estivo ed invernale con una combinazione di fonti rinnovabili ad alta efficienza, ottenendo:

- Totale energia elettrica evitata: 7.660,8 kWh (solamente per la stagione estiva)
- Totale risparmio economico: 1.915,20 € (Estivo)
- una riduzione significativa delle emissioni di CO₂ pari a 9.430,64 kgCO₂ (estate+inverno),
- una maggiore indipendenza energetica, riducendo la dipendenza dalla rete elettrica e dal gas naturale.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze nel corso dello svolgimento della LA 4.17 come previsto dal capitolato di progetto.

9 Pubblicazioni scientifiche

-Articolo dal titolo "Optimal design of renewable energy-driven polygeneration system: An application in the dairy industry" disponibile su Science Direct - Available 28.02.2023 n. 136933

- Sottomissione abstract: "Tests of a renewable energy polygeneration system by means of a thermal load simulator apparatus" con processo di peer review a convegno internazionale "AllA 2025 International Conference Biosystems Engineering for the Green Transition", Reggio Calabria, 21-24 settembre 2025.

10 Eventi di disseminazione

-“Scendiamo in Campo, scopriamo, interpretiamo e valutiamo le potenzialità del territorio”
UNIBA – Dipartimento di Scienze del Suolo della Pianta e degli Alimenti c/o Centro didattico sperimentale P. Martucci Valenzano (BA) 15 maggio 2024 ore 9.00-16.00 partecipazione di circa 150 discenti.

-Evento conclusivo di presentazione del PTR2022-2024 della Ricerca di Sistema elettrico nazionale Risultati del Progetto 1.5 Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica. Presentazione dal titolo “Sistema di Poligenerazione da Fonti Rinnovabili per il comparto agroindustriale. Attività sperimentale” c/o la Centro Congressi Frentani (Via dei Frentani, 4) a Roma 27 novembre 2024