



Ricerca di Sistema elettrico

Monitoraggio sperimentale di ulteriori configurazioni del sistema di poligenerazione e definizione di strategie di accumulo energetico

Giuliano Vox, Fabiana Convertino, Evelia Schettini

MONITORAGGIO SPERIMENTALE DI ULTERIORI CONFIGURAZIONI DEL SISTEMA DI POLIGENERAZIONE E DEFINIZIONE DI STRATEGIE DI ACCUMULO ENERGETICO

Giuliano Vox, Fabiana Convertino, Evelia Schettini

Università degli Studi di Bari Aldo Moro
Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT)
Via Amendola 165/A
70126 Bari

Con il contributo del prof. Scarascia Mugnozza Giacomo (Università degli Studi di Bari Aldo Moro)

Dicembre 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: 3 "Componenti e impianti innovativi per incrementare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici"

Linea di attività 3.36: Monitoraggio sperimentale di ulteriori configurazioni del sistema di poligenerazione e definizione di strategie di accumulo energetico

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Ing. Biagio Di Pietra, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Condizionamento climatico nella filiera agro-alimentare con sistemi innovativi di poligenerazione energetica"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Lorena Giordano

Responsabile scientifico Università degli Studi di Bari Aldo Moro: Prof.ssa Ing. Evelia Schettini



Indice

1	SOMMARIO.....	4
1.	INTRODUZIONE.....	5
2.	DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	6
2.1	MONITORAGGIO DI ULTERIORI CONFIGURAZIONI DEL SISTEMA DI POLIGENERAZIONE IN CONDIZIONI DI “BASE”	6
2.2	SPERIMENTAZIONE SUI SISTEMI DI DISTRIBUZIONE IN SERRA	14
2.2.1	<i>La sperimentazione nel 2021</i>	14
2.2.1.1	Specifiche del sistema di distribuzione nell’area di coltivazione.	17
2.2.2	<i>Prova sperimentale nel periodo estivo: Configurazione di base con utilizzo di pompa di calore geotermica e solar cooling per raffrescamento</i>	21
2.2.2.1	Parametri climatici esterni, microclima, monitoraggio	23
2.2.3	<i>Prova sperimentale nel periodo invernale</i>	28
2.2.3.1	Parametri climatici esterni	30
2.2.3.2	Configurazione di base con utilizzo di pompa di calore geotermica e collettori solari: microclima, monitoraggio 31	
2.2.3.3	Configurazione di base con utilizzo di caldaia a biomassa e collettori solari: microclima, monitoraggio	35
2.2.4	<i>Parametri caratteristici dell’impianto e costi di funzionamento</i>	37
2.3	VALUTAZIONE DEL SISTEMA STOCCAGGIO DI ENERGIA ELETTRICA.	38
2.4	PUBBLICAZIONI DEL GRUPPO DI RICERCA	40
3.	CONCLUSIONI	40
4.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	41
5.	BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	42
2	APPENDICE	43

1 Sommario

Il gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro ha realizzato una ricerca su un sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili per il condizionamento climatico localizzato all'interno di una serra. Al sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili costituito da un impianto di solar cooling, da una caldaia a biomassa e da una pompa di calore aria-acqua è stato aggiunto, nel 2021, un sistema di captazione geotermica abbinato a una pompa di calore geotermica. Durante il 2021 sono state testate diverse configurazioni di base. Nel periodo estivo la serra è stata raffrescata mediante l'impianto di solar cooling integrato con la pompa geotermica; nel periodo invernale la serra è stata riscaldata utilizzando sia i collettori solari integrati con la pompa geotermica sia i collettori solari integrati con la caldaia a biomassa.

La sperimentazione è stata condotta anche per verificare l'applicabilità di diversi sistemi innovativi di distribuzione del freddo/caldo in prossimità della zona di coltivazione in serra. La crescita delle piante è monitorata soltanto per evidenziare le prestazioni del sistema di condizionamento climatico; la pianta è, infatti, un biosensore il cui sviluppo è connesso al microclima realizzato nella serra. Sono stati utilizzati due sistemi di distribuzione del freddo/caldo precedentemente testati, sistema a tubi interrati nel substrato di coltivazione e sistema a tubi poggiati sul substrato di coltivazione, mentre il terzo sistema a piastre nella zona areale delle piante è stato ottimizzato. Lo sviluppo delle piante raffrescate/riscaldate è stato confrontato con quello di piante coltivate in condizioni di assenza di raffrescamento/riscaldamento localizzato (controllo).

Le conseguenze dell'utilizzo di tali sistemi, sulla temperatura del substrato e dell'aria della zona di coltivazione, sono risultate evidenti.

Il sistema a tubi interrati ha prodotto il maggior raffrescamento e riscaldamento del terreno, mentre il sistema a piastre ha fatto registrare il più sensibile raffrescamento dell'aria.

In estate è stato osservato che le piante raffrescate con il sistema a piastre sono cresciute maggiormente: si è registrato il maggior numero di foglie per pianta, la maggiore altezza e il maggior peso rispetto alle altre. In estate il maggior sviluppo delle piante è stato influenzato da una temperatura dell'aria in prossimità delle piante più mite.

In inverno le piante riscaldate con tubi interrati sono cresciute maggiormente: hanno registrato il maggior numero di foglie per pianta, la maggiore altezza e il maggior peso rispetto alle altre. In inverno il maggior sviluppo delle piante è stato influenzato da una temperatura del suolo più calda.

Le richieste energetiche per il condizionamento climatico di una serra sono considerevoli. Emerge, pertanto, l'esigenza di adozione di sistemi di climatizzazione che sfruttano fonti diversificate e rinnovabili.

1. Introduzione

L'agricoltura in ambiente controllato è diffusa in tutto il mondo per il suo alto rendimento in quanto permette di incrementare la produzione da 10 a 20 volte per unità di superficie rispetto alla produzione in pieno campo. All'interno di una serra si devono, però, realizzare condizioni ambientali idonee alle coltivazioni in atto, con l'eventuale ausilio di impianti tecnologici (McCartney and Lefsrud, 2018; Vox et al., 2010). Attraverso la copertura e le pareti trasparenti bisogna assicurare la trasmissione della radiazione solare adatta alle esigenze delle colture praticate. All'interno della serra è necessario creare condizioni ambientali favorevoli alla crescita, allo sviluppo e alla massima produttività delle piante coltivate in epoca anticipata o ritardata rispetto a quella di coltivazione in campo o delle piante originarie di zone aventi caratteristiche climatiche diverse da quelle locali. Inoltre, bisogna garantire condizioni di confort climatico agli addetti alle operazioni colturali in serra.

Per consentire la creazione e il mantenimento di un microclima interno idoneo e controllato durante tutto l'anno si utilizzano sistemi attivi di condizionamento climatico: i generatori di aria calda, gli aerotermini, i sistemi a termosifone per il riscaldamento nei periodi freddi; gli impianti di ventilazione forzata, i fog system e gli impianti a filtri evaporativi per il raffrescamento (Vox et al., 2010). Il microclima è funzione di parametri quali la temperatura e l'umidità relativa dell'aria, la temperatura del suolo o del substrato di coltivazione, il livello di radiazione cui sono esposte le piante.

L'agricoltura in ambiente controllato comprende diversi sistemi di coltivazione che vanno dalle "plant factory" alle "vertical farms" in ambito urbano, a serre ad alta tecnologia in ambiente rurale o in ambito urbano (Gorjian et al., 2021; Weidner et al., 2021). Il diffondersi di attività agricole in contesti urbani è un fenomeno che si sta estendendo a livello mondiale a causa dell'incremento della popolazione nelle città (O'Sullivan et al., 2019). L'agricoltura condotta a livello urbano fornisce cibo fresco, genera occupazione, consente il riciclo di rifiuti urbani, crea "greenbelts" e rafforza la resilienza delle città ai cambiamenti climatici.

Secondo dati aggiornati della FAO (2019), la catena alimentare a livello globale consuma circa il 30% dell'energia globale totale e la sua dipendenza dai combustibili fossili contribuisce ad emissioni di gas serra per il 19-29% del totale annuo (Gorjian et al., 2021).

Il consumo di energia necessaria per riscaldare una serra è correlato alla latitudine: maggiore è la latitudine, maggiore è il fabbisogno energetico (Kumar et al., 2022). Ad esempio, in Finlandia, è stato stimato un fabbisogno energetico annuale per la stagione invernale pari a più di 555 kWh/m² per coltivare pomodori (Mariani et al., 2016), mentre il fabbisogno energetico per la stagione invernale in Italia varia da 134 a 209 kWh/m² (Fabrizio, 2012).

Per poter raffrescare una serra si è registrato un consumo pari a 56 kWh/m² all'anno in Arabia Saudita (Al-Ibrahim et al., 2006) e di 20 kWh/m² all'anno in Grecia (Trypanagnostopoulos et al., 2017).

La quantità di energia consumata in una serra dipende anche dalla coltivazione in atto. A Smirne, in Turchia, sono necessari 38, 79 e 10 kWh/m² all'anno rispettivamente per la coltivazione di pomodoro, cetriolo e lattuga (Yildirim e Bilir, 2017).

Per contrastare il riscaldamento globale e utilizzare energia prodotta da fonte rinnovabile e sostenibile, si potrebbe ricorrere a fonti energetiche e sistemi di produzione di energia quali, vento, radiazione solare, biomassa, calore geotermico, e impianti idroelettrici (Ahamed et al., 2019; Kumar et al., 2022).

L'utilizzo di energia geotermica per il condizionamento climatico di serre non è molto diffuso negli insediamenti serricoli su larga scala. Tra le ragioni potrebbero esserci gli alti costi iniziali, la mancanza di adeguate tecnologie, una manutenzione complicata, l'assenza di supporto governativo (Ahamed et al., 2019). Nel mondo l'uso di energia geotermica per il riscaldamento delle serre è recentemente aumentato del 10% nella capacità installata e del 13% nel consumo energetico annuo (Ahamed et al., 2019).

La letteratura scientifica ha evidenziato la necessità di studi sull'energia geotermica da utilizzare per il condizionamento climatico delle serre anche per ridurre i costi di produzione in serra (Ahamed et al., 2019; Ghoulam et al., 2019).

2. Descrizione delle attività svolte e risultati

Le attività svolte dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro nell'ambito della linea di attività LA 3.36 "Monitoraggio sperimentale di ulteriori configurazioni del sistema di poligenerazione e definizione di strategie di accumulo energetico" riguardano il monitoraggio di ulteriori configurazioni del sistema di poligenerazione in condizioni di "base" e la valutazione del sistema di stoccaggio di energia elettrica.

Il sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili, presente presso il Centro sperimentale "P. Martucci" dell'Università di Bari, nel 2021 è stato integrato con una pompa di calore geotermica reversibile (paragrafo 2.1 e paragrafo 2.2.1). La sperimentazione sui sistemi di distribuzione del freddo in serra ha riguardato una prova sperimentale eseguita nel periodo estivo utilizzando l'impianto di solar cooling integrato con la pompa geotermica per il raffrescamento della serra (paragrafo 2.2.2). Nel periodo invernale 2021 è stato utilizzato l'impianto di solar cooling integrato con la pompa geotermica e l'impianto di solar cooling integrato con la caldaia a biomassa (paragrafo 2.2.3) per il riscaldamento della serra. Considerazioni su un sistema di stoccaggio di energia elettrica sono nel paragrafo 2.3. Le attività svolte hanno consentito di elaborare una pubblicazione (paragrafo 2.4).

2.1 Monitoraggio di ulteriori configurazioni del sistema di poligenerazione in condizioni di "base"

Le attività sperimentali del gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro sono svolte presso il Centro sperimentale "P. Martucci". Il centro si trova in località Valenzano (BA), latitudine 41° 01' N, longitudine 16° 54' E.

Il sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili presente presso il Centro sperimentale è utilizzato per il condizionamento estivo ed invernale di una serra sperimentale. La serra, di circa 300 m², è orientata in direzione nord-sud. Nel 2020 il sistema di poligenerazione era composto da un impianto di solar cooling, da una caldaia a biomassa e da una pompa di calore aria-acqua (Figura 1); impianto descritto nel dettaglio nei Report RdS/PTR2019/054 e RdS/PTR2021/144. Questi elementi da soli o integrati tra loro producevano acqua fredda o calda in funzione delle necessità termiche delle coltivazioni in atto nella serra e della stagione di coltivazione.

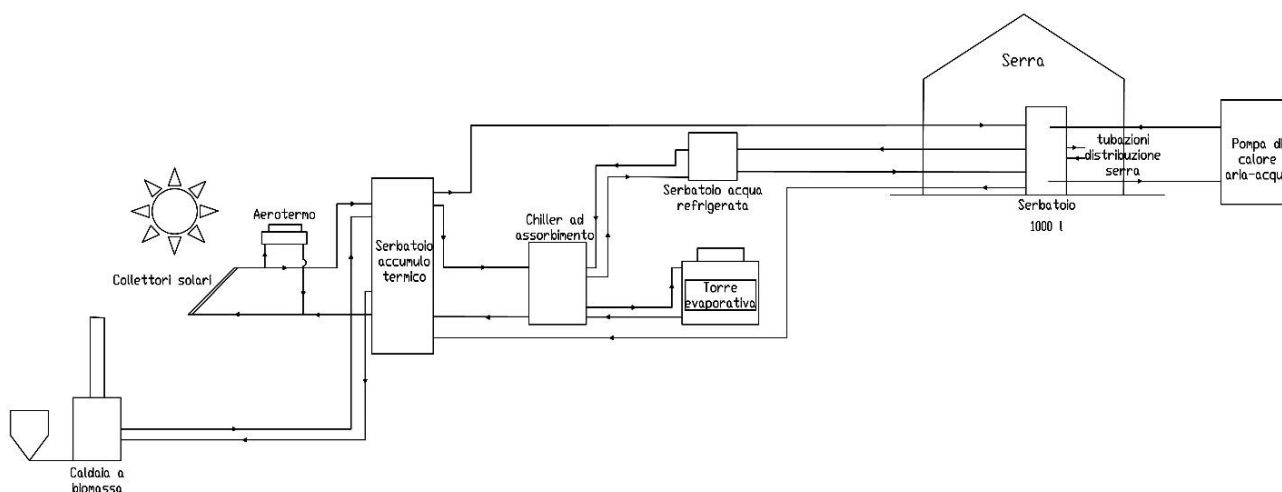


Figura 1. Schema del sistema di poligenerazione del 2020: impianto di solar cooling, caldaia a biomassa e pompa di calore aria-acqua, per il condizionamento estivo ed invernale della serra presso l'Università di Bari.

Durante il 2021 il sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili presente nel campo sperimentale è stato integrato con un sistema di captazione geotermica abbinato a una pompa di calore geotermica. All'interno della serra sono stati installati una coppia di ventilconvettori con ventilatore centrifugo.

L'energia geotermica sfrutta, come fonte di energia, il calore immagazzinato nella crosta terrestre mediante sonde geotermiche, cioè tubazioni inserite nel terreno, nelle quali scorre un fluido termovettore, generalmente acqua con aggiunta di un anticongelante.

La conduzione di calore in una sonda geotermica avviene attraverso tre strati di materiale: le pareti del collettore, la malta cementizia e il terreno. Il trasferimento di calore per convezione si innesca tra il fluido freddo e il tubo caldo, dove avvengono fenomeni di dispersione termica, motivo per cui il diametro delle sonde è compreso tra i 20 e i 40 mm.

Le sonde geotermiche sono installate nel terreno seguendo le modalità operative della perforazione di pozzi artesiani. Lo scavo ha un costo non trascurabile e, questo, sicuramente ha limitato la diffusione di questi impianti.

Presso il campo sperimentale dell'Università di Bari è stato realizzato un avampozzo, del diametro di 180 mm, dal piano di campagna fino ad una profondità di 3 m. Successivamente è stato realizzato un pozzo geotermico del diametro di 140 mm dalla profondità di 3 m fino a 120 m.

È stata installata una sonda geotermica verticale che raggiunge una profondità di 120 m (Figura 2); la sonda geotermica è costituita da una tubazione PE100 SDR 11 PN 16 a doppia "U" di diametro esterno pari a 32 mm e spessore pari a 2.9 mm. Sono presenti quindi 2 tubi di discesa da 32 mm e due di risalita da 32 mm (Figura 3). Tra le varie tipologie di sonda è preferibile la configurazione a doppia U, sia nel raro caso di occlusione di un tubo, sia perché migliora lo scambio termico col terreno, a parità di portata con la sonda a singola U. Le sonde geotermiche verticali a doppia "U" realizzate in polietilene ad alta densità (HDPE) consentono di sfruttare al meglio la perforazione realizzata poiché aumentano la superficie di scambio con il sottosuolo. L'installazione ottimale si ottiene impiegando idonei distanziali che consentono il mantenimento del giusto interasse per l'intera lunghezza della sonda.

L'HDPE è caratterizzato da buone proprietà termiche e meccaniche, e da una buona resistenza in ambiente corrosivo. Poiché il polietilene possiede una bassa conducibilità termica (0.38-0.40 W/mK) si usano tubazioni con spessore non eccessivamente elevato, in modo da ostacolare il meno possibile lo scambio termico. D'altro canto, le tubazioni non possono essere troppo sottili, altrimenti non resisterebbero allo stress meccanico imposto dal materiale di riempimento e del terreno. Tubazioni PN16, cioè con una pressione nominale pari a 16 bar, rappresentano la soluzione ottimale per rispondere ad esigenze sia termiche sia meccaniche.

L'avampozzo (profondità di 3 m circa) è stato rivestito con tubi in PVC del diametro esterno di 160 mm e spessore di 3.2 mm. Le tubazioni sono state opportunamente distanziate nell'ambito della perforazione e sono state immerse in boiaccia cementizia bentonitica. La presenza del materiale cementizio deve garantire la stabilità strutturale della sonda oltre che un buon isolamento termico tra sonda e terreno. La sonda non occupa completamente il volume della perforazione, dunque senza il materiale cementante si interporrebbe uno strato di aria tra il terreno e la sonda, con conseguente declino delle potenzialità di scambio termico. La stabilità strutturale delle sonde è necessaria per garantirne il funzionamento attraverso gli anni, considerando inoltre che il processo di installazione oltre ad essere laborioso è economicamente dispendioso e che quindi le sonde non devono subire danni durante gli anni di esercizio. Le sonde devono avere una vita media tale da garantire un periodo di funzionamento relativamente lungo (nell'ordine di decine di anni).

La sonda geotermica installata è caratterizzata da un fluido termovettore per lo scambio termico con il terreno del tipo acqua con glicole propilenico al 20%. Il glicole propilenico (nome IUPAC 1,2-propandiolo, formula bruta $C_3H_8O_2$ e massa molecolare 76.09 g/mol) è un liquido incolore e inodore, chiaro e viscoso, ottenuto dalla reazione di idratazione dell'ossido di propilene. La temperatura di congelamento di una soluzione di acqua e glicole propilenico al 20% è di circa -8 °C.

Un fattore importante nel dimensionamento dell'impianto è sicuramente la conformazione e la tipologia di terreno: il terreno può essere costituito da vari strati di materiali diversi, con conducibilità e capacità termica volumetrica differenti, che possono influenzare lo scambio termico con la sonda. La profondità a cui la temperatura rimane costante dipende da diversi fattori quali la tipologia di terreno, la zona geografica, la presenza di falde acquifere. Generalmente la temperatura si assesta attorno a un valore costante, indipendente dalla stagione, al di sotto di 15 m.

La stratigrafia del sottosuolo presso il campo sperimentale di Valenzano è riportata in Figura 4.



Figura 2. Tubi della sonda geotermica in ingresso nel terreno.

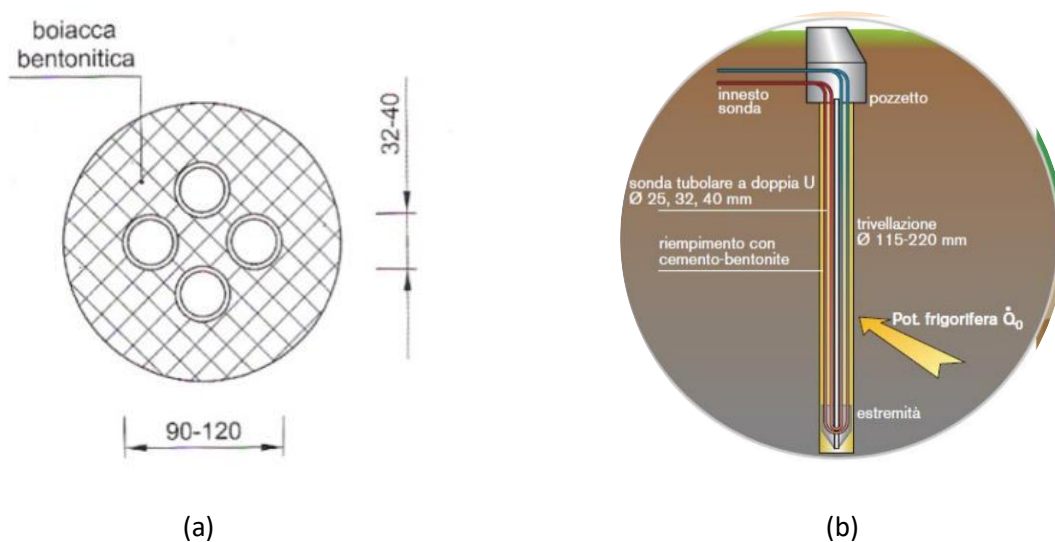


Figura 3. Sezione trasversale (a) e sezione verticale (b) di una sonda geotermica verticale a doppia "U".

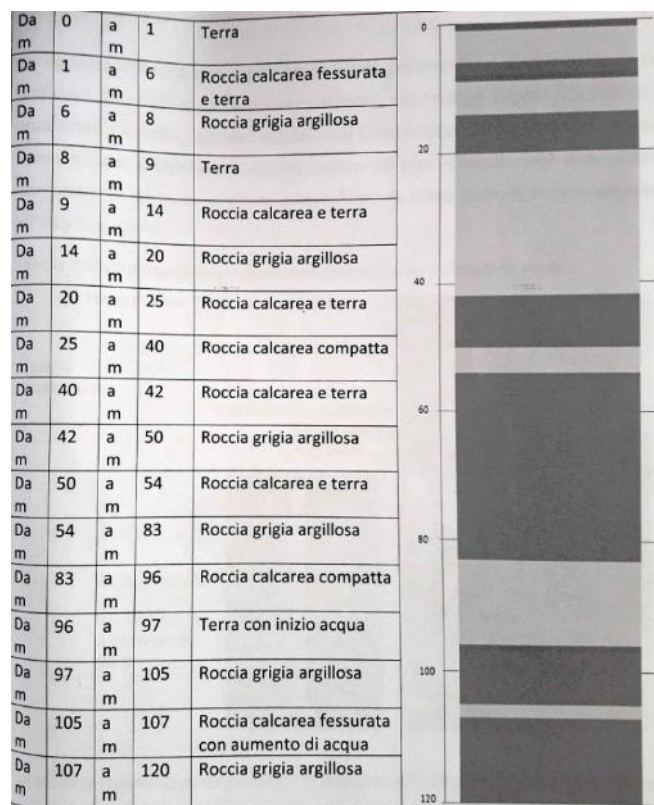


Figura 4. Stratigrafia del sottosuolo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.

I tubi della sonda geotermica sono collegati in superficie ad un apposito collettore connesso a una pompa di calore geotermica e a un serbatoio inerziale (Figura 5).

La pompa di calore installata è del tipo Fiorini GEO_HFE 12 (Figura 6). Le pompe di calore geotermiche GEO di Fiorini trasferiscono l'energia geotermica dal terreno al volume da climatizzare.

La pompa di calore Fiorini GEO_HFE 12 è una pompa di calore reversibile: il funzionamento può essere invertito, potendo operare alternativamente come unità riscaldante o raffrescante. Il funzionamento invernale della pompa di calore è caratterizzato da una potenza termica pari a 10.2 kW, una potenza assorbita dal compressore pari a 2.2 kW, e un coefficiente di prestazione (COP) pari a 4.68. Il funzionamento estivo è caratterizzato da una potenza frigorifera pari a 16.6 kW, una potenza assorbita dal compressore pari a 2.1 kW, e un rapporto di efficienza energetica (EER) pari a 7.84.

La Figura 6 mostra le componenti principali della pompa di calore geotermica. La Figura 7 evidenzia come sono state collegate le tubazioni agli attacchi posizionati sul lato superiore della pompa di calore geotermica. Il pannello di comando è composto da un display e da tasti per la programmazione, come mostrato nella Figura 8.

Il serbatoio inerziale è un volano termico PDC Cordivari Modello 200 (Figura 9). Il suo volume è pari a 180 l. La presenza di un serbatoio di accumulo per l'acqua calda risulta indispensabile per immagazzinare il calore e quindi distribuirlo. Il serbatoio inerziale ha la capacità di resistere a una pressione massima pari a 4 bar e può accumulare acqua caratterizzata da una temperatura che varia da -10 °C a +95 °C. Il serbatoio inerziale consente di migliorare il funzionamento dell'impianto limitando il numero delle accensioni orarie della pompa di calore e, aumentando l'inerzia termica del circuito, permette di ottenere temperature di funzionamento più stabili.

All'interno del serbatoio inerziale sono presenti dei sensori per la misura della temperatura dell'acqua a tre diverse altezze (Figura 10). La lettura di questi valori è eseguita dalla pompa di calore.



Figura 5. Pompa di calore del tipo Fiorini GEO_HFE 12 e serbatoio inerziale.

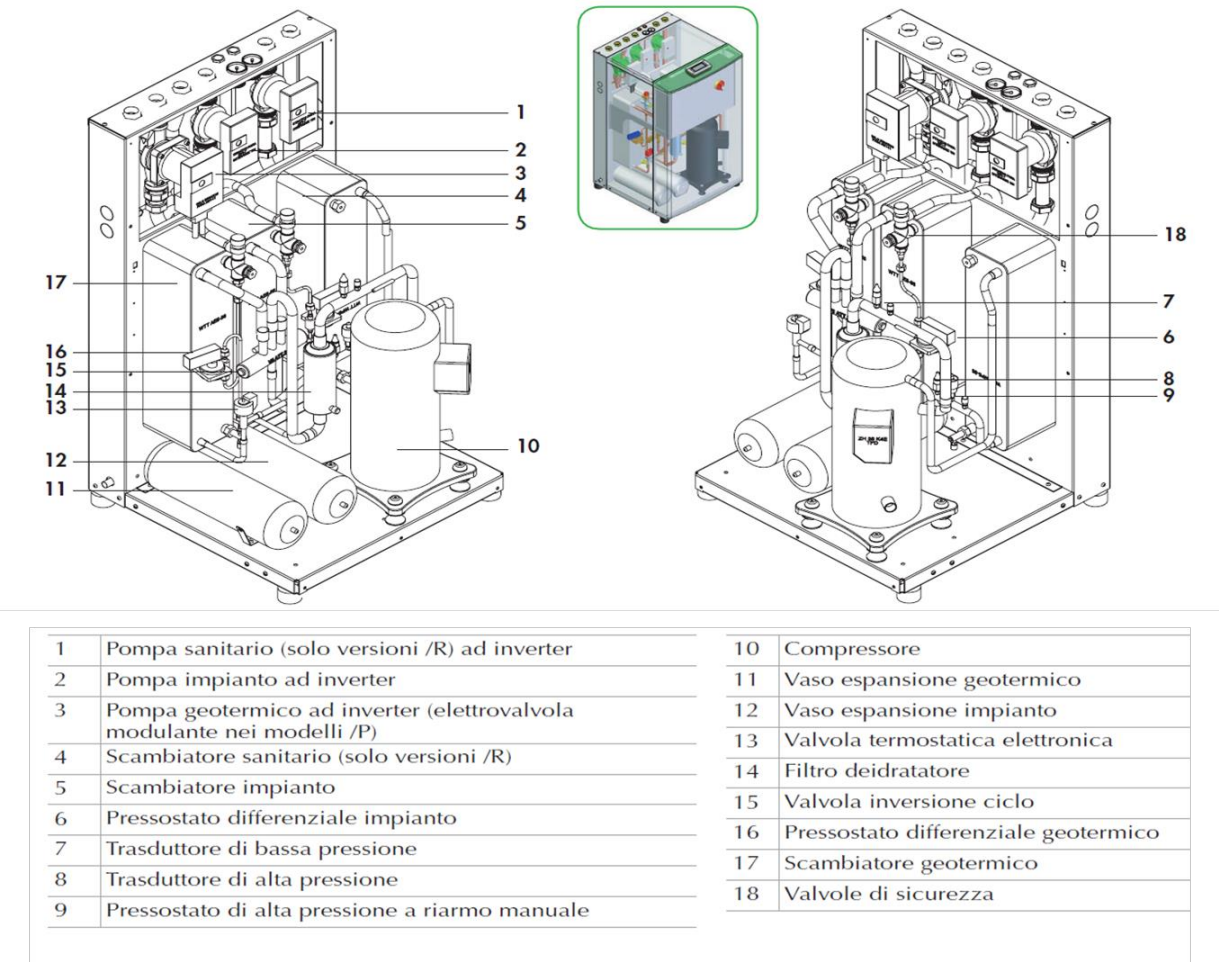


Figura 6. Componenti della pompa di calore Fiorini GEO_HFE 12.

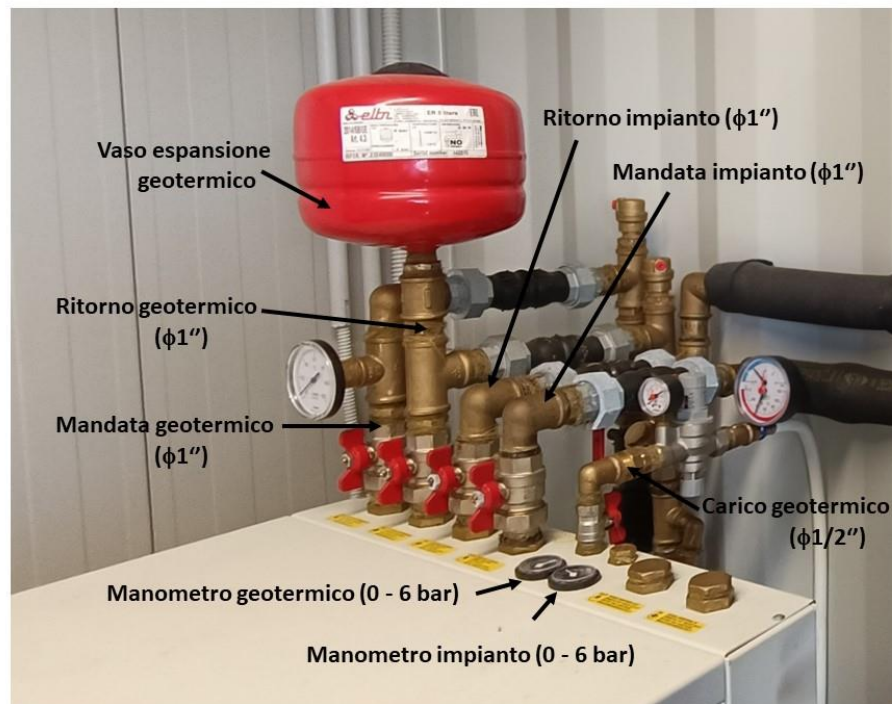


Figura 7. Collegamenti idraulici della pompa di calore Fiorini GEO_HFE 12.

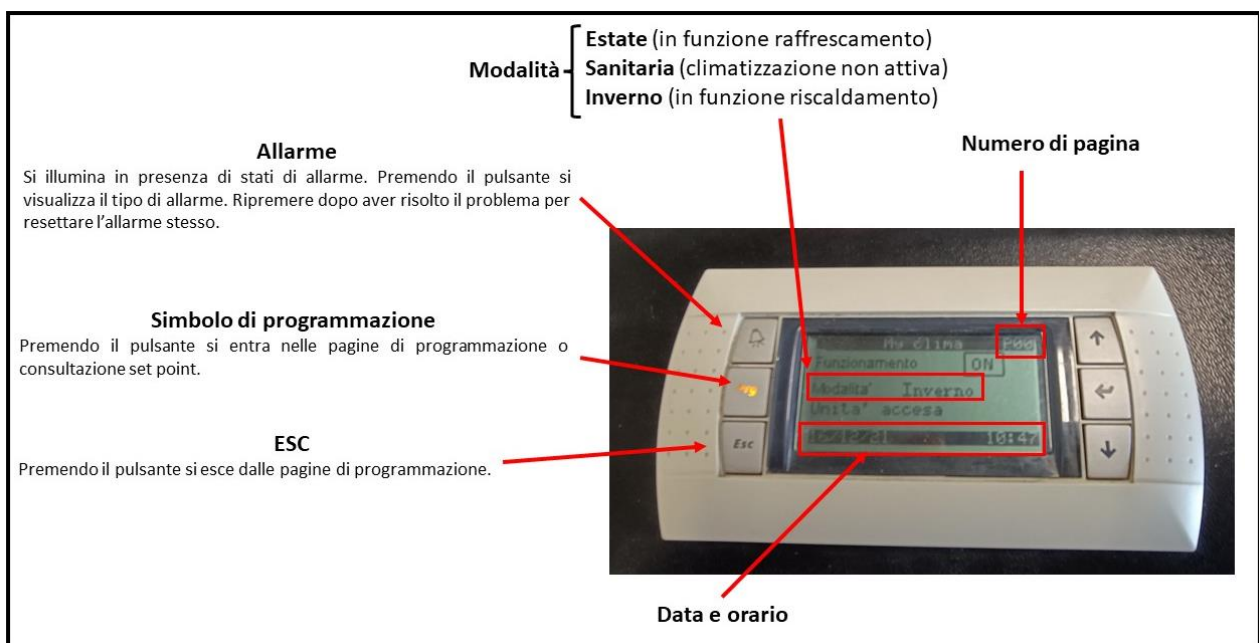


Figura 8. Pannello di controllo della pompa di calore del tipo Fiorini GEO_HFE 12.

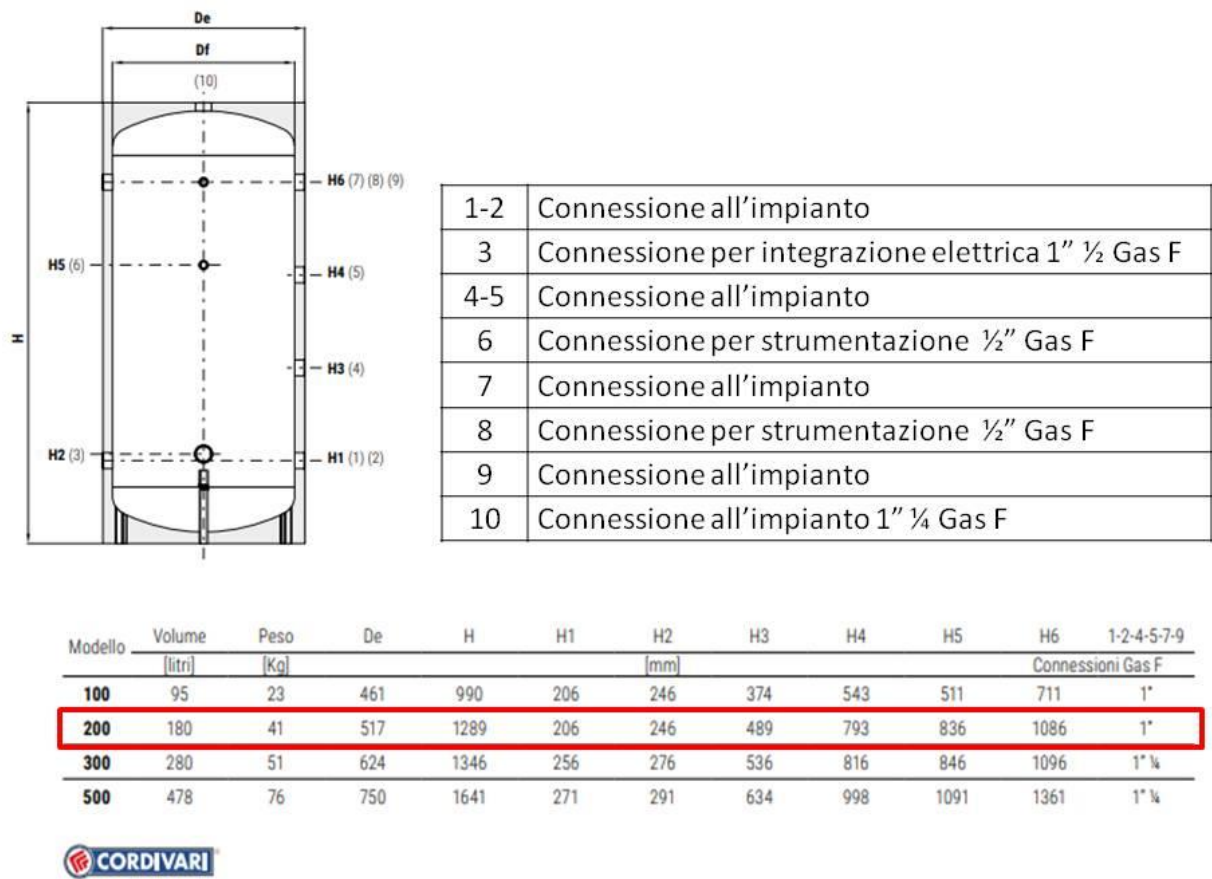


Figura 9. Serbatoio PDC Cordivari Modello 200.



Figura 10. Sensori per la misura a diverse altezze della temperatura dell’acqua presente all’interno del serbatoio.

Una coppia di ventilconvettori con ventilatore centrifugo del tipo Galletti EF10ULX è stata installata all'interno della serra (Figura 11). I ventilconvettori sono stati installati verticalmente a pavimento; sono presenti sia le griglie di uscita dell'aria sia le griglie di aspirazione con filtro incorporato. I ventilconvettori lavorano come scambiatori di calore acqua-aria. Per ogni singolo ventilconvettore la potenza di raffreddamento è pari a 6.71 kW, la potenza di riscaldamento è pari a 13.13kW, la portata d'aria è pari a 1011 m³/h.



Figura 11. Ventilconvettori all'interno della serra.

Nelle Figura 12 - Figura 13 sono rappresentati gli schemi dell'impianto di poligenerazione da fonti rinnovabili con le varie componenti in funzione delle diverse sorgenti, i serbatoi, le pompe, i flussimetri, le valvole e i sensori presenti all'esterno e all'interno della serra. L'impianto di poligenerazione è composto da un impianto di solar cooling (collettori solari, dry cooler, chiller ad assorbimento Yazaki, torre evaporativa), da una caldaia a biomassa, da un sistema di captazione geotermica (sonde e pompa di calore geotermica), da una pompa di calore aria-acqua e da ventilconvettori (fan coil).

I serbatoi presenti nell'impianto sono: il serbatoio di accumulo termico o serbatoio caldo da 2000 l; il serbatoio dell'acqua refrigerata o serbatoio freddo da 500 l; il serbatoio all'interno della serra o serbatoio ausiliario da 1000 l; il serbatoio inerziale geotermico da 180 l.

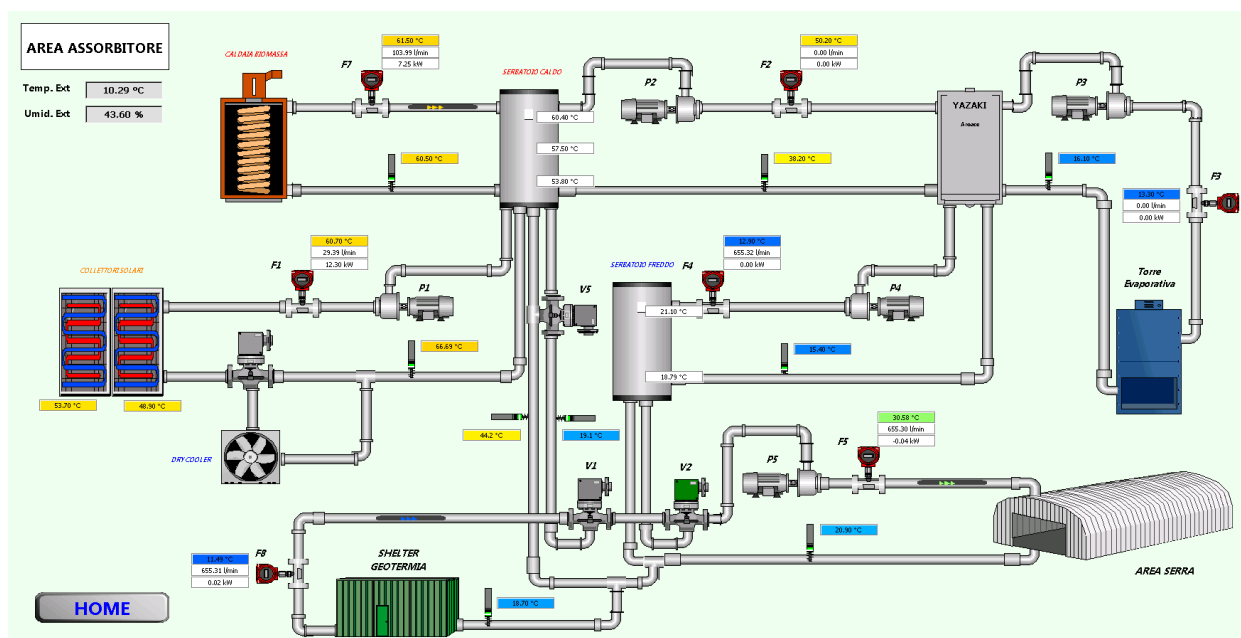


Figura 12. Schema del sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili composto da: impianto di solar cooling, caldaia a biomassa, pompa geotermica.

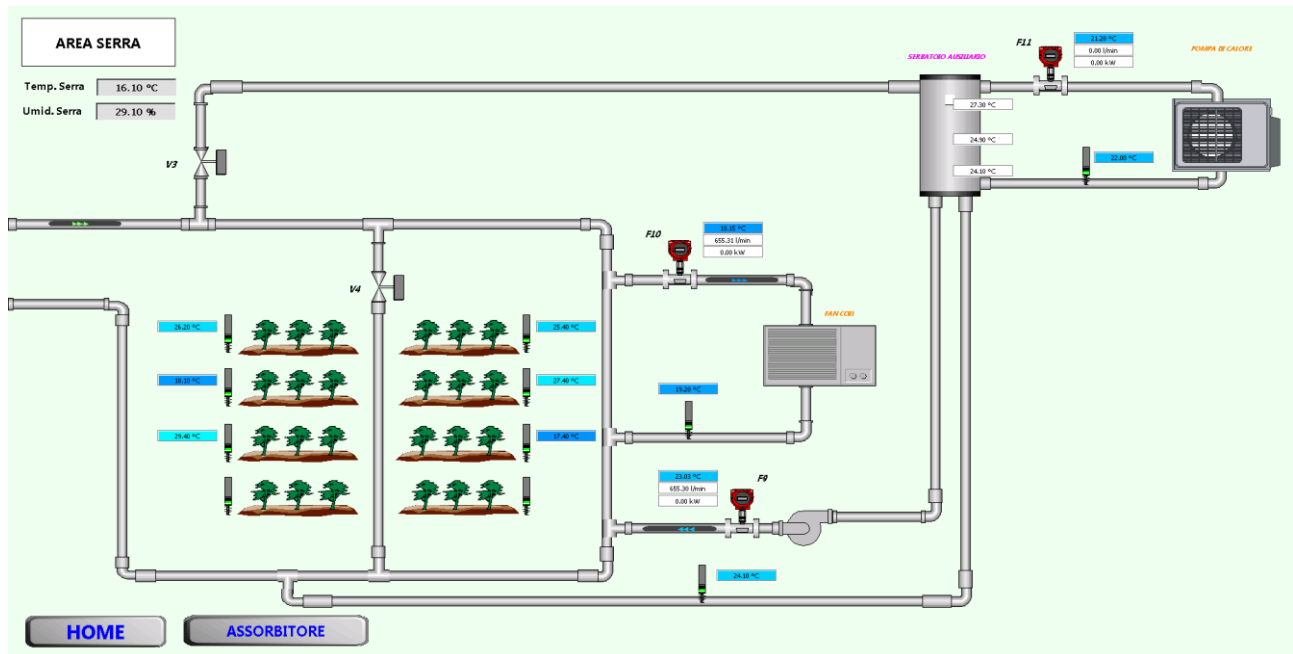


Figura 13. Schema del sistema a servizio della serra con pompa di calore aria-acqua e ventilconvettori.

Nelle Figura 12 - Figura 13 sono indicati: con la lettera F i flussimetri, per misurare le portate (misure in lmin^{-1} o m^3h^{-1}), le potenze (misure in kW) e le temperature di mandata (misure in °C); con la lettera P le pompe; con la lettera V le valvole e le elettrovalvole a due o a tre vie. Sono anche indicati i sensori (PT100) per la misura delle temperature dell'acqua di mandata e di ritorno dell'impianto (misure in °C). La temperatura del fluido termovettore nel serbatoio caldo, ausiliario e inerziale è misurata a tre diverse altezze: in basso, a metà altezza e in alto; nel serbatoio freddo, invece, a due altezze: in basso e in alto (Figura 10, Figura 12, Figura 13).

Nella serra è presente un circolatore (Figura 13).

La possibilità di utilizzare energia proveniente dai collettori solari per incrementare la temperatura all'evaporatore della pompa di calore geotermica è stata considerata e valutata, ma non è stata realizzata per notevoli problematiche tecniche. Non è stata solo la complessità impiantistica dei circuiti idraulici da realizzare a sconsigliare la realizzazione. Un elemento di difficoltà a livello impiantistico è la diversa natura del fluido termovettore dei due impianti. Le sonde geotermiche utilizzano un fluido termovettore per lo scambio termico con il terreno del tipo acqua con glicole propilenico al 20% mentre i collettori solari un fluido termovettore costituito da acqua non glicolata.

2.2 Sperimentazione sui sistemi di distribuzione in serra

2.2.1 La sperimentazione nel 2021

Nel corso del 2021 il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha continuato a svolgere ricerca sul sistema di monitoraggio e verifica di un impianto di poligenerazione da fonti rinnovabili per il raffreddamento o il riscaldamento localizzato all'interno di una serra. Sono state esaminate tre diverse configurazioni del sistema di poligenerazione: una per la produzione di energia frigorifera e due per la produzione di energia termica.

Nel periodo estivo 2021 è stato utilizzato l'impianto di solar cooling integrato con la pompa di calore geotermica per il raffreddamento della serra. La logica di funzionamento di questa configurazione è mostrata nella Figura 14.

Il sottosistema frigorifero dell'impianto di solar cooling si attivava nel momento in cui la temperatura dell'acqua contenuta nel serbatoio caldo superava i 70 °C. Parallelamente, l'acqua iniziava a fluire nelle tubazioni per il raffreddamento localizzato, grazie all'accensione della pompa 5 (Figura 12 e Figura 14) se la temperatura dell'aria in serra risultava maggiore di 32 °C. Quando la temperatura dell'acqua nel serbatoio freddo era sufficientemente bassa (minore di 12 °C), la pompa di calore geotermica si spegneva e l'energia

di raffrescamento era attinta dal serbatoio freddo. Viceversa, in caso di temperatura dell'acqua nel serbatoio freddo superiore a 12 °C, si aveva l'accensione della pompa di calore geotermica. La valvola a tre vie V2 (Figura 12 e Figura 14) interveniva nel regolare i flussi.

Nel periodo invernale 2021 l'impianto di solar cooling integrato con la pompa di calore geotermica è stato utilizzato per il riscaldamento della serra, secondo la logica di funzionamento mostrata nella Figura 15. L'acqua calda iniziava a circolare nelle tubazioni per il riscaldamento localizzato (Pompa 5= ON in Figura 15) quando la temperatura dell'aria rilevata in serra era inferiore a 15 °C. L'accensione o lo spegnimento della pompa di calore geotermica era invece regolato dalla temperatura dell'acqua nel serbatoio caldo. Quando quest'ultima risultava sufficientemente calda (temperatura superiore a 44 °C), la pompa di calore geotermica si spegneva. Nel momento in cui la temperatura dell'acqua nel serbatoio caldo scendeva al di sotto di 40 °C, la pompa di calore geotermica entrava in funzione. In questo caso, i flussi dalla pompa di calore geotermica e dal serbatoio caldo erano regolati dalla valvola V1 (Figura 12 e Figura 15).

Sempre nel periodo invernale 2021 per il riscaldamento della serra è stato utilizzato l'impianto di solar cooling integrato con la caldaia a biomassa. La logica di funzionamento di questa configurazione è mostrata nella Figura 16.

Anche durante questa prova, la circolazione dell'acqua calda nelle tubazioni per il riscaldamento localizzato era avviata, con l'accensione della pompa 5 (Figura 12 e Figura 16), in caso di temperatura dell'aria in serra inferiore a 15 °C. L'accensione e lo spegnimento della caldaia a biomassa avvenivano in funzione della temperatura dell'acqua contenuta nel serbatoio caldo. Quando quest'ultima era inferiore a 40 °C la caldaia a biomassa entrava in funzione, veniva spenta invece in caso di temperatura superiore a 55 °C (Figura 16).

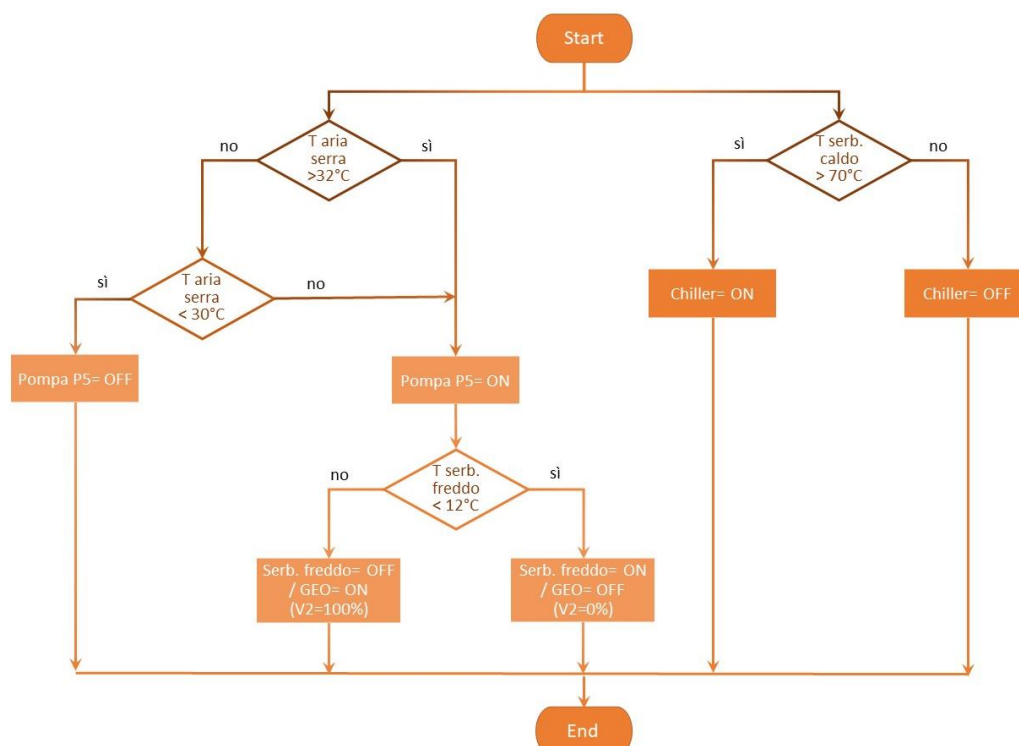


Figura 14. Configurazione di base con utilizzo dell'impianto di solar cooling e della pompa di calore geotermica (GEO) per il raffrescamento estivo 2021.

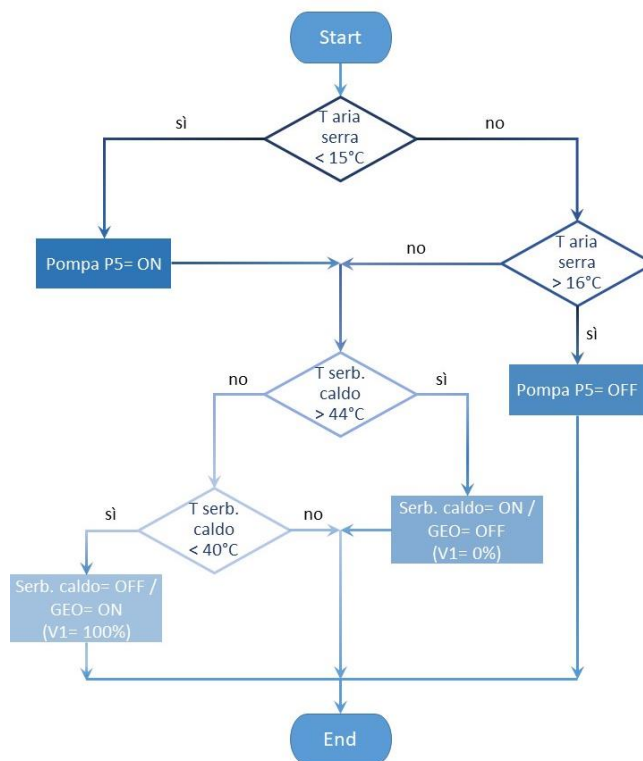


Figura 15. Configurazione di base con utilizzo di pompa di calore geotermica (GEO) e collettori solari per il riscaldamento invernale 2021.

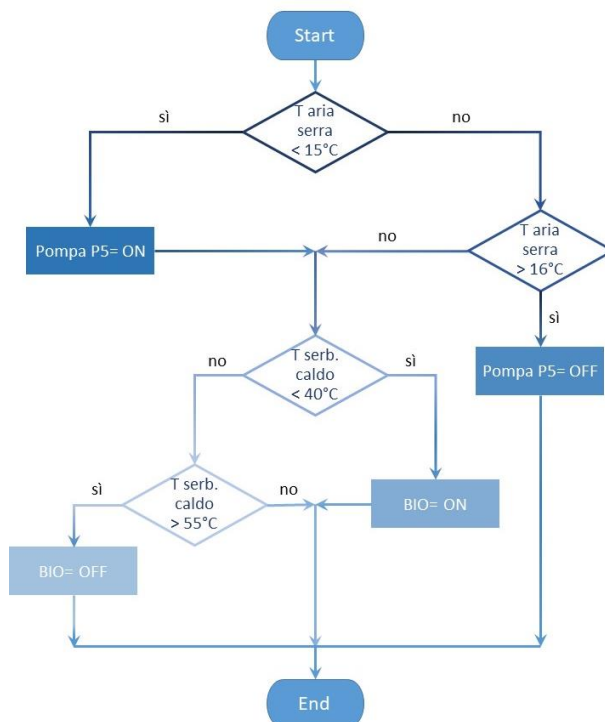


Figura 16. Configurazione di base con utilizzo di caldaia a biomassa e collettori solari per il riscaldamento invernale 2021.

2.2.1.1 Specifiche del sistema di distribuzione nell'area di coltivazione.

A seguito della realizzazione del sistema di captazione geotermica abbinato a una pompa di calore geotermica, sono stati realizzati dei collettori di connessione tra la pompa geotermica e l'utenza (Figura 17); questi sono in prossimità dei collettori di connessione esistenti tra la caldaia a biomassa e l'utenza.

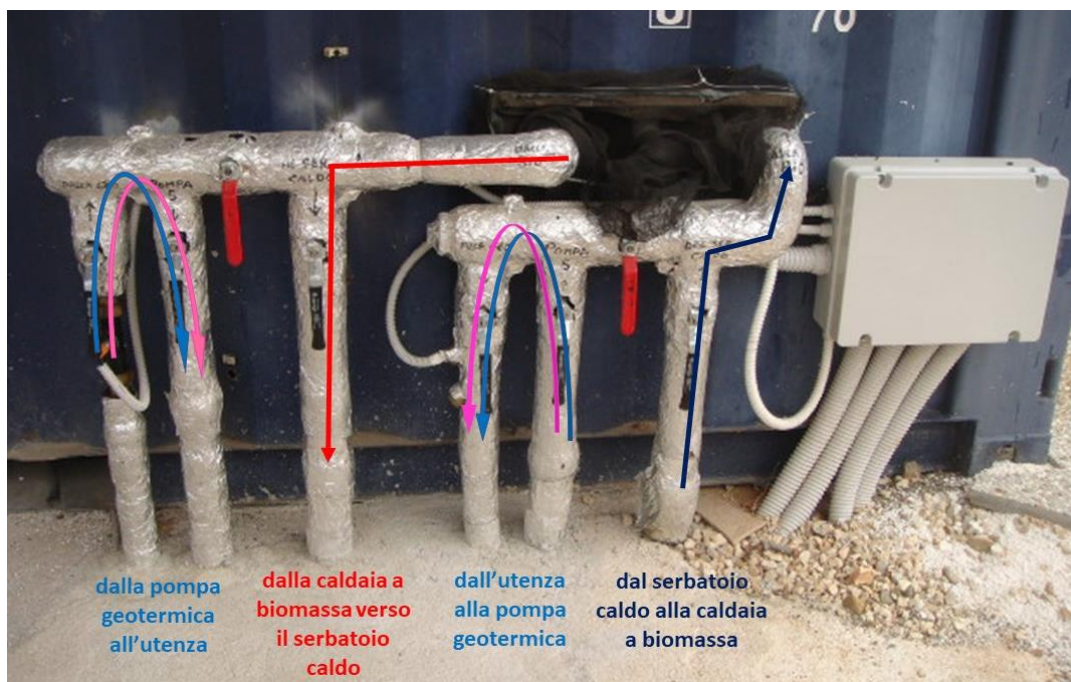


Figura 17. Collettori di connessione tra pompa di calore geotermica, caldaia a biomassa e utenza.

Il sistema di distribuzione dell'acqua calda/fredda all'interno del sistema di poligenerazione energetica alimentato da diverse fonti rinnovabili (solare, biomassa e geotermica) e in prossimità delle piante ha subito ulteriori migliorie nel 2021.

Le tubazioni di distribuzione dell'acqua calda/fredda all'esterno e all'interno della serra sono state coibentate sin dal momento della realizzazione dell'impianto nel 2015. Per la coibentazione è stata usata una guaina isolante in elastomero chiusa di colore nero (Figura 18a).

All'esterno l'isolamento delle tubazioni di distribuzione è purtroppo soggetto all'azione di invecchiamento dovuto a fattori climatici ed eventi meteorologici quali alte temperature, radiazione solare, radiazioni ultraviolette, escursioni termiche, pioggia, vento, grandine, neve. Nel corso degli anni la coibentazione si è danneggiata anche per l'azione di uccelli che ne strappano piccoli pezzi per costruire il nido. Una volta danneggiata la guaina, le tubazioni restavano senza alcuna protezione.

Per arginare il problema della frantumazione della guaina, tutti i tubi di coibentazione sono stati rivestiti, nel 2017, con nastri adesivi di protezione di colore bianco (Figura 18b). Questa soluzione, però, non è stata risolutiva. Il nastro adesivo si è frantumato velocemente (Figura 19). Nel 2020 le tubazioni in prossimità del campo solare sono state protette con tubi in alluminio (Figura 20) mentre le tubazioni in prossimità degli apparati sono stati ricoperti con nastri alluminizzati. (Figura 18c). Purtroppo, anche questi nastri sono stati danneggiati dagli uccelli. La soluzione di ricoprire tutte le tubazioni con tubi in alluminio è stata scartata per la presenza di tubazioni ravvicinate, tubazioni con diametri diversi, raccordi, sensori, chiavi di arresto.



Figura 18. Coibentazione dei tubi di distribuzione nel corso degli anni.

Nel 2021 le tubazioni ricoperte con nastri alluminizzati in prossimità degli apparati sotto la tettoia sono state rivestite con tubi in plastica rigida blu e nera (Figura 18d-Figura 21). Le tubazioni di mandata sono state rivestite con plastica rigida nera, le tubazioni di ritorno con plastica rigida blu.

All'interno della serra il sistema di distribuzione dell'acqua, fredda o calda, coibentato con la guaina isolante in elastomero chiusa di colore nero è stato rivestito con tubi in plastica rigida blu e nera (Figura 22). Le tubazioni ricoperte con tubo in plastica di colore nero sono quelle di mandata verso la zona di coltivazione, le tubazioni con tubo in plastica di colore blu sono quelle di ritorno dalla zona di coltivazione.



Figura 19. Lesioni della guaina isolante in elastomero di colore nero e del nastro adesivo bianco (2018).



2015



2020

Figura 20. Coibentazione dei tubi di distribuzione in prossimità del campo solare nel 2015 e 2020.



Figura 21. Particolare delle tubazioni in prossimità degli apparati rivestiti con tubi in plastica rigida blu e nera.

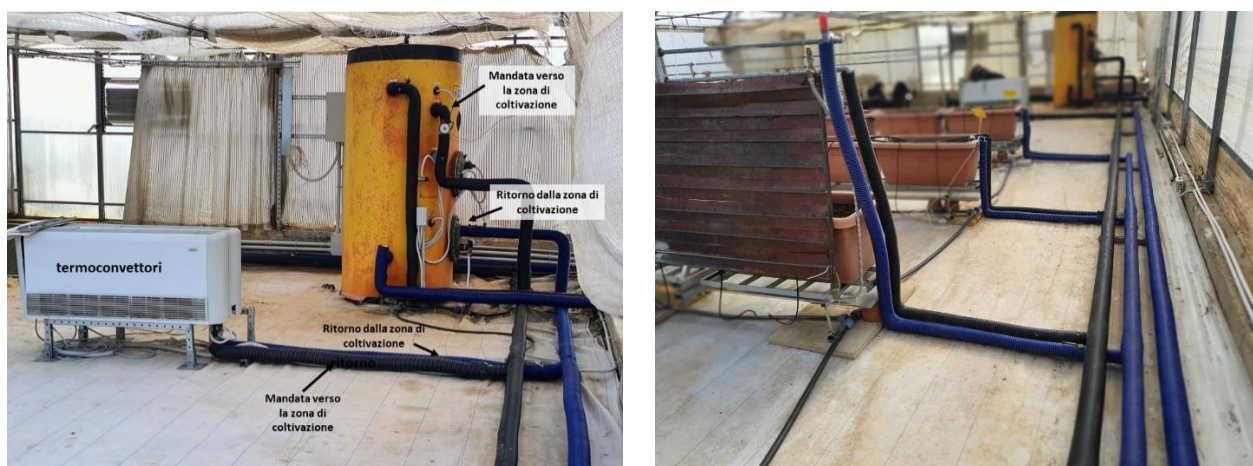


Figura 22. Tubazioni di mandata (colore nero) e ritorno (colore blu) all'interno della serra.

Anche nel 2021 l'energia termica e frigorifera è stata distribuita all'interno della serra in modalità localizzata al fine di favorire la creazione in prossimità delle piante di un microclima ottimale per lo sviluppo e la produttività delle stesse.

Nel 2021 è stato ottimizzato uno dei sistemi di distribuzione del freddo/caldo in prossimità delle piante. I sistemi di condizionamento localizzato denominati "tubo interrato" e "tubo poggiato", descritti nel Report RdS/PTR2021/144, sono rimasti invariati. Il terzo sistema di condizionamento localizzato è stato ottimizzato e denominato "piastre" (Figura 23).

Il sistema piastre è costituito da una lastra di rame posizionata nella zona aerea delle piante (Figura 24). La lastra di rame è ricoperta da un assorbitore al titanio TiNOX (TiNOX GmbH, Munchen, Germany), caratterizzato da un'assorbanza solare del 95% ed una emittanza termica del 4% nelle lunghezze d'onda del range dell'infrarosso. Per ogni fila di vasi è posizionata una lastra di rame di area pari a 6 m².

I sistemi a tubi interrati e a tubi poggiati raffreddano/riscaldano il substrato di coltivazione. Nel sistema piastre la crescita delle piante è influenzata dallo scambio termico dovuto alla presenza di superfici radiative ad alta/bassa temperatura cui la pianta è esposta.

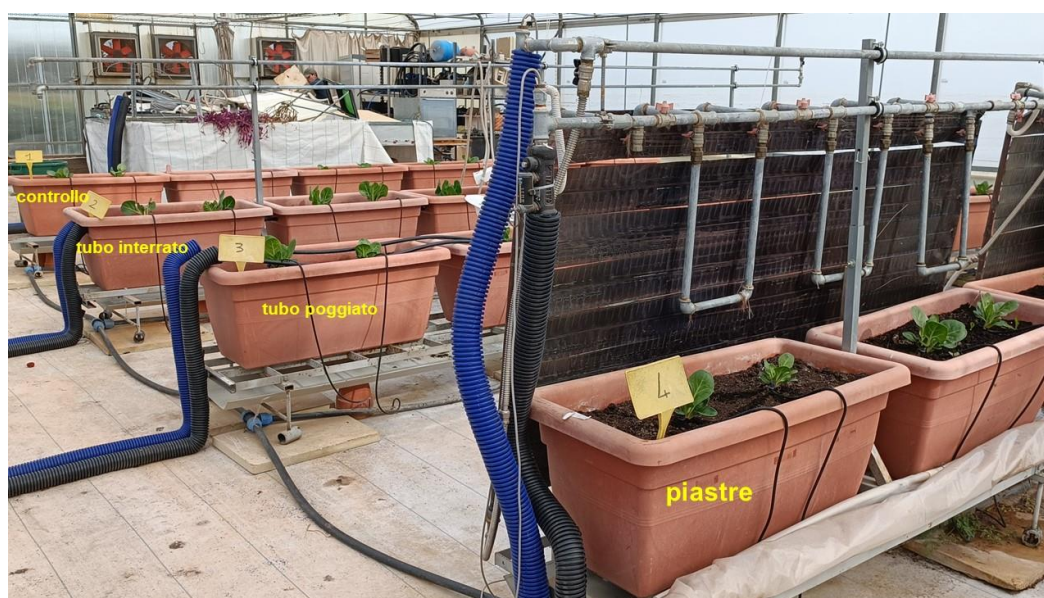


Figura 23. Tre sistemi di distribuzione del freddo/caldo in prossimità delle piante testati durante il 2021 e il controllo (senza condizionamento localizzato) all'interno della serra presso l'Università di Bari.



Figura 24. Sistema di distribuzione del freddo/caldo denominato “piastre”.

2.2.2 Prova sperimentale nel periodo estivo: Configurazione di base con utilizzo di pompa di calore geotermica e solar cooling per raffrescamento

Nell'estate 2021 è stata eseguita una prova agronomica al fine di comparare la crescita di piante coltivate utilizzando 3 diversi sistemi di distribuzione del freddo con la crescita di piante coltivate senza alcun raffrescamento localizzato (controllo). La prova estiva 2021 è stata effettuata su una coltivazione di lattuga Canasta.

La coltivazione condotta fuori suolo è iniziata il 1 Settembre 2021 ed è terminata il 6 ottobre 2021. Le piante sono state monitorate nel corso della prova (Figura 25 e Figura 26).

Le caratteristiche di crescita delle piante sono state misurate durante lo svolgimento della prova. L'altezza delle piante e il numero di foglie per pianta sono stati misurati periodicamente, dal momento del trapianto fino all'inizio del raccolto.

Dopo 35 giorni dal trapianto, le lattughe Canasta sono state raccolte e tutte le piante sono state misurate e pesate. Il peso medio della lattuga variava al variare del sistema di condizionamento localizzato: una lattuga raffrescata con piastre pesava in media 386.63 g; una lattuga non raffrescata localmente pesava in media 358.00 g; una lattuga raffrescata con tubo poggiato pesava in media 347.46 g; una lattuga raffrescata con tubo interrato pesava in media 293.92 g (Tabella 1).

È stato valutato: un incremento di altezza rispetto all'altezza iniziale pari in media a 19.58 cm e un incremento medio di 17.50 foglie rispetto al giorno del trapianto per le lattughe raffrescate con piastre; un incremento di altezza di 16.71 cm e un incremento medio di 17.17 foglie per le piante non raffrescate localmente in alcun modo; un incremento di altezza pari a 15.35 cm e un incremento medio di 17.00 foglie per le piante con sistema di distribuzione del freddo con tubo poggiato; un incremento di altezza pari a 13.79 cm e un incremento medio di 16.92 foglie per le piante con sistema di distribuzione del freddo a tubo interrato (Tabella 1).

La prova sperimentale estiva ha messo in evidenza che il sistema di distribuzione del freddo localizzato con piastre ha determinato un peso medio per lattuga di 386.63 g, valore più alto tra quelli registrati. Il sistema di distribuzione localizzato caratterizzato dalle piastre raffresca le piante mediante superfici radiative. La soluzione di distribuzione del freddo caratterizzata da piastre è risultata essere la migliore dal punto di vista agronomico.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 25. Piante coltivate con i diversi sistemi di distribuzione del freddo: a) tubo interrato; b) tubo poggiato; c) piastre; d) controllo; giorno del trapianto nei vasi.

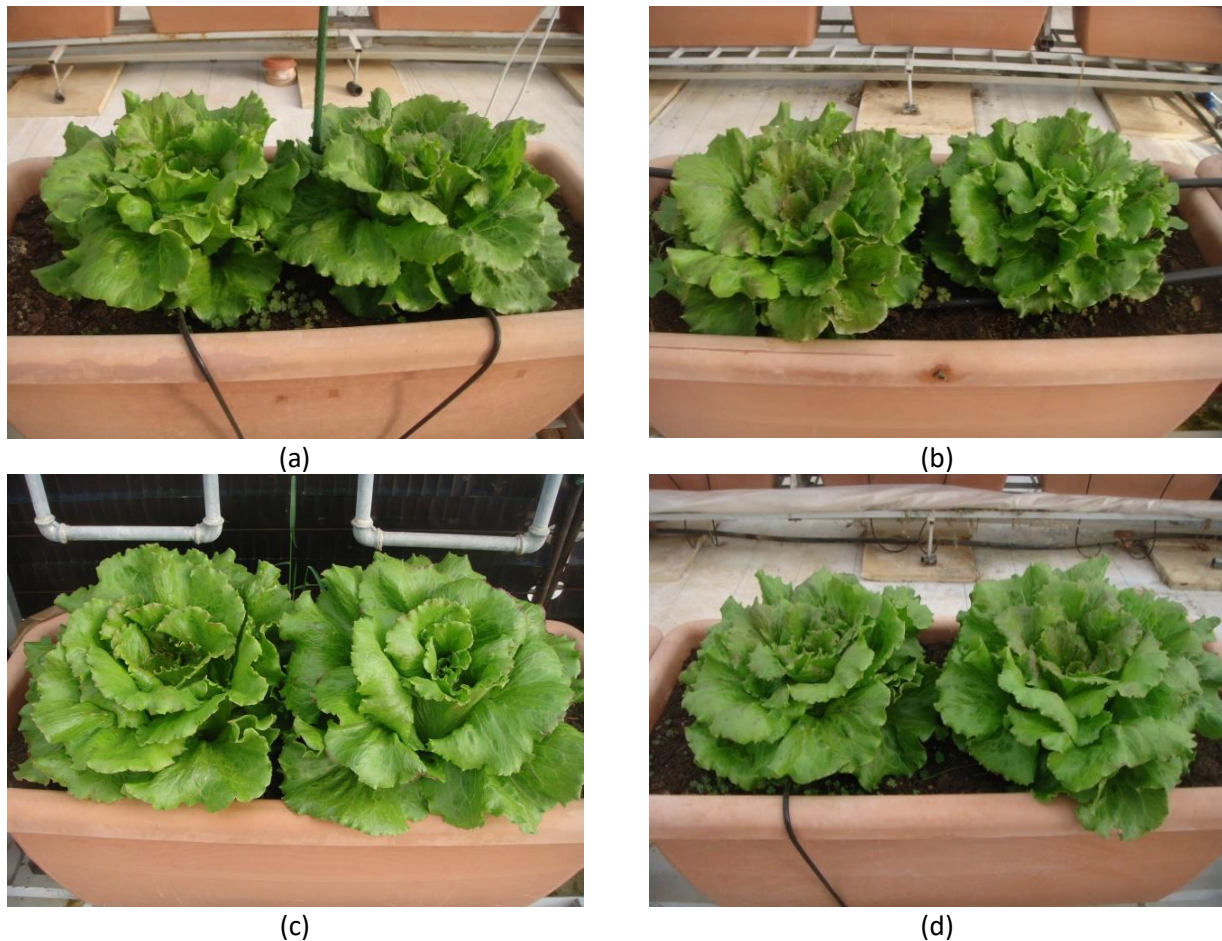


Figura 26. Piante coltivate con i diversi sistemi di distribuzione del freddo: a) tubo interrato; b) tubo poggiato; c) piastre; d) controllo; giorno del raccolto.

Tabella 1. Parametri di crescita delle piante coltivate con i diversi sistemi di distribuzione del freddo a 35 giorni dal trapianto.

	Incremento medio di altezza delle piante rispetto all'altezza iniziale (cm)	Incremento medio di foglie rispetto al giorno del trapianto	peso medio lattuga (g)
Tubo interrato	13.79	16.92	293.92
Tubo poggiato	15.35	17.00	347.46
Piastre	19.58	17.50	386.63
Controllo	16.71	17.17	358.00

2.2.2.1 Parametri climatici esterni, microclima, monitoraggio

I dati relativi alla temperatura dell'aria esterna e alla radiazione solare presso il campo sperimentale nel periodo 1 settembre - 6 ottobre 2021 sono riportati in Tabella 2. La Figura 27 mostra l'andamento della temperatura dell'aria nel periodo analizzato. La massima temperatura è stata misurata il 16 settembre, mentre la minima il 24 settembre. La massima temperatura media giornaliera (27.7 °C) è stata registrata il

16 settembre, la minima (18.9 °C) il 23 settembre. Nella Figura 28 sono riportati i valori giornalieri di radiazione solare cumulata. Il valore massimo, pari a 21.8 MJ m⁻², è stato registrato il 2 settembre, mentre il minimo, 10.0 MJ m⁻², il 17 settembre. La radiazione solare cumulata nell'intero periodo è risultata pari a 597.1 MJ m⁻². In media, sia la temperatura dell'aria che la radiazione solare hanno subito una diminuzione durante il periodo analizzato.

Tabella 2. Massima, media e minima temperatura dell'aria esterna e media della radiazione solare cumulata giornaliera presso il campo sperimentale, 1 settembre-6 ottobre 2021.

Temperatura dell'aria esterna			Radiazione solare cumulata
Massima	Media	Minima	giornaliera media
36.4 °C	22.4 °C	12.6 °C	16.6 MJ m ⁻²

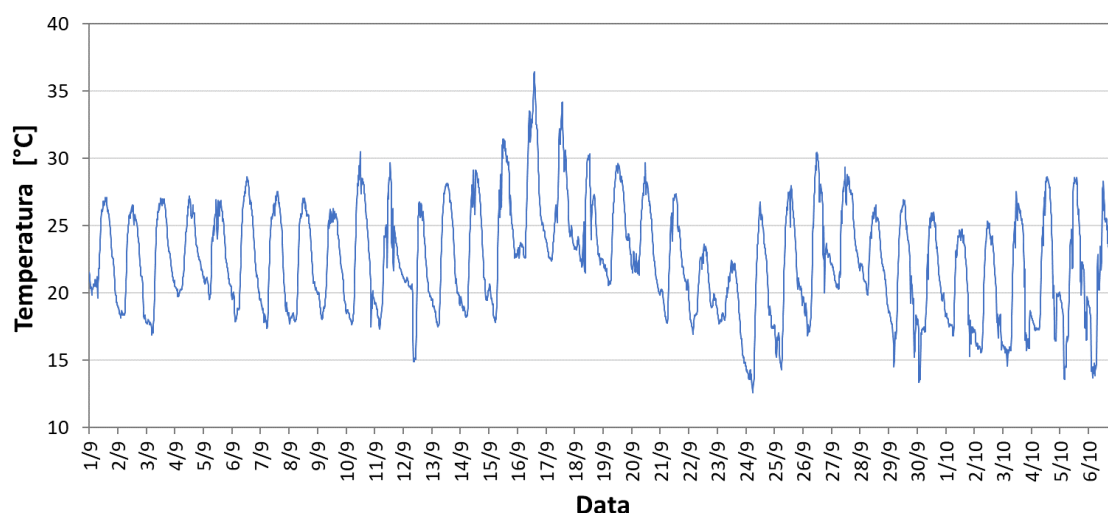


Figura 27. Temperatura dell'aria esterna misurata presso il campo sperimentale, 1 settembre-6 ottobre 2021.

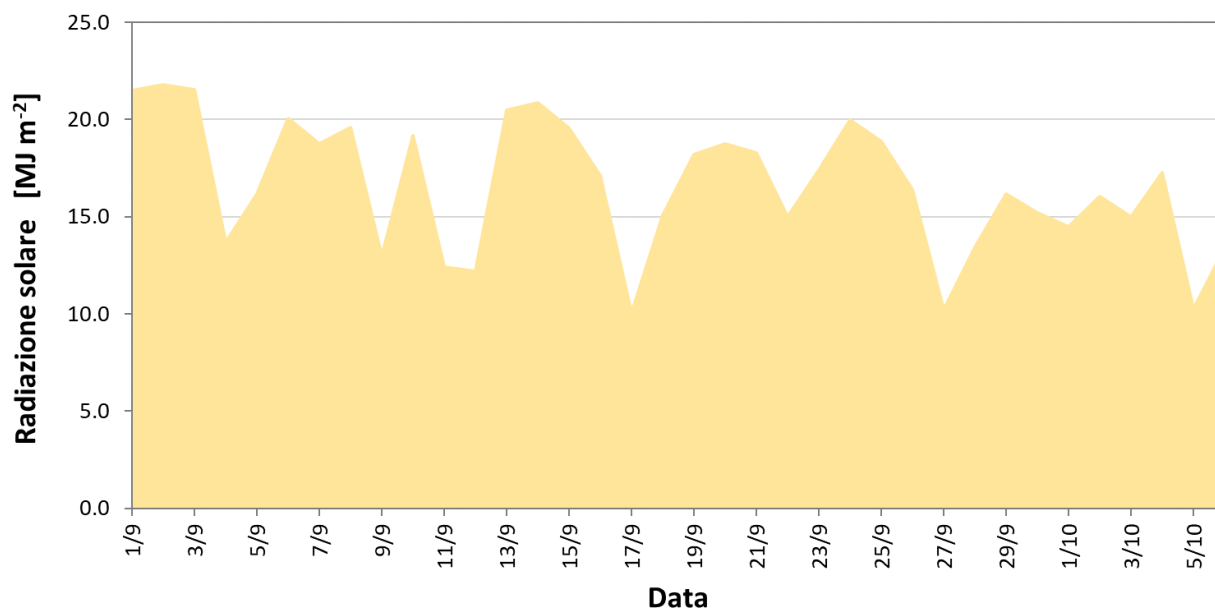


Figura 28. Radiazione solare cumulata giornaliera presso il campo sperimentale, 1 settembre-6 ottobre 2021.

Nell'applicazione che prevede l'uso, per raffrescamento, della pompa di calore geotermica con il sistema ad assorbimento sono stati effettuati test di funzionamento nel periodo estivo 2021.

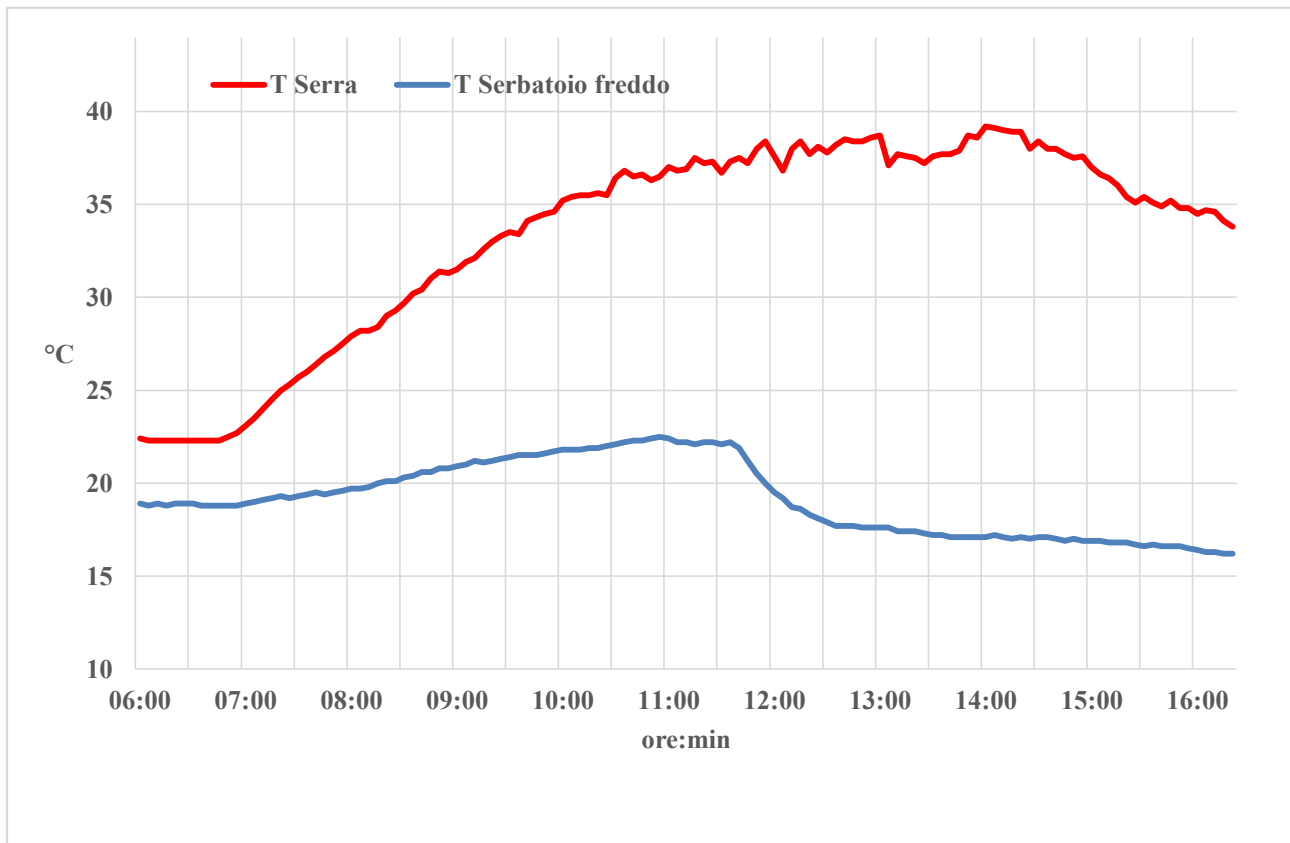


Figura 29. Temperatura dell'aria in serra e temperatura dell'acqua nel serbatoio freddo, alimentato dall'assorbitore, dati registrati il 21/08/2021.

La Figura 29 mostra l'andamento della temperatura dell'aria in serra e dell'acqua nel serbatoio freddo, collegato all'uscita fredda dell'assorbitore. I dati si riferiscono ad una giornata estiva, il 21 agosto, in presenza di radiazione solare piena con assenza di nuvolosità. Nonostante la presenza di elevata radiazione solare il sistema di raffreddamento, basato sui collettori solari termici e sulla macchina ad assorbimento, è stato in grado di fornire acqua raffreddata solo a partire dalle 11.40, quando la temperatura dell'aria in serra aveva raggiunto il valore di 37.5 °C. Questo indica che è necessario utilizzare la pompa geotermica ad integrazione del sistema di solar cooling, in quanto la temperatura in serra sale velocemente sin dalle prime ore del mattino, richiedendo quindi l'uso di energia di raffreddamento.

I risultati ottenuti sono coerenti con quelli della precedente applicazione di una configurazione base estiva, descritta nel Report RdS/PTR2021/144, in cui l'alimentazione di energia termica proveniente dai collettori solari è stata integrata, nelle prime ore della giornata, con la caldaia a biomassa per sopperire al ritardo del sistema solare ad assorbimento.

L'applicazione della pompa di calore geotermica ha consentito di ottenere temperature sufficientemente basse anche nelle prime ore della giornata, quando il solar cooling non è in grado di soddisfare le esigenze di raffreddamento.

La temperatura di set-point della pompa di calore geotermica è stata fissata, per il periodo estivo, a 10 °C; l'acqua erogata dalla pompa di calore geotermica è raccolta da un serbatoio inerziale, in modo da evitare frequenti accensioni e quindi danneggiamenti del compressore. La pompa di calore geotermica è stata tenuta sempre accesa per mantenere la temperatura del serbatoio inerziale al valore di set-point; le accensioni del

compressore della pompa sono state comandate, in pratica, dalla richiesta di energia di raffreddamento che proviene dall'utenza, cioè dalla serra.

Se si analizza una giornata di cielo sereno, il 16/8/2021, si nota che la pompa di calore geotermica, con il serbatoio inerziale, è stata in grado di fornire, nei momenti con maggiore richiesta, acqua in uscita ad una temperatura media di 11.5 °C, mentre la temperatura dell'acqua al ritorno è stata pari in media a 18.6 °C. Nello stesso intervallo temporale la potenza termica di raffreddamento media erogata dalla pompa di calore geotermica è stata pari a 9.8 kW termici, mentre il consumo elettrico pari a 3.7 kW.

La Figura 30 illustra l'andamento temporale della temperatura di mandata dalla pompa di calore geotermica verso la serra, la temperatura di ritorno dalla serra verso la pompa di calore geotermica, e la potenza elettrica assorbita dalla pompa geotermica. Si può notare come la temperatura dell'acqua in uscita dalla pompa di calore geotermica si mantenga poco sopra i 10 °C di set-point, mentre la potenza elettrica assorbita si attesti intorno a valori massimi di 2800 W, con un andamento oscillante in funzione delle accensioni del compressore.

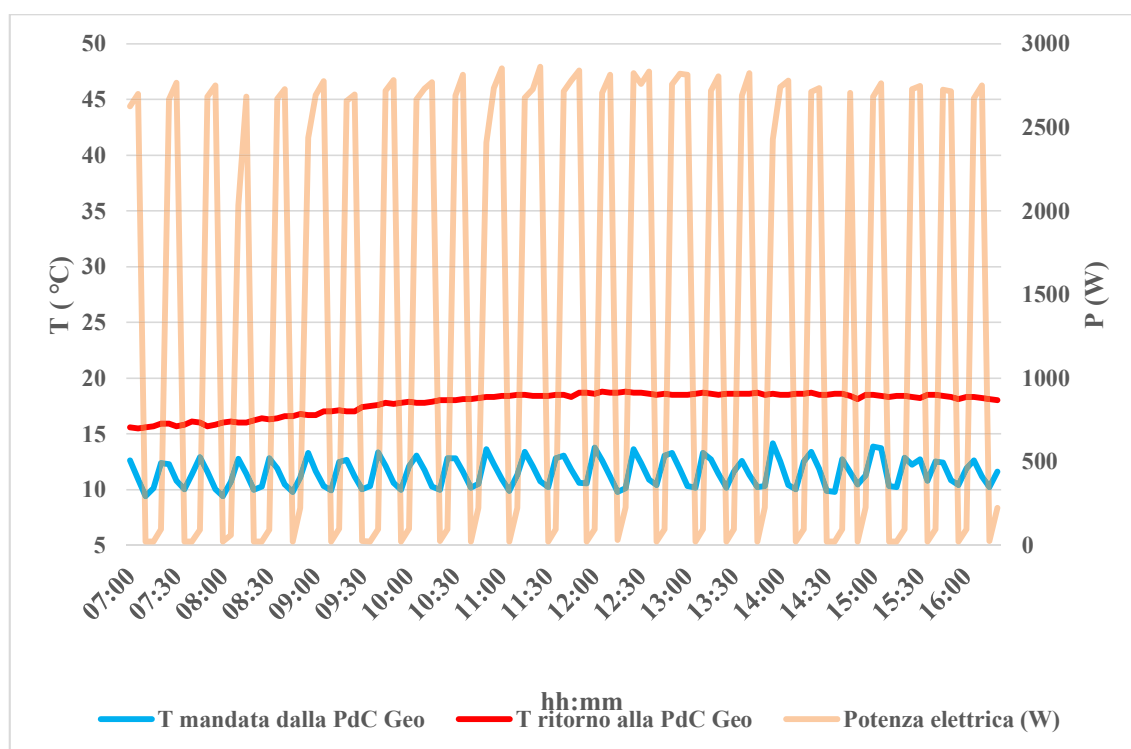


Figura 30. Temperatura di mandata dalla pompa di calore geotermica (PdC Geo) e di ritorno dalla serra, potenza elettrica assorbita dalla pompa geotermica (asse secondario), 18/08/2021.

L'energia di raffreddamento prodotta dalla pompa geotermica è stata convogliata nel serbatoio ausiliario presente in serra, per poi essere distribuita da questo alla zona di coltivazione.

La Figura 31 illustra l'andamento delle temperature di mandata e ritorno sulle linee di coltivazione, sono mostrati i casi di raffreddamento mediante piastre radiative e mediante tubi interrati nel suolo. La temperatura di ritorno dalle piastre risulta più elevata di quella dei tubi interrati nel suolo in quanto quest'ultimo esercita la sua funzione di volano termico, per cui mantiene memoria dell'azione di raffreddamento dei giorni precedenti, mentre le piastre dissipano tutta la loro energia di raffreddamento nell'aria, che ha un'inerzia termica molto inferiore.

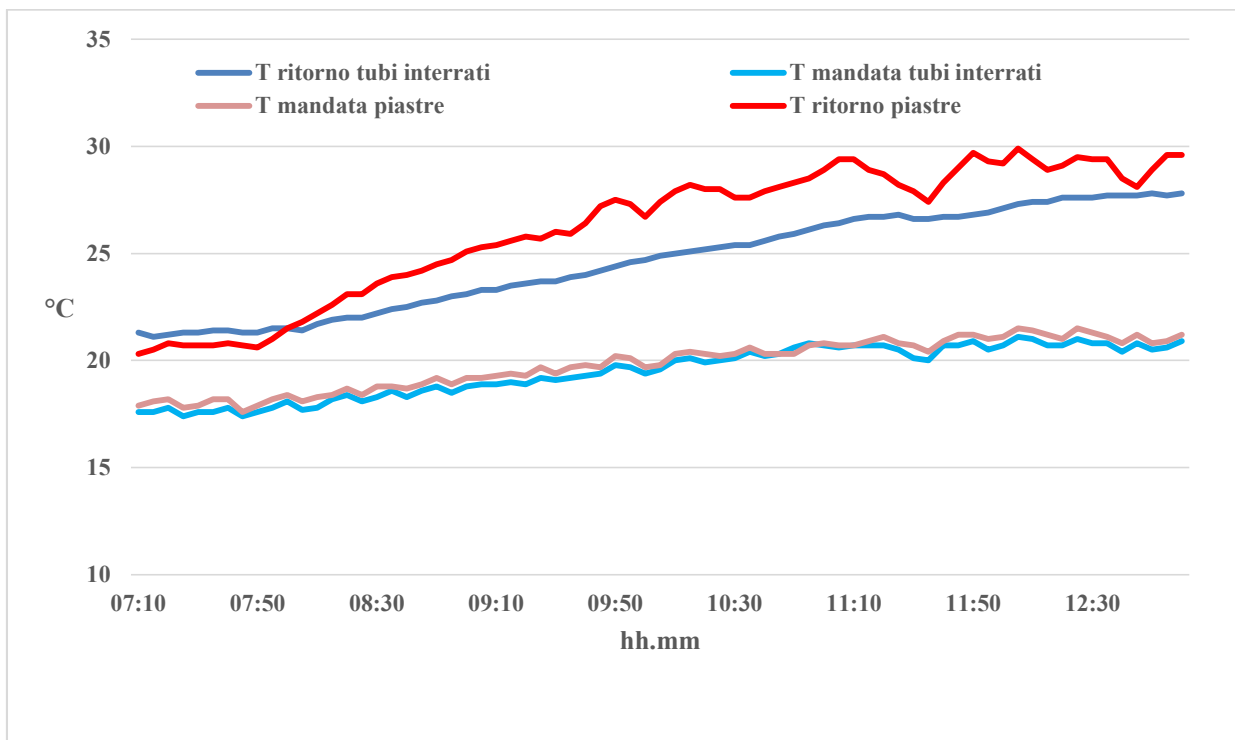


Figura 31. Temperatura di mandata e ritorno sulle linee delle piante nel caso di tubi interrati e di piastre radianti, 18/08/2021.

Nella ricerca sono state analizzate anche le temperature nella zona di coltivazione, con riferimento alle temperature dell'aria e del suolo.

Per quanto concerne l'aria non sono state registrate differenze significative fra le varie tesi.

La Figura 32 mostra le temperature del suolo per i casi di presenza di raffrescamento con piastra radiante, con tubi interrati, con tubi poggiati e per il caso di assenza di raffrescamento. Risulta chiaro l'effetto sulla temperatura del suolo del sistema a tubi interrati, in questo caso si è ottenuto un abbassamento della temperatura del substrato di coltivazione superiore a 10 °C in confronto con il suolo non raffrescato.

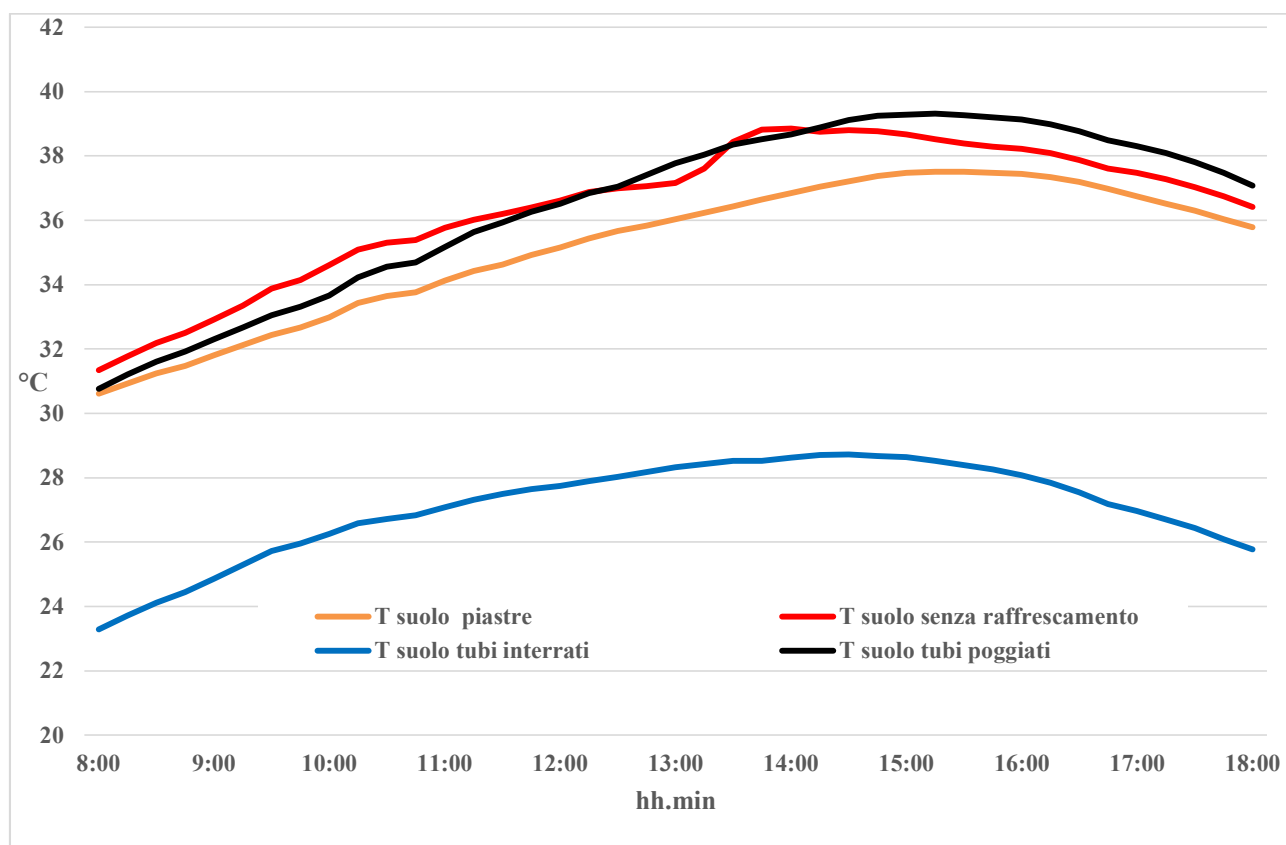


Figura 32. Temperatura del suolo per i casi di presenza di raffreddamento con piastre radianti, con tubi interrati, con tubi poggianti, e per il caso di assenza di raffreddamento, 18/8/2021.

In Appendice sono riportati in Figura A 1 i dati climatici medi e cumulati del periodo compreso tra il 15 maggio e il 15 ottobre 2021. Il database delle condizioni meteorologiche e lo stato dell'impianto di raffreddamento, campionati ogni 15 min, sono riportati nella Tabella A 1 per tre giorni campione del periodo.

2.2.3 Prova sperimentale nel periodo invernale

Nel corso dei mesi di novembre e dicembre 2021 è stata eseguita una prova agronomica su una coltivazione di bietola al fine di comparare la crescita di piante coltivate utilizzando 3 diversi sistemi di distribuzione del caldo con la crescita di piante coltivate senza alcun riscaldamento localizzato (controllo).

La coltivazione condotta fuori suolo è iniziata il 1 novembre 2021 ed è terminata il 31 dicembre 2021. Le piante sono state monitorate nel corso della prova attraverso rilievi fotografici (Figura 33 e Figura 34) e rilievi agronomici.

Le caratteristiche di crescita delle piante, quale l'altezza delle piante e il numero di foglie per pianta, sono stati monitorati periodicamente, dal momento del trapianto fino al raccolto.

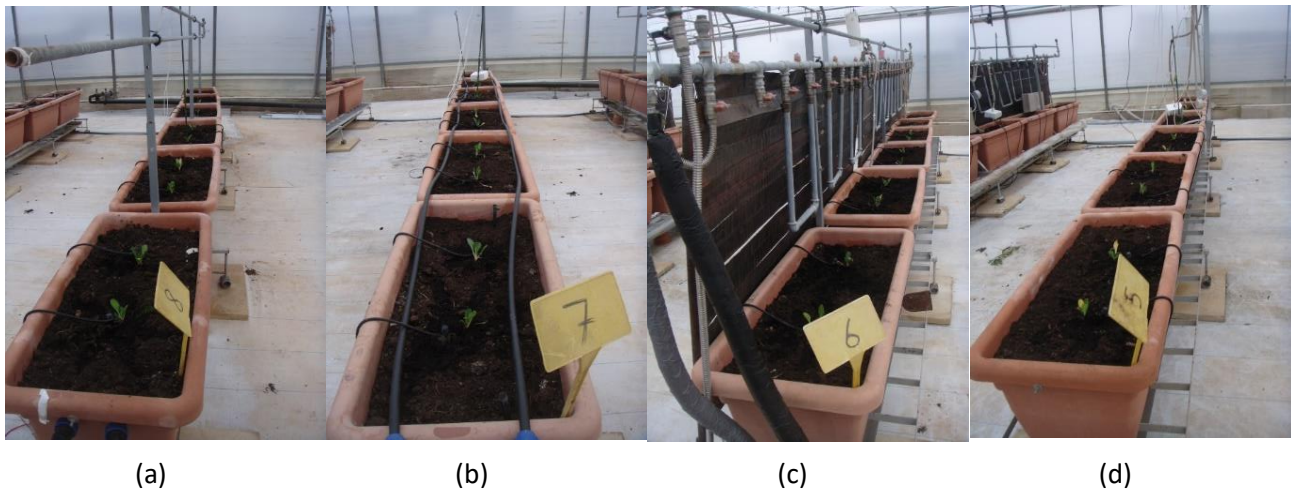


Figura 33. Piante coltivate con i diversi sistemi di distribuzione del caldo: a) tubo interrato; b) tubo poggiato; c) piastre; d) controllo; giorno del trapianto nei vasi.



Figura 34. Piante coltivate con i diversi sistemi di distribuzione del caldo: a) tubo interrato; b) tubo poggiato; c) piastre; d) controllo; giorno del raccolto.

Il giorno del raccolto, tutte le piante di bietole sono state misurate e pesate (Tabella 3). Il peso medio della bietola varia in funzione del sistema di condizionamento localizzato: una bietola riscaldata con tubo interrato pesava in media 324.45 g; una bietola riscaldata con tubo poggiato pesava in media 251.83 g; una bietola riscaldata con piastre pesava in media 217.21 g; una bietola non riscaldata localmente pesava in media 220.92 g. Il maggior raccolto cumulato si è registrato in corrispondenza delle bietole riscaldate con tubo interrato (7787 g) mentre il minor raccolto per le bietole riscaldate con piastre (5213 g).

Il sistema di distribuzione del caldo con tubi interrati nel substrato di coltivazione ha favorito un incremento del raccolto rispetto agli altri sistemi. La crescita delle bietole è stata influenzata dalle temperature del substrato di coltivazione; le più alte temperature del suolo si sono registrate per i sistemi di distribuzione del caldo con tubi interrati e tubi poggiati. La soluzione di distribuzione del caldo con tubi interrati è risultata essere la migliore dal punto di vista agronomico.

Tabella 3. Parametri di crescita delle piante coltivate con i diversi sistemi di distribuzione del caldo.

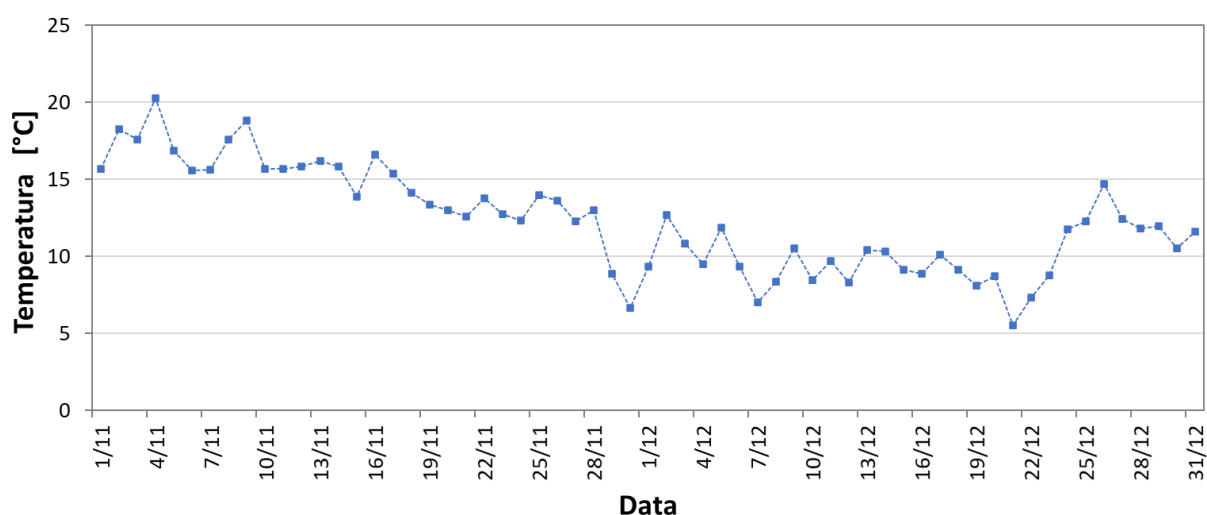
	Incremento medio di altezza delle piante rispetto all'altezza iniziale (cm)	Peso medio per pianta di bietola (g)	Peso cumulato (g)
Tubo interrato	18.50	324.45	7787
Tubo poggiato	19.40	251.83	6044
Piastra	17.96	217.21	5213
Controllo	16.71	220.92	5302

2.2.3.1 Parametri climatici esterni

I dati climatici rilevati presso il campo sperimentale nel periodo invernale 1 novembre - 31 dicembre 2021 sono riportati in Tabella 4. La temperatura massima e quella minima sono state registrate rispettivamente il 2 novembre e il 21 dicembre. I valori medi giornalieri della temperatura dell'aria sono mostrati in Figura 35. Il giorno caratterizzato dalla temperatura dell'aria mediamente più elevata (20.2 °C) è stato il 2 novembre, mentre il giorno con la temperatura media più bassa (5.5 °C) è risultato il 21 dicembre. I valori giornalieri di radiazione solare cumulata sono mostrati in Figura 36. Il maggior apporto giornaliero di radiazione solare, pari a 9.8 MJ m⁻² è stato registrato il 21 novembre, mentre il giorno caratterizzato dal minor irraggiamento solare (1.3 MJ m⁻²) è risultato il 3 dicembre. Complessivamente, la radiazione solare cumulata nell'intero periodo è stata pari a 355.1 MJ m⁻².

Tabella 4. Massima, media e minima temperatura dell'aria esterna e media della radiazione solare cumulata giornaliera presso il campo sperimentale, 1 novembre-31 dicembre 2021.

Temperatura dell'aria esterna			Radiazione solare cumulata giornaliera media
Massima	Media	Minima	
23.1 °C	12.3 °C	1.0 °C	5.8 MJ m ⁻²

**Figura 35. Temperatura media giornaliera dell'aria esterna presso il campo sperimentale, 1 novembre-31 dicembre 2021.**

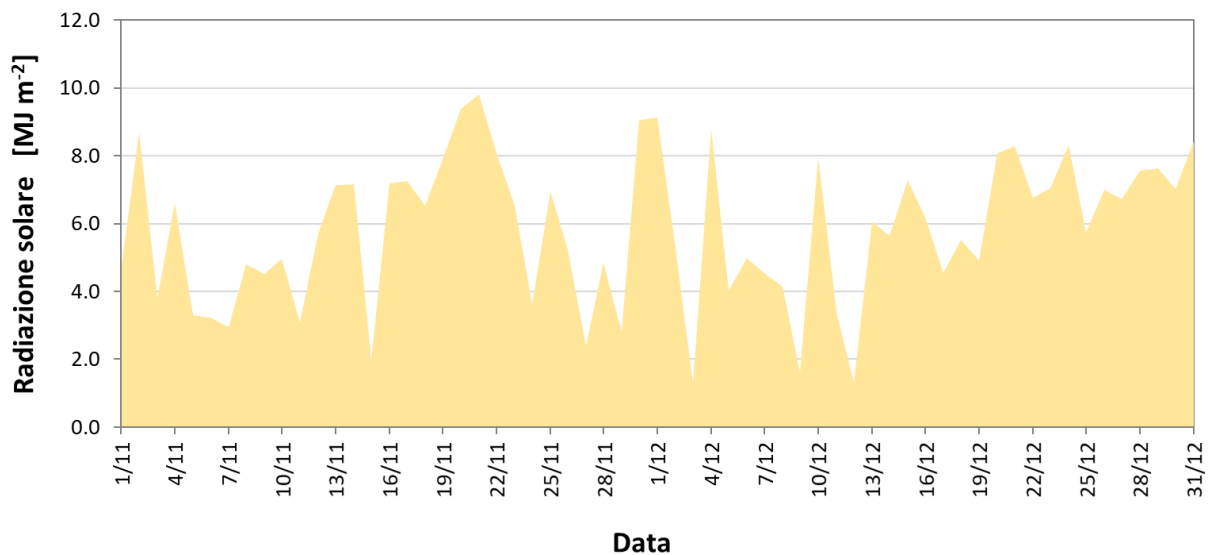


Figura 36. Radiazione solare cumulata giornaliera presso il campo sperimentale, 1 novembre-31 dicembre 2021.

2.2.3.2 Configurazione di base con utilizzo di pompa di calore geotermica e collettori solari: microclima, monitoraggio

Al fine di testare il sistema con una configurazione di base che prevedesse l'utilizzo di collettori solari e pompa di calore geotermica, è stata condotta una campagna sperimentale invernale.

Il sistema è stato configurato in modo da privilegiare l'uso dell'energia solare captata dai collettori solari ed immagazzinata, sotto forma di acqua calda, nel serbatoio di accumulo caldo con capacità pari a 2000 litri.

È stato definito il valore soglia di 44 °C a partire dal quale il sistema poteva attingere acqua calda dal serbatoio di accumulo per inviarla direttamente all'impianto di riscaldamento posizionato nella zona di coltivazione in serra. Tale valore è stato scelto considerando che il riscaldamento è effettuato in serra a bassa entalpia. Il flusso dal serbatoio di accumulo caldo si realizzava finché l'acqua nel serbatoio si manteneva ad una temperatura superiore a 40 °C, per valori inferiori l'acqua per il riscaldamento della serra veniva aspirata dal serbatoio inerziale collegato alla pompa di calore geotermica (Figura 15). La banda di temperatura fra 44 °C e 40 °C è stata fissata per evitare accensioni e spegnimenti continui in prossimità del punto di set-point.

La temperatura di set-point della pompa di calore geotermica è stata fissata a 40 °C, al fine di mantenere tale livello di temperatura nel serbatoio inerziale collegato alla pompa di calore geotermica. L'acqua calda da inviare al riscaldamento della zona di coltivazione in serra è stata attinta da questo serbatoio inerziale quando l'aspirazione dal serbatoio di accumulo caldo, alimentato dai collettori solari, era chiusa in funzione della temperatura dell'acqua in esso presente, se inferiore a 40 °C.

Per quanto riguarda il funzionamento del sistema, particolare attenzione è stata dedicata ad individuare la soglia di scambio, relativa al valore di radiazione solare, fra serbatoio di accumulo caldo e pompa di calore geotermica. La Figura 37 mostra la radiazione solare cumulata giornaliera per otto giorni del periodo novembre-dicembre 2021, la presenza della stella sulle barre indica quando il serbatoio caldo è stato in grado di contribuire al riscaldamento della zona di coltivazione. Risulta evidente che ciò si verifica per valori superiori ad una soglia compresa fra 6.2 MJm⁻² e 6.5 MJm⁻² (Figura 37). Si sottolinea che, considerato il periodo dell'anno, tale valore soglia può essere superato in giornate prevalentemente serene.

Quando la temperatura dell'acqua nel serbatoio di accumulo ha superato i 44 °C, l'accumulo caldo è stato in grado di contribuire parzialmente al riscaldamento della serra. La Figura 38 mostra la temperatura raggiunta dall'acqua del serbatoio di accumulo caldo, alimentato dai collettori solari, in una giornata serena invernale,

insieme con la temperatura e la portata dell'acqua di mandata verso la serra e dalla pompa di calore geotermica.

Si può notare come il sistema di riscaldamento abbia attinto inizialmente dal serbatoio di accumulo caldo quando la pompa di mandata in serra si avviava. Questo avveniva quando la temperatura in serra era inferiore a 15 °C e se la temperatura dell'acqua nel serbatoio caldo era maggiore di 44 °C. Nel giorno analizzato la temperatura massima raggiunta nel serbatoio di accumulo caldo è stata intorno a 50 °C. Quando la temperatura nel serbatoio di accumulo caldo scendeva al di sotto di 40 °C si avviava l'assorbimento dell'acqua dal serbatoio inerziale alimentato dalla pompa di calore geotermica, escludendo il serbatoio di accumulo caldo (Figura 15). L'energia accumulata nel serbatoio caldo è stata sufficiente ad alimentare l'impianto di riscaldamento per 1 ora e 50 minuti, per una quantità di energia termica fornita pari a 73.8 MJ. Nel giorno analizzato, 23/12/2021, la quantità di radiazione solare giornaliera cumulata è stata pari a 7.0 MJm⁻².

La Figura 39 mostra, per un giorno diverso, gli stessi dati illustrati dalla Figura 38, ma in questo caso il sistema ha accumulato una quantità maggiore di energia in relazione alle condizioni climatiche più favorevoli. Infatti, la quantità di energia solare giornaliera cumulata è stata pari a 8.3 MJ/m². Nel giorno analizzato la temperatura massima raggiunta dal serbatoio di accumulo caldo è stata pari a circa 56 °C. L'energia immagazzinata nel serbatoio caldo di accumulo è stata sufficiente ad alimentare l'impianto di riscaldamento per 2 ore e 25 minuti, per una quantità di energia termica pari a 118.1 MJ.

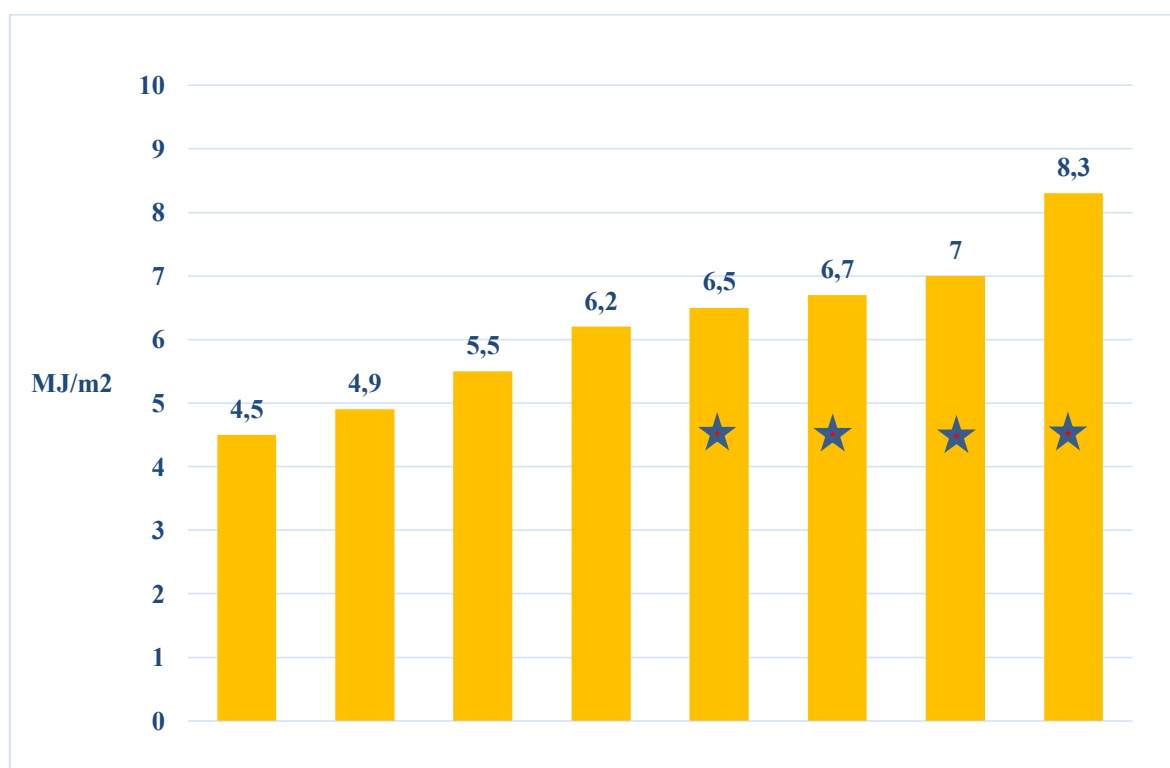


Figura 37. Radiazione solare cumulata giornaliera calcolata per otto giorni di novembre-dicembre 2021; la stella indica i giorni in cui i collettori solari sono stati in grado di accumulare energia termica utile per il riscaldamento della serra.

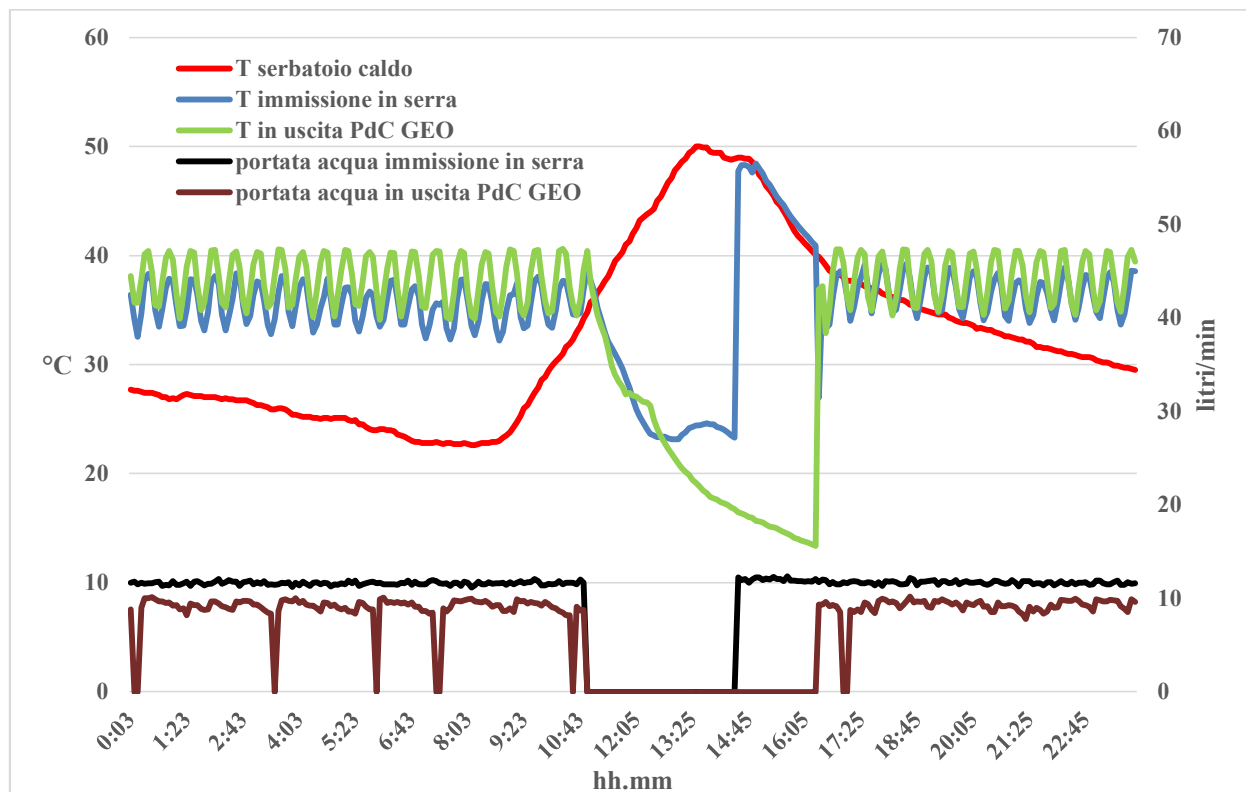


Figura 38. Temperatura dell'acqua nel serbatoio di accumulo caldo, temperatura di mandata verso la serra e dalla pompa di calore geotermica (PdC GEO), portata in litri/min (asse secondario) di acqua calda verso la serra ed in uscita dal serbatoio inerziale alimentato dalla PdC GEO, 23/12/2021.

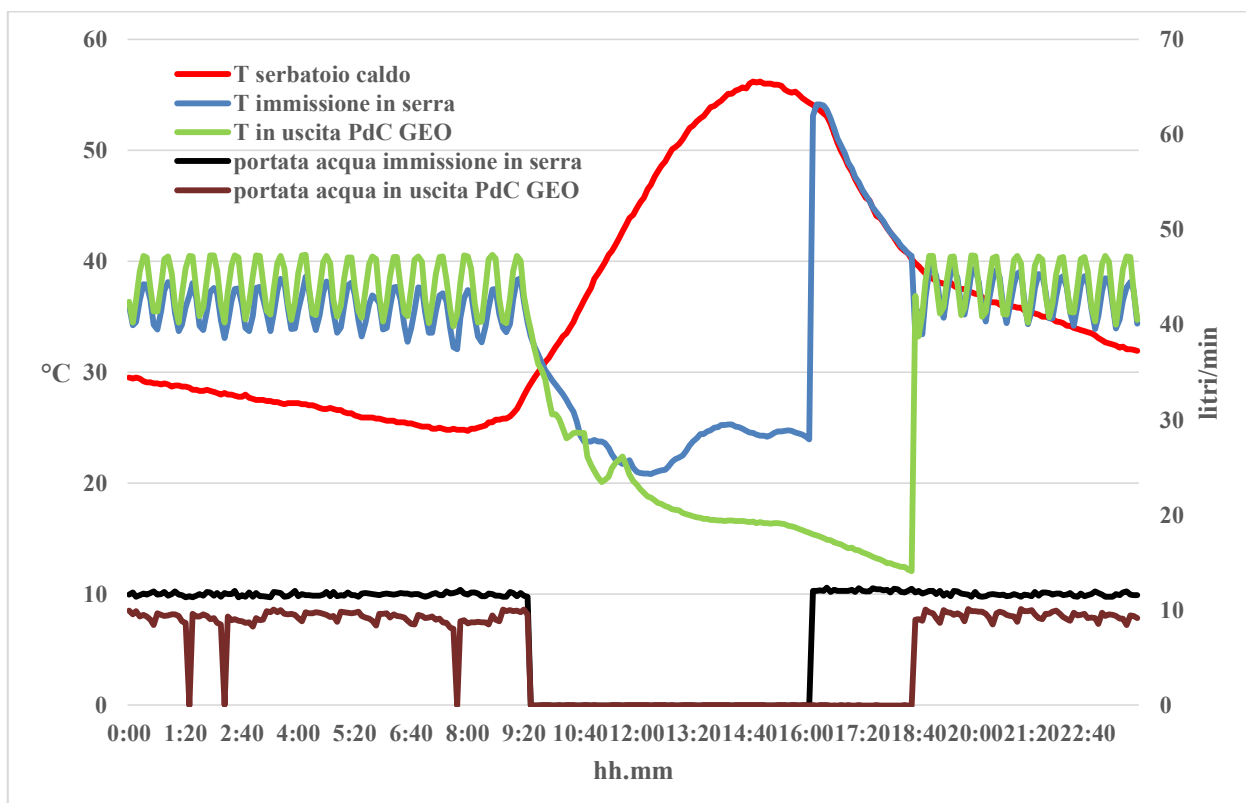


Figura 39. Temperatura dell'acqua nel serbatoio caldo, temperatura di mandata verso la serra e dalla pompa di calore geotermica (PdC GEO), portata in litri/min (asse secondario) di acqua calda verso la serra ed in uscita dal serbatoio inerziale alimentato dalla PdC GEO, 24/12/2021.

Per quanto concerne il funzionamento della pompa di calore geotermica, la Figura 40 illustra il display della macchina che indica le temperature del fluido termovettore in uscita verso il serbatoio inerziale ad essa collegato e da questo di ritorno verso la pompa di calore geotermica. La percentuale indica la percentuale di portata del circolatore.

Considerando i dati illustrati dal display di Figura 40 e la portata del circolatore pari a 29.2 l min^{-1} , la pompa di calore stava erogando una potenza termica pari a 9.4 kW, con una potenza elettrica assorbita pari a 2.8 kW, quindi con un COP pari a 3.3. Si consideri che questo è il valore rilevato istantaneamente.

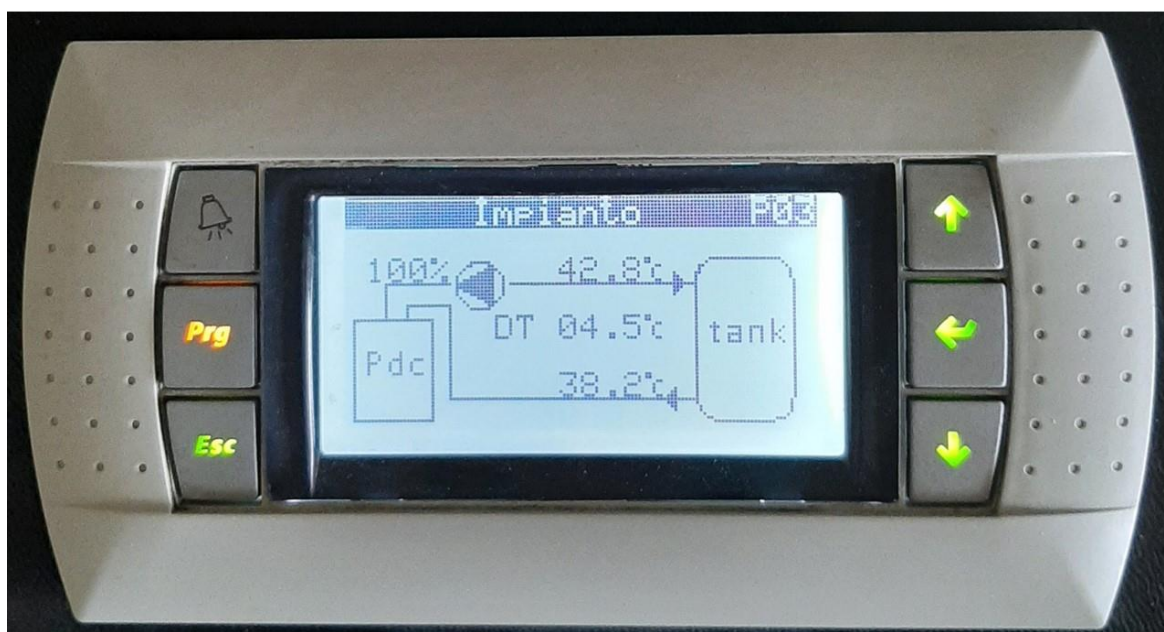


Figura 40. Temperature di uscita del fluido termovettore dalla pompa di calore geotermica (Pdc) verso il serbatoio inerziale (tank) e da questo di ritorno verso la pompa di calore geotermica.

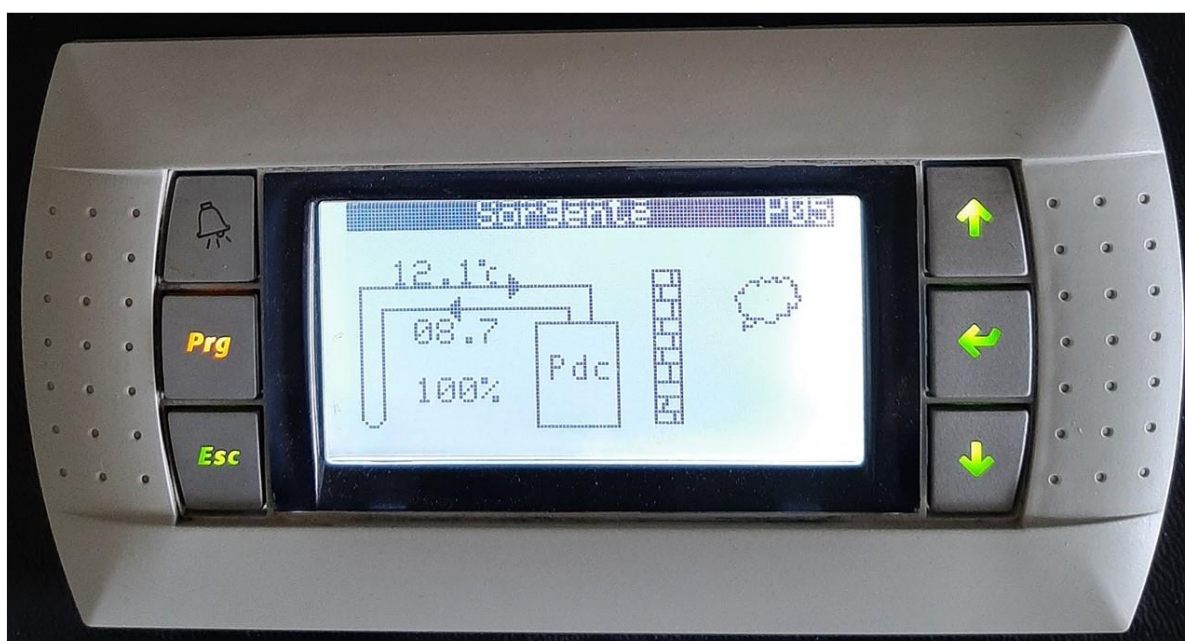


Figura 41. Temperature di uscita del fluido termovettore glicolato dalla pompa di calore geotermica (Pdc) verso la sonda geotermica (sorgente) e da questo di ritorno verso la pompa di calore geotermica.

Allo stesso tempo, prendendo in considerazione i dati illustrati dal display di Figura 41 e considerando la portata del circolatore pari a 38.5 lmin^{-1} , la pompa di calore stava assorbendo dal suolo una potenza termica pari a 9.1 kW. I dati illustrati si riferiscono al periodo freddo invernale, quando la temperatura di risalita del fluido termovettore dalle sonde è stata sempre superiore a 12 °C.

2.2.3.3 Configurazione di base con utilizzo di caldaia a biomassa e collettori solari: microclima, monitoraggio

Nella configurazione di base con utilizzo di caldaia a biomassa e collettori solari per il riscaldamento invernale, la caldaia è stata utilizzata ad integrazione dei collettori solari per il mantenimento della temperatura nel serbatoio di accumulo caldo da 2000 litri. Da questo poi il fluido termovettore è stato inviato per il riscaldamento della zona di coltivazione in serra, previo passaggio per il serbatoio ausiliario da 1000 litri presente in serra.

Le caratteristiche di funzionamento della caldaia a biomassa, alimentata con nocciolino di olivo, hanno consentito di fissare un valore di temperatura di set point non inferiore a 65 °C. Per questo motivo è stato utilizzato un miscelatore sulla linea di mandata verso la zona da riscaldare a bassa entalpia, in modo da mantenere la temperatura del fluido termovettore fra 40 °C e 45 °C. La caldaia richiede circa 20 minuti per andare a regime, per tale ragione non si può ipotizzare un funzionamento dinamico, come nel caso della pompa di calore geotermica, che ha una risposta quasi immediata alla richiesta di energia termica. Il funzionamento della caldaia a biomassa è stato impostato in modo da mantenerla in stato di accensione per il periodo freddo in cui è richiesto il riscaldamento supplementare, lasciando alla stessa caldaia la modulazione della potenza erogata in funzione della richiesta termica, comandata dal serbatoio di accumulo caldo.

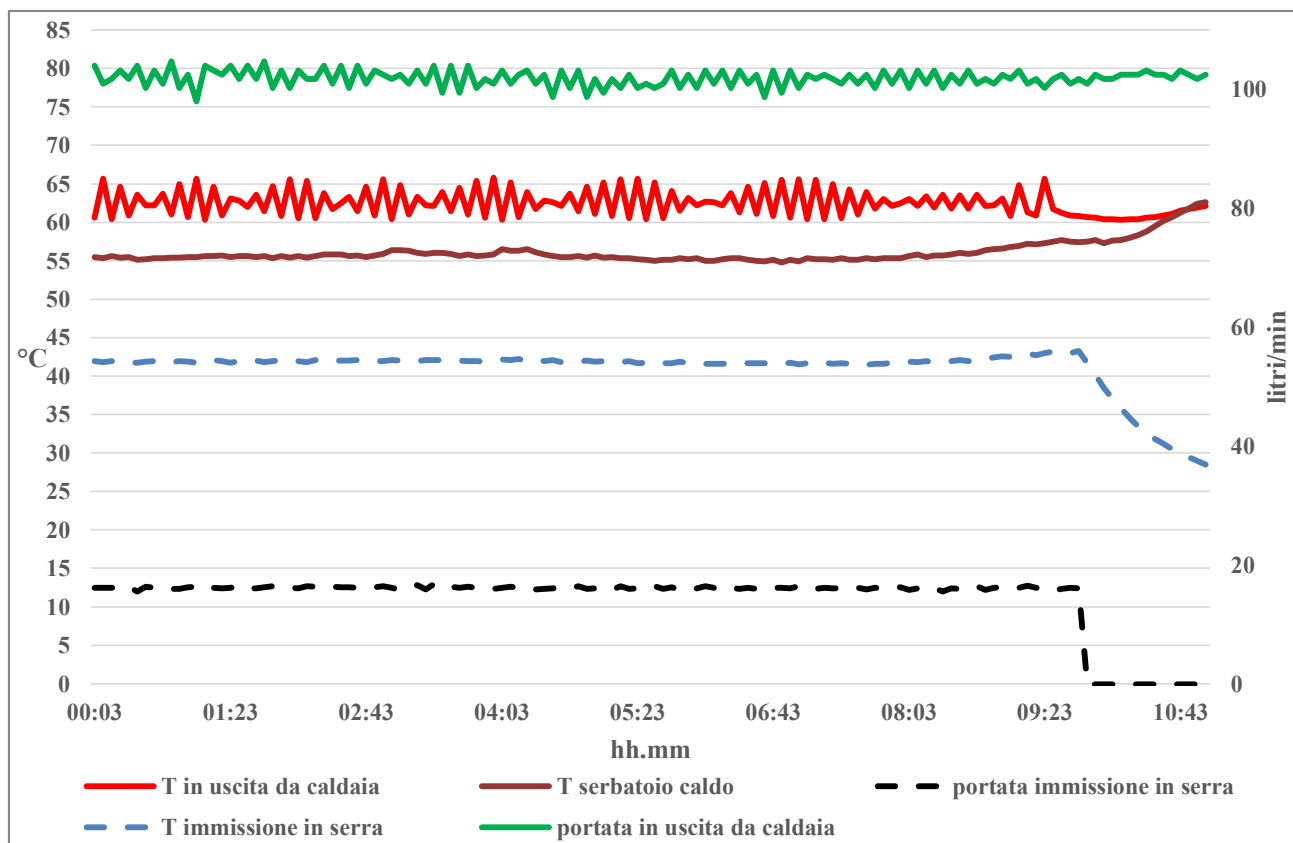


Figura 42. Temperatura dell'acqua nel serbatoio caldo, temperatura di mandata verso la serra, dalla caldaia a biomassa verso il serbatoio caldo, portata in litri/min (asse secondario) di acqua calda verso la serra ed in uscita dalla caldaia a biomassa verso il serbatoio caldo, 28/12/2021.

La

Figura 42 mostra la temperatura del fluido termovettore dalla caldaia a biomassa verso il serbatoio caldo, la temperatura dell'acqua nel serbatoio caldo e la temperatura di mandata del fluido termovettore verso la serra, dopo la regolazione del miscelatore. In

Figura 42 sono inoltre illustrate le portate del fluido termovettore dalla caldaia a biomassa verso il serbatoio caldo e nel circuito di ingresso alla serra.

La caldaia a biomassa è rimasta in funzione per tutta la notte, per poi spegnersi, circa alle 09:30, quando la radiazione solare ha consentito il riscaldamento del fluido nel serbatoio caldo, tramite i collettori solari. Nel contempo, la stessa radiazione solare ha consentito lo spegnimento del sistema di distribuzione del caldo in serra, avendo la temperatura dell'aria in serra superato i 15 °C, fissati come set-point. Il circolatore della caldaia è rimasto in funzione anche dopo lo spegnimento della caldaia, richiedendo questa un certo tempo per la cessazione della combustione e per il raffreddamento.

Nel periodo di funzionamento notturno si può notare come la temperatura del fluido termovettore in uscita dalla caldaia si sia mantenuta fra 60 e 65 °C, avendo impostato il set-point della caldaia a 65 °C (

Figura 42). Allo stesso tempo la temperatura dell'acqua nel serbatoio caldo si è mantenuta sopra i 55 °C. La temperatura di mandata verso la serra ha assunto valori prossimi a 42 °C grazie alla regolazione fornita dal miscelatore di ricircolo.

Durante il periodo di erogazione di energia termica la caldaia ha raggiunto i 30 kW di potenza massima e il consumo, rilevato mediante la pesatura del combustibile apportato, è stato in media pari a 4 kg di nocciolino per ora, cioè sono stati necessari 0.13 kg di combustibile per kWh termico prodotto.

Nel corso della prova sono state registrate, mediante sensori e data logger, anche le temperature dell'aria nella zona di coltivazione. La Figura 43 illustra i valori di temperatura dell'aria nella zona di coltivazione per i casi di presenza di riscaldamento con piastre radianti, con tubi interrati, con tubi poggiati, e per il caso di assenza di riscaldamento.

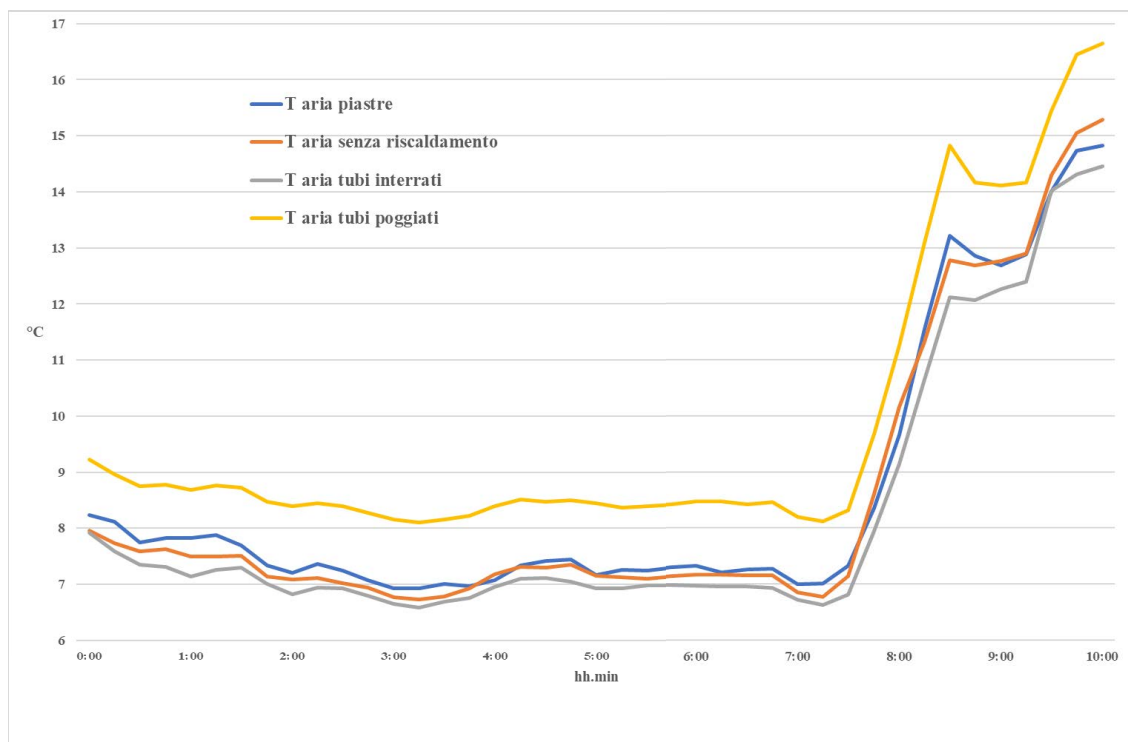


Figura 43. Temperatura dell'aria nella zona di coltivazione per i casi di presenza di riscaldamento con piastre radianti, con tubi interrati, con tubi poggiati, e per il caso di assenza di riscaldamento, 8/12/2021.

L'unico effetto sensibile è stato ottenuto con l'uso dei tubi poggiati sul suolo, in quanto per convezione questi sono stati in grado di riscaldare l'aria a contatto con il suolo e quindi la zona di coltivazione. Le piastre radianti sono state meno efficaci nel riscaldamento dell'aria, in quanto questa è trasparente nella finestra di massima emissione, nell'IR lungo, delle superfici a temperatura ambiente, cioè nel range di lunghezza d'onda fra 7000 nm e 14000 nm. Comunque, le piastre hanno trasferito energia termica direttamente alle piante, sempre per radiazione infrarossa, nel range di lunghezza d'onda dell'IR lungo, dove queste hanno elevata capacità di assorbimento di tale radiazione.

Nell'ambito delle coltivazioni realizzate in serra, caratterizzate da alto valore aggiunto, si preferisce spesso riscaldare il substrato di coltivazione piuttosto che l'aria, essendo tale sistema più efficiente nel trasferimento dei benefici del riscaldamento alle piante, in relazione alla resa produttiva. Per tale ragione sono stati investigati, nella presente ricerca, anche sistemi finalizzati a riscaldare direttamente il suolo.

In relazione al riscaldamento del suolo sono stati utilizzati sensori utili a misurare i valori di temperatura nel suolo per le diverse tipologie di riscaldamento utilizzate. I dati sono stati registrati dal data logger durante il test.

Gli effetti delle diverse tipologie di riscaldamento sul suolo sono illustrati in Figura 44. Risulta evidente l'effetto dei tubi interrati, che hanno fatto registrare incrementi della temperatura del suolo prossimi a 9 °C. Visibile, ma meno evidente, l'effetto dei tubi poggiati sulla temperatura del substrato di coltivazione.

I dati climatici medi e cumulati del periodo 1 novembre – 31 dicembre 2021 sono illustrati in Appendice nella Figura A 2. Il database delle condizioni meteorologiche e dello stato dell'impianto di riscaldamento, campionati ogni 15 min, per tre giorni campione del periodo sono registrati nella Tabella A 2.

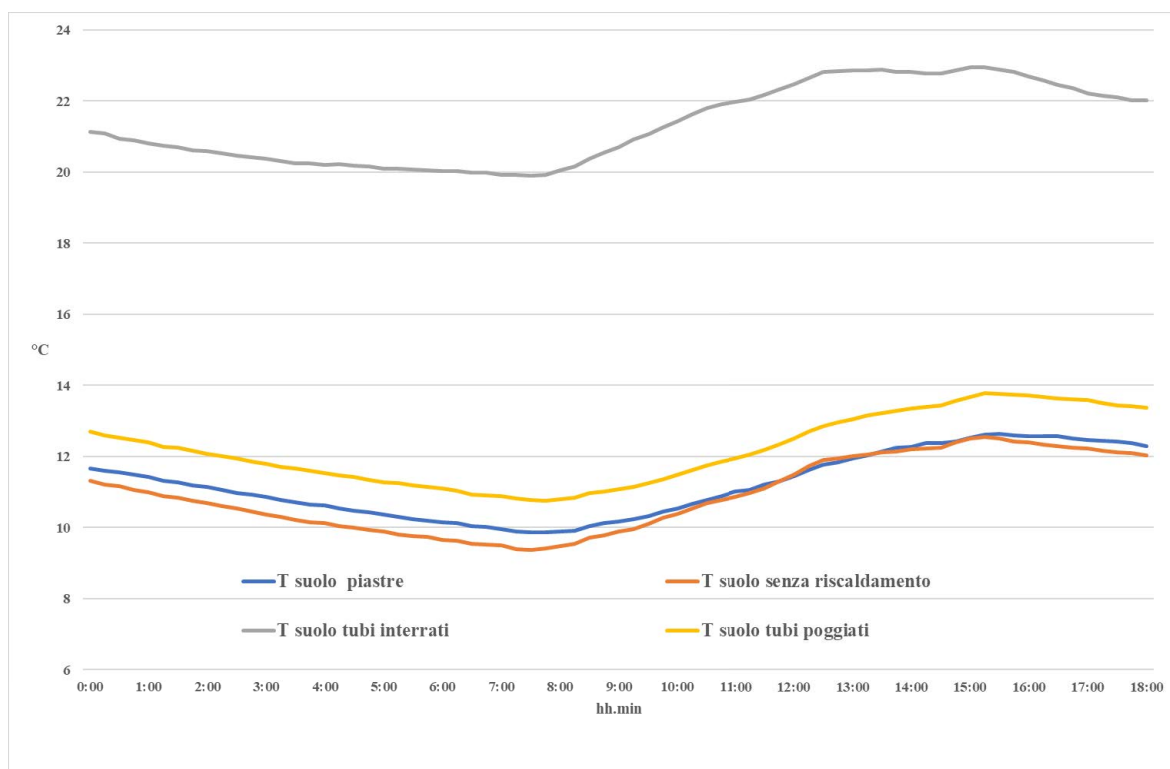


Figura 44. Temperatura del suolo nella zona di coltivazione per i casi di presenza di riscaldamento con piastre radianti, con tubi interrati, con tubi poggiati, e per il caso di assenza di riscaldamento, 8/12/2021.

2.2.4 Parametri caratteristici dell'impianto e costi di funzionamento

Nel caso si volesse valutare la differenza di costo di esercizio fra caldaia a biomassa e pompa di calore geotermica, utilizzando i dati disponibili si possono fare delle considerazioni per il periodo invernale. La

caldaia a biomassa, con la temperatura di set-point di 65 °C, erogando la potenza di 30 kW, in inverno ha consumato in media 4 kg di nocciolino per ora, cioè 0.13 kg per kWh termico prodotto. Al costo di 0.32 euro per kg di nocciolino, ogni kWh termico ha un costo pari a 0.04 euro, incluso il trasporto e l'IVA.

La pompa di calore geotermica, a titolo di esempio, nel periodo più freddo, ha registrato un consumo elettrico pari a 1.088 kW quando ha fornito 4.316 kW termici, quindi con un COP di 3.97. Il valore dichiarato dal produttore per il COP è pari a 4.68. Se si considera un costo di acquisto del kWh elettrico pari a 0.2 euro, con il COP ottenuto, il costo di 1 kWh termico prodotto con la pompa di calore geotermica è stato pari 0.05 euro.

I valori della portata del fluido termovettore (acqua calda e/o fredda) misurati nelle tubazioni di collegamento dei diversi sistemi che compongono l'impianto di poligenerazione sono evidenziati nella Tabella 5. Il posizionamento dei flussimetri (F1-F8) è indicato nella Figura 12 e nella Figura 13.

Tabella 5. Portata del fluido termovettore (acqua calda e/o fredda).

Flussimetri		Portata (l min ⁻¹)
F1	dai collettori solari al serbatoio caldo	42
F2	dal serbatoio caldo all'assorbitore	48
F3	dall'assorbitore alla torre evaporativa	168
F4	dall'assorbitore al serbatoio freddo	30
F5	verso la serra	12
F7	in uscita dalla caldaia a biomassa verso il serbatoio caldo	103
F8	in uscita dalla pompa di calore geotermica	10

2.3 Valutazione del sistema stoccaggio di energia elettrica.

Il campo sperimentale del Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali dell'Università di Bari, localizzato presso il Centro sperimentale "P. Martucci" in Valenzano (BA), è dotato di un impianto fotovoltaico (Figura 45). La fonte di energia rinnovabile solare è un fonte energetica intermittente legata alle condizioni meteorologiche; è importante prevedere soluzioni di stoccaggio della produzione elettrica fotovoltaica.



Figura 45. Impianto fotovoltaico presso l'Università di Bari.

L'impianto è costituito da 2 blocchi di moduli fotovoltaici: il primo consiste in 24 moduli fotovoltaici e il secondo in 9. Il sistema fotovoltaico è costituito da moduli in silicio policristallino. I pannelli sono stati

installati su strutture realizzate in acciaio zincato a caldo e posizionati a terra con sistema di ancoraggio al suolo. I pannelli sono esposti a sud con angolazione rispetto al piano orizzontale pari a 30° , per massimizzare la produzione annuale di energia elettrica in funzione della latitudine del sito.

I 24 moduli fotovoltaici sono raggruppati in due blocchi di 12 moduli collegati in serie; le due serie sono collegate in parallelo in modo da ottenere una potenza di picco pari a 5,76 kW.

I 9 moduli fotovoltaici sono collegati in serie in modo da ottenere una potenza di picco pari a 1.62 kW.

Due soluzioni di stoccaggio della produzione elettrica fotovoltaica sono state confrontate: immissione in rete elettrica di distribuzione e accumulo in batterie.

La presenza di un inverter di rete consente la conversione dell'energia rinnovabile prodotta dai moduli fotovoltaici da continua (DC) in corrente alternata (AC) e l'immissione nella rete elettrica di distribuzione nazionale della produzione fotovoltaica. L'utilizzo della rete nazionale per lo stoccaggio dell'energia elettrica è risultato affidabile consentendo anche l'alimentazione di utenze con elevati valori di picco.

Sono stati eseguiti anche alcuni test collegando i moduli fotovoltaici al sistema di batterie di accumulo (Figura 46). Questo è composto da dodici celle da 2 V, fabbricate dalla FIAMM Company, collegate in serie per realizzare una capacità totale di 630 Ah ed un voltaggio di 24 V.

Alle batterie è collegato un regolatore di carica impiegato per regolare la potenza in uscita dal campo fotovoltaico. È presente inoltre un inverter, connesso alle batterie, allo scopo di fornire voltaggio a corrente alternata per alimentare le utenze con tensione pari a 220 V. L'inverter ha un voltaggio di input di 24 V ed una potenza di 2200 VA.

L'utilizzo delle batterie per stoccare l'energia prodotta è risultato non funzionale in relazione alle potenze richieste dalle utenze e ai valori di picco di corrente.

Sarebbe stato necessario ampliare il sistema di stoccaggio a batterie ma questo sarebbe stato eccessivamente costoso.

La soluzione migliore evidenziata è l'immissione della produzione elettrica fotovoltaica nella rete di distribuzione elettrica nazionale.



Figura 46. Sistema di batterie di accumulo presso l'Università di Bari.

2.4 Pubblicazioni del gruppo di ricerca

I risultati ottenuti dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari e dall'ENEA UTEE AGR non sono stati presentati durante convegni o incontri durante il 2021 per le restrizioni imposte a causa del COVID-19 a livello nazionale ed internazionale.

Un articolo è stato pubblicato:

1. Schettini, E., Puglisi, G., Convertino, F., Cancellara, F. A., & Vox, G., "Greenhouse localized heating powered by a polygeneration system", *Journal of Agricultural Engineering*, 52(3) (2021). 6 pages. <https://doi.org/10.4081/jae.2021.1205>

3. Conclusioni

Le esigenze di condizionamento climatico nella filiera agro-alimentare fanno emergere la necessità di utilizzo di sistemi innovativi basati sullo sfruttamento di fonti energetiche diversificate e rinnovabili.

L'attività di ricerca dell'Università di Bari si è focalizzata sulla realizzazione di condizioni ambientali idonee alle coltivazioni in atto mediante l'applicazione di sistemi di raffrescamento e riscaldamento localizzato in serra. Lo studio è stato supportato da una campagna di sperimentazione su una serra sperimentale raffrescata mediante l'impianto di solar cooling integrato con la pompa di calore geotermica e riscaldata utilizzando sia i collettori solari integrati con la pompa di calore geotermica sia i collettori solari integrati con la caldaia a biomassa alimentata con nocciolino di ulivo.

La prova sperimentale condotta nel periodo estivo ha permesso di evidenziare la necessità di integrare il sistema di solar cooling con il contributo del sistema geotermico, dato il ritardo del sistema solare rispetto alle esigenze di raffrescamento dell'utenza (soprattutto nelle prime ore del mattino).

D'altra parte, le prove eseguite nel periodo invernale hanno mostrato che nei periodi più freddi dell'anno, soprattutto in caso di giornate non serene e di notte, il sistema solare non è sempre in grado di contribuire, seppur parzialmente, alle esigenze di riscaldamento. È emersa, quindi, la necessità di un'integrazione, mediante sistema geotermico o caldaia a biomassa. Dal punto di vista del costo di esercizio, questi due sistemi (geotermico e a biomassa) non hanno presentato differenze significative. Per quanto riguarda i sistemi di distribuzione del freddo/caldo alla zona di coltivazione in serra, sono state sperimentate e monitorate tre diverse soluzioni. Un primo sistema di distribuzione del freddo/caldo prevede l'impiego di tubi interrati nel substrato di coltivazione, un secondo sistema prevede l'impiego di tubi poggiati sul substrato di coltivazione, il terzo sistema utilizza piastre poste nella zona areale delle piante.

Sulla base dei dati raccolti, si può concludere che in estate il sistema di distribuzione del freddo localizzato con piastre ha favorito una maggiore crescita delle piante e un incremento del raccolto rispetto agli altri sistemi. Le piante sono state raffrescate mediante le superfici radiative delle piastre. La soluzione di distribuzione del freddo caratterizzata da piastre è risultata essere la migliore dal punto di vista agronomico.

In inverno il sistema di distribuzione del caldo con tubi interrati nel substrato di coltivazione ha favorito una maggiore crescita delle piante e un incremento del raccolto rispetto agli altri sistemi. La soluzione di distribuzione del caldo con tubi interrati è risultata essere la migliore dal punto di vista agronomico.

Sono state, inoltre, fatte valutazioni circa le possibili strategie di gestione e stoccaggio dell'energia elettrica prodotta attraverso l'impianto fotovoltaico di cui il centro sperimentale è dotato. Si è concluso che l'immissione nella rete elettrica nazionale rappresenta l'alternativa migliore e più funzionale, tenuto conto delle potenze richieste dalle utenze e dei valori di picco di corrente.

Nel complesso, la sperimentazione eseguita nel corso dei tre anni ha evidenziato il funzionamento, le potenzialità, le caratteristiche costruttive, i vantaggi agronomici e ambientali del sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili presente presso il Centro sperimentale "P. Martucci" dell'Università di Bari. Nei tre anni la climatizzazione estiva e invernale dell'ambiente confinato è stata eseguita utilizzando solar

cooling/heating, caldaia a biomassa, pompa di calore aria-acqua e sonde geotermiche accoppiate a una pompa di calore. La ricerca condotta ha dimostrato l'efficacia e l'efficienza di questi impianti tecnologici a basso impatto ambientale per la coltivazione in ambiente protetto.

La realizzazione di un sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili presso un centro sperimentale universitario è importante per la capacità dell'università di diffondere risultati a livello locale, regionale, nazionale e internazionale. I risultati ottenuti possono essere diffusi tra studenti, ricercatori, imprenditori agricoli, tecnici, associazioni di categoria, imprese fornitrici di servizi ad aziende agricole, imprese fornitrici di impianti di climatizzazione, tecnici ed aziende specializzati nella progettazione di sistemi di protezione delle colture. I risultati ottenuti possono contribuire: all'efficientamento energetico degli impianti serra esistenti; alla riduzione dell'impatto ambientale delle produzioni serra; alla riduzione dei costi di produzione di colture che necessitano di elevati input energetici; all'incremento della competitività delle aziende produttrici in ambiente protetto.

4. Riferimenti bibliografici

1. Al-Ibrahim, A., Al-Abbadi, N., Al-Helal, I., "PV greenhouse system – system description, performance and lesson learned", *Acta Hortic.*, 710 (2006), pp. 251–264, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.710.26>.
2. M. S. Ahamed, H. Guo, K. Tanino, "Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses", *Biosystems Engineering*, 178 (2019), pp. 9-33, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017.
3. E. Fabrizio, "Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection" *Energy and Buildings*, 53 (2012), pp. 57 – 63, DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.07.003
4. FAO, 2019. Early Warning Early Action Report on Food Security and Agriculture.
5. M. Ghoulam, K. El Moueddeb, E. Nehdi, R. Boukhanouf, J. K. Calautit, "Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status", *Biosystems Engineering*, 183 (2019), pp. 121-150, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.016>.
6. S. Gorjian, F. Calise, K. Kant, M. S. Ahamed, B. Copertaro, G. Najafi, X. Zhang, M. Aghaei, R. R. Shamshiri, "A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses", *Journal of Cleaner Production*, 285 (2021), paper number 124807, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124807>.
7. M. Kumar, D. Haillot, S. Gibout, "Survey and evaluation of solar technologies for agricultural greenhouse application", *Solar Energy*, 232 (2022), pp. 18-34, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.033>.
8. McCartney, L., Lefsrud, M.G., "Protected agriculture in extreme environments: A review of controlled environment agriculture in Tropical, arid, polar, and urban locations", *Appl. Eng. Agric.*, 34 (2018), pp. 455–473, <https://doi.org/10.13031/aea.12590>.
9. Mariani, L., Cola, G., Bulgari, R., Ferrante, A., Martinetti, L., "Space and time variability of heating requirements for greenhouse tomato production in the Euro- Mediterranean area", *Sci. Total Environ.*, 562 (2016), pp. 834–844, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.057>.
10. O'Sullivan CA, Bonnett GD, McIntyre CL, Hochman Z, Wasson AP., "Strategies to improve the productivity, product diversity and profitability of urban agriculture", *Agric. Syst.*, 174 (2019), pp. 133–44, <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.05.007>.
11. Trypanagnostopoulos, G., Kavga, A., Souliotis, M., Tripanagnostopoulos, Y., "Greenhouse performance results for roof installed photovoltaics", *Renew. Energy*, 111 (2017), pp. 724–731, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.066>.
12. G. Vox, M. Teitel, A. Pardossi, A. Minuto, F. Tinivella, E. Schettini, "Chapter 1: Sustainable Greenhouse Systems", *Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management* (2010), Augusto Salazar e Ismael Rios Editors, Nova Science Publishers, Inc. NY USA. ISBN: 978-1-60876-269-9: 1-79.

13. T. Weidner, A. Yang, M. I. W. Hamm, "Energy optimisation of plant factories and greenhouses for different climatic conditions", *Energy Conversion and Management*, 243 (2021), paper number 114336, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114336>.
14. Yildirim, N., Bilir, L., 2017. "Evaluation of a hybrid system for a nearly zero energy greenhouse", *Energy Convers. Manage.*, 148 (2017), pp. 1278–1290, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.068>.

5. Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro ha una lunga tradizione nell'insegnamento e nella ricerca scientifica nel campo dell'ingegneria agraria. L'area scientifica di maggiore interesse riguarda lo studio degli aspetti ingegneristici relativi alle strutture, agli impianti, ai materiali e all'energia concernenti gli insediamenti produttivi agricoli quali serre, allevamenti e industrie di trasformazione dei prodotti agricoli.

Le ricerche condotte dal gruppo di ricerca del Dipartimento DISAAT sono finalizzate a ridurre l'impatto ambientale dei sistemi produttivi agricoli mediante l'individuazione di impianti e materiali finalizzati alla riduzione dei consumi energetici, alla gestione dei reflui prodotti e all'introduzione delle energie rinnovabili.

Il gruppo di ricerca ha partecipato a numerosi progetti europei e nazionali, tra i quali: EC RTD "Biodegradable plastics for environmentally friendly mulching and low tunnel cultivation- Bioplastics" (2001-2005); EC LIFE Environment "Biodegradable coverages for sustainable agriculture – BIO.CO.AGRI." (2003-2005); EC CRAFT "Development of protective structures covered with permeable materials for agricultural use - AGRONETS" (2003-2006); EC Collective Research "Labelling agricultural plastic waste for valorising the waste stream - LABELAGRIWASTE" (2006-2009); MIPAF "Ricerche per il miglioramento della frutticoltura meridionale – FRU.MED." (2005-2011); Piano Annuale di Realizzazione 2012 "Modelli per l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici mediante la copertura con essenze vegetali in ambiente mediterraneo"; Piano Annuale di Realizzazione 2013 "Eco-Greenroof & Vertical Greenery System"; Piano Annuale di Realizzazione 2015 "Sistemi di climatizzazione innovativi per edifici e sistemi serra"; Piano Annuale di Realizzazione 2016 "Analisi comparativa e sviluppo di sistemi di distribuzione del freddo negli impianti di raffrescamento solare per serra"; Piano Annuale di Realizzazione 2017 "Analisi di tecniche di raffrescamento sostenibili applicabili in edifici civili e in edifici serra"; Piano Annuale di Realizzazione 2018 "Studio di tecniche di realizzazione di un prototipo di edificio con parete verde a microclima controllato per testare il modello del flusso energetico tra la parete verde e la superficie dell'edificio"; European Territorial Cooperation Programme Greece-Italy 2007-2013 "Agricultural Waste valorisation for a competitive and sustainable Regional Development - AWARD" (2013 - 2015); "Razionalizzazione d'uso delle risorse primarie per una peschicoltura sostenibile - SUS-PEACH", finanziato dalla Regione Puglia (2017-2019); EC Erasmus+ Programme 2020, Action KA - Knowledge Alliances "Next Generation Training on Intelligent Greenhouses –NEGHTRA" (2020- 2023).

Il gruppo di ricerca è costituito da:

prof.ssa ing. Evelia Schettini – responsabile scientifico, Professore Associato, Ingegnere Civile, PhD in Ingegneria delle Strutture, esperta di materiali di copertura e di impianti per la climatizzazione delle serre.

prof. ing. Giuliano Vox –Professore Associato, Ingegnere Elettronico, esperto di energie rinnovabili, di microclima e di sensoristica ambientale.

Ing. Fabiana Convertino –Ingegnere Civile, PhD in "Biodiversità, agricoltura e Ambiente", esperta di microclima.

2 Appendice

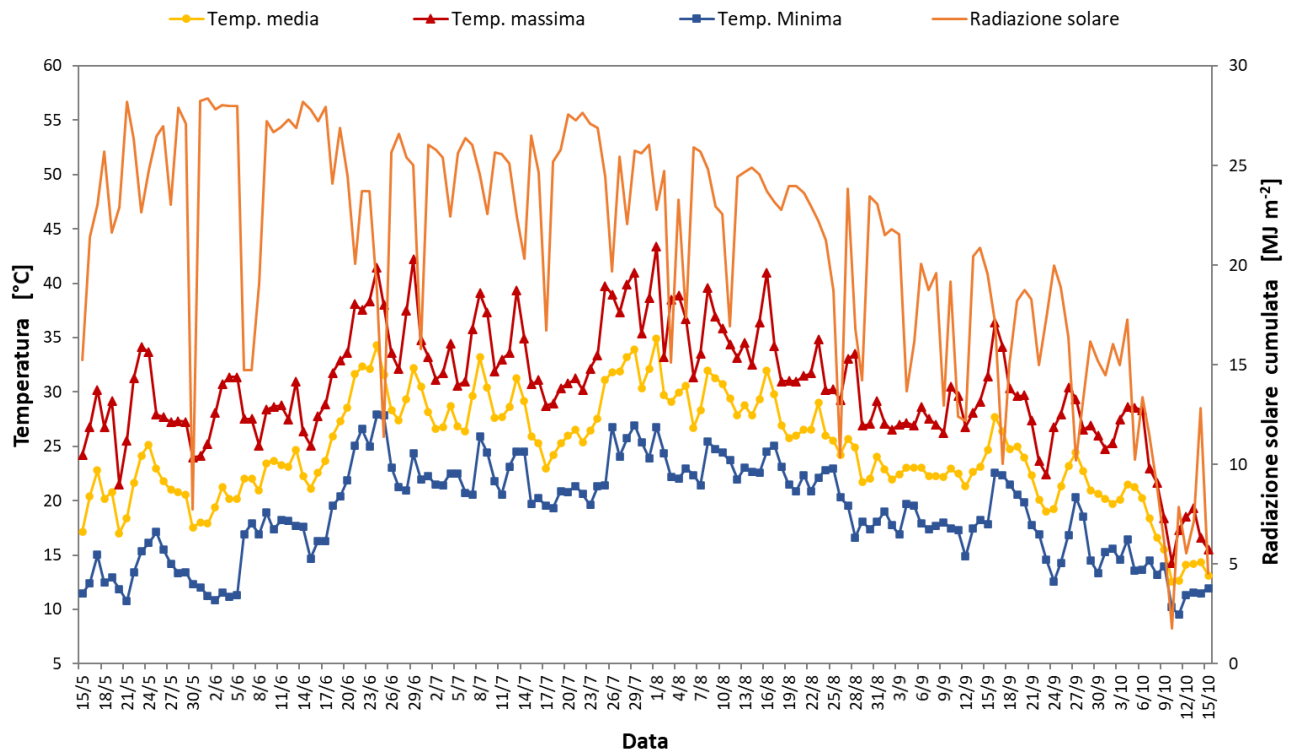


Figura A 1. Temperatura giornaliera media, massima e minima dell'aria esterna (asse principale) e radiazione solare cumulata giornaliera (asse secondario), periodo: 15 maggio–15 ottobre 2021.

Tabella A 1. Database delle condizioni climatiche (R: radiazione solare, T: temperatura dell'aria, UR: umidità relativa dell'aria) e stato del sistema di raffreddamento in serra, 14–16 settembre 2021.

Data e ora	R [Wm ⁻²]	T [°C]	RH [%]	Stato	Data e ora	R [Wm ⁻²]	T [°C]	RH [%]	Stato	Data e ora	R [Wm ⁻²]	T [°C]	RH [%]	Stato
14/9 0.00	0.1	19.4	64.3	OFF	15/9 0.00	0.6	20.3	54.5	OFF	16/9 0.00	0.5	23.1	42.1	OFF
0.15	0.2	19.7	61.6	OFF	0.15	0.1	20.5	53.3	OFF	0.15	0.5	23.2	42.3	OFF
0.30	0.2	19.7	61.0	OFF	0.30	0.1	20.7	53.3	OFF	0.30	0.3	23.3	42.3	OFF
0.45	0.1	19.4	61.6	OFF	0.45	0.1	20.5	54.8	OFF	0.45	0.4	23.4	42.1	OFF
1.00	0.1	19.4	61.4	OFF	1.00	0.0	20.3	56.6	OFF	1.00	0.2	23.3	43.0	OFF
1.15	0.7	19.0	62.0	OFF	1.15	0.4	20.2	58.4	OFF	1.15	0.4	23.0	44.7	OFF
1.30	0.5	19.0	61.1	OFF	1.30	0.2	19.7	62.5	OFF	1.30	0.7	22.6	46.2	OFF
1.45	0.4	18.9	60.8	OFF	1.45	0.5	19.6	65.0	OFF	1.45	0.6	23.1	44.0	OFF
2.00	0.4	18.9	60.1	OFF	2.00	0.5	19.6	65.8	OFF	2.00	0.3	23.5	43.2	OFF
2.15	0.7	18.7	61.1	OFF	2.15	0.7	19.5	66.4	OFF	2.15	0.7	23.5	44.4	OFF
2.30	0.5	18.8	60.5	OFF	2.30	0.3	19.5	67.3	OFF	2.30	0.4	23.6	45.8	OFF
2.45	0.7	19.0	60.4	OFF	2.45	0.6	19.1	68.4	OFF	2.45	0.3	23.7	46.2	OFF
3.00	0.7	19.0	60.4	OFF	3.00	0.5	19.2	67.2	OFF	3.00	0.4	23.6	47.1	OFF
3.15	0.7	18.9	61.3	OFF	3.15	0.6	19.2	66.2	OFF	3.15	0.5	23.5	48.0	OFF
3.30	0.4	18.7	62.5	OFF	3.30	0.6	18.9	66.8	OFF	3.30	0.6	23.4	48.6	OFF
3.45	0.6	18.6	62.5	OFF	3.45	0.5	18.3	69.0	OFF	3.45	0.4	23.4	48.7	OFF
4.00	0.2	18.5	62.7	OFF	4.00	0.9	18.2	69.9	OFF	4.00	0.7	23.6	47.6	OFF
4.15	0.1	18.4	63.0	OFF	4.15	0.7	18.2	70.1	OFF	4.15	0.6	23.4	48.4	OFF
4.30	0.4	18.2	63.3	OFF	4.30	0.7	18.2	70.1	OFF	4.30	0.5	23.5	48.3	OFF
4.45	0.2	18.2	62.7	OFF	4.45	0.2	18.1	70.1	OFF	4.45	0.8	23.4	47.8	OFF
5.00	0.0	18.4	61.5	OFF	5.00	0.1	18.0	70.5	OFF	5.00	0.5	23.1	47.7	OFF
5.15	0.5	18.3	61.2	OFF	5.15	0.3	17.8	70.4	OFF	5.15	0.6	22.9	48.9	OFF

5.30	1.6	18.3	60.6	OFF	5.30	1.1	18.0	69.5	OFF	5.30	1.6	22.7	49.2	OFF
5.45	9.8	18.4	59.4	OFF	5.45	7.5	18.1	68.4	OFF	5.45	6.8	22.6	48.5	OFF
6.00	27.7	18.6	58.5	OFF	6.00	24.8	18.2	66.7	OFF	6.00	29.0	22.6	47.3	OFF
6.15	54.2	18.9	57.5	OFF	6.15	51.7	18.5	65.8	OFF	6.15	55.7	22.6	47.6	OFF
6.30	87.4	19.7	56.0	OFF	6.30	85.6	19.0	63.9	OFF	6.30	100.6	22.6	47.5	OFF
6.45	128.3	20.5	53.8	OFF	6.45	126.9	20.0	60.5	OFF	6.45	131.8	23.9	42.7	OFF
7.00	175.6	21.3	52.5	OFF	7.00	174.9	21.1	56.7	OFF	7.00	124.1	24.5	41.5	OFF
7.15	222.6	22.2	50.7	OFF	7.15	221.9	22.3	53.7	OFF	7.15	168.0	25.0	40.4	OFF
7.30	269.7	23.3	48.1	OFF	7.30	270.2	23.4	51.3	OFF	7.30	277.4	26.1	35.9	OFF
7.45	315.6	24.0	45.9	OFF	7.45	320.3	24.7	47.6	OFF	7.45	210.4	27.2	33.6	OFF
8.00	362.4	24.4	46.2	OFF	8.00	370.0	25.6	44.9	OFF	8.00	329.1	27.7	33.9	OFF
8.15	407.9	24.8	45.0	ON	8.15	416.1	26.3	43.7	ON	8.15	426.2	28.3	27.7	ON
8.30	450.3	25.5	41.0	ON	8.30	458.4	26.9	42.4	ON	8.30	310.9	29.9	26.0	ON
8.45	493.1	26.6	36.4	ON	8.45	499.7	27.7	39.7	ON	8.45	470.1	30.2	26.0	ON
9.00	531.2	26.9	34.6	ON	9.00	538.6	27.2	36.1	ON	9.00	543.9	31.4	23.9	ON
9.15	571.0	27.4	32.0	ON	9.15	571.8	25.6	34.1	ON	9.15	518.4	32.0	22.0	ON
9.30	603.0	27.6	32.7	ON	9.30	600.3	28.8	32.3	ON	9.30	548.4	32.4	20.7	ON
9.45	632.7	28.0	32.4	ON	9.45	640.8	26.7	30.6	ON	9.45	543.1	33.3	18.6	ON
10.00	662.8	27.9	30.1	ON	10.00	670.5	26.2	29.1	ON	10.00	479.1	33.5	18.3	ON
10.15	694.6	26.4	29.5	ON	10.15	693.9	28.9	28.1	ON	10.15	592.8	33.4	20.1	ON
10.30	719.1	29.1	29.0	ON	10.30	715.0	26.4	27.1	ON	10.30	541.5	32.4	29.3	ON
10.45	739.3	28.1	28.2	ON	10.45	741.4	30.1	25.4	ON	10.45	727.1	31.2	29.9	ON
11.00	756.7	29.0	27.7	ON	11.00	755.5	31.0	25.6	ON	11.00	453.8	31.7	29.8	ON
11.15	769.5	27.1	28.9	ON	11.15	766.2	31.0	26.2	ON	11.15	626.9	32.2	29.0	ON
11.30	782.0	26.7	29.0	ON	11.30	779.4	30.0	24.7	ON	11.30	511.9	32.4	28.8	ON
11.45	787.9	26.2	28.9	ON	11.45	781.8	31.4	24.3	ON	11.45	609.3	32.5	27.8	ON
12.00	798.5	25.9	29.4	ON	12.00	785.1	31.1	24.5	ON	12.00	548.9	32.9	28.2	ON
12.15	795.7	25.9	30.2	ON	12.15	806.0	30.7	22.9	ON	12.15	622.9	32.7	29.4	ON
12.30	790.5	28.1	32.1	ON	12.30	790.8	31.4	23.5	ON	12.30	772.8	33.2	28.1	ON
12.45	769.9	29.1	32.0	ON	12.45	765.6	31.3	24.1	ON	12.45	720.1	33.6	27.8	ON
13.00	762.7	29.0	32.6	ON	13.00	768.5	31.3	25.4	ON	13.00	687.3	33.9	27.4	ON
13.15	746.3	29.1	33.0	ON	13.15	685.4	31.3	25.3	ON	13.15	674.6	34.3	27.2	ON
13.30	722.7	28.9	32.9	ON	13.30	537.4	30.9	28.1	ON	13.30	623.8	35.1	21.7	ON
13.45	697.2	28.9	32.6	ON	13.45	521.6	30.5	29.9	ON	13.45	630.5	36.3	18.8	ON
14.00	670.6	28.8	33.8	ON	14.00	628.0	30.7	29.3	ON	14.00	603.6	36.4	19.5	ON
14.15	633.1	28.2	36.0	ON	14.15	512.0	30.3	30.0	ON	14.15	540.0	36.1	21.1	ON
14.30	577.6	28.2	35.3	ON	14.30	391.8	30.0	32.0	ON	14.30	521.3	35.6	23.9	ON
14.45	555.2	28.2	34.9	ON	14.45	324.9	29.8	31.0	ON	14.45	486.6	35.1	24.8	ON
15.00	528.8	28.4	36.3	ON	15.00	454.1	29.7	32.5	ON	15.00	411.4	34.5	24.7	ON
15.15	484.9	27.9	36.6	ON	15.15	551.2	30.2	32.4	ON	15.15	257.3	33.8	25.0	ON
15.30	445.0	27.8	38.4	ON	15.30	287.6	29.9	30.9	ON	15.30	161.2	32.7	26.6	ON
15.45	408.5	27.5	40.7	ON	15.45	268.0	29.5	30.9	ON	15.45	261.7	32.5	27.4	ON
16.00	364.8	27.5	38.7	ON	16.00	376.1	29.5	28.1	ON	16.00	249.2	32.5	27.3	ON
16.15	312.5	27.2	39.6	ON	16.15	294.7	29.7	26.4	ON	16.15	248.2	32.3	26.7	ON
16.30	260.5	26.8	42.4	ON	16.30	199.0	29.5	26.9	ON	16.30	217.6	32.1	26.3	ON
16.45	211.6	26.5	44.6	ON	16.45	173.8	29.2	27.6	ON	16.45	167.6	31.8	28.2	ON
17.00	159.9	26.3	46.0	OFF	17.00	107.9	28.8	29.3	ON	17.00	113.3	31.1	30.3	ON
17.15	112.4	25.9	50.6	OFF	17.15	96.0	27.1	30.1	OFF	17.15	51.1	30.4	31.7	ON
17.30	52.0	25.4	53.0	OFF	17.30	60.3	26.3	32.3	OFF	17.30	32.5	29.1	33.8	OFF
17.45	29.1	24.9	56.6	OFF	17.45	30.2	25.8	34.1	OFF	17.45	18.0	28.7	37.1	OFF
18.00	8.2	24.6	59.0	OFF	18.00	11.1	27.2	35.7	OFF	18.00	5.7	28.0	39.3	OFF
18.15	1.8	24.1	60.7	OFF	18.15	1.8	26.6	35.3	OFF	18.15	1.4	27.4	41.6	OFF
18.30	0.4	23.6	62.5	OFF	18.30	0.2	26.0	37.4	OFF	18.30	0.4	27.0	44.7	OFF
18.45	0.5	23.1	66.2	OFF	18.45	0.6	25.4	38.5	OFF	18.45	0.6	26.6	46.7	OFF

19.00	0.8	22.8	67.5	OFF	19.00	0.7	25.2	37.1	OFF	19.00	0.8	26.3	46.8	OFF
19.15	0.5	22.3	69.4	OFF	19.15	0.7	25.2	36.1	OFF	19.15	0.5	26.0	46.3	OFF
19.30	0.5	21.8	70.3	OFF	19.30	0.6	25.0	36.3	OFF	19.30	0.8	25.8	46.4	OFF
19.45	0.7	21.1	72.7	OFF	19.45	0.7	24.8	37.0	OFF	19.45	0.4	25.6	44.4	OFF
20.00	0.5	21.1	72.9	OFF	20.00	0.4	24.7	37.5	OFF	20.00	0.5	25.5	44.0	OFF
20.15	0.6	21.0	74.3	OFF	20.15	0.6	24.6	37.0	OFF	20.15	0.6	25.2	46.2	OFF
20.30	0.6	21.0	72.9	OFF	20.30	0.4	24.2	37.8	OFF	20.30	0.4	25.1	49.0	OFF
20.45	0.6	20.6	69.7	OFF	20.45	0.4	23.8	38.7	OFF	20.45	0.4	25.1	50.8	OFF
21.00	0.6	20.2	67.5	OFF	21.00	0.5	23.4	40.8	OFF	21.00	0.9	25.1	50.6	OFF
21.15	0.6	19.5	67.0	OFF	21.15	0.7	23.2	42.8	OFF	21.15	0.3	25.2	49.5	OFF
21.30	0.7	19.8	65.4	OFF	21.30	0.5	22.6	44.2	OFF	21.30	0.6	25.0	51.7	OFF
21.45	0.5	19.7	65.4	OFF	21.45	0.8	22.9	44.3	OFF	21.45	0.6	24.6	54.8	OFF
22.00	0.6	19.5	65.4	OFF	22.00	0.4	22.9	44.5	OFF	22.00	0.7	24.7	57.0	OFF
22.15	0.7	19.4	64.6	OFF	22.15	0.5	22.8	44.6	OFF	22.15	0.7	24.6	60.6	OFF
22.30	0.6	19.4	63.8	OFF	22.30	0.4	22.7	44.5	OFF	22.30	0.7	24.6	63.5	OFF
22.45	0.7	19.6	61.0	OFF	22.45	1.1	22.9	43.7	OFF	22.45	0.5	24.6	66.2	OFF
23.00	0.7	19.9	58.9	OFF	23.00	0.7	22.8	43.6	OFF	23.00	0.8	24.2	69.8	OFF
23.15	0.6	20.2	56.9	OFF	23.15	0.6	22.7	43.4	OFF	23.15	0.5	24.0	70.1	OFF
23.30	0.8	20.2	56.5	OFF	23.30	0.5	22.7	43.2	OFF	23.30	0.5	24.0	70.7	OFF
23.45	0.5	20.2	55.6	OFF	23.45	0.4	22.9	42.6	OFF	23.45	0.7	24.0	71.6	OFF
Tempo di accensione [%]				36	Tempo di accensione [%]				38	Tempo di accensione [%]				39

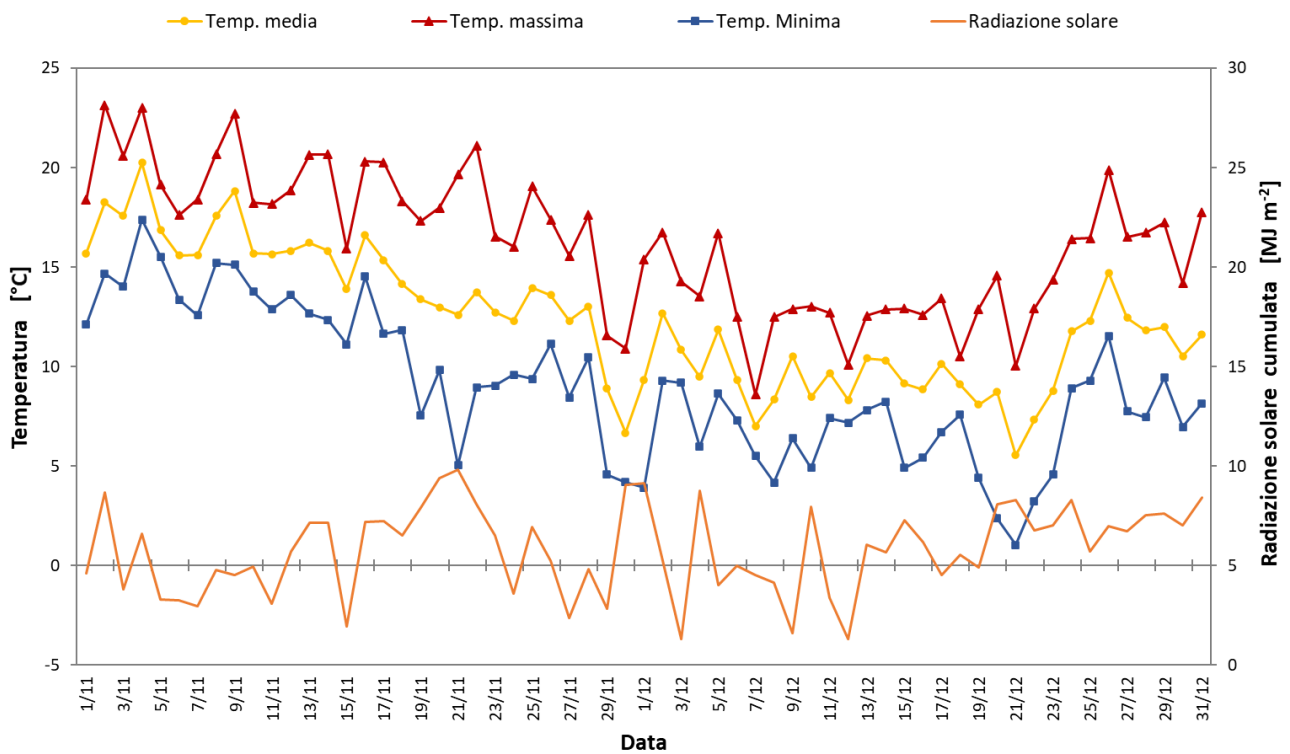


Figura A 2. Temperatura giornaliera media, massima e minima dell'aria esterna (asse principale) e radiazione solare cumulata giornaliera (asse secondario), periodo: 1 novembre–31 dicembre 2021.

Tabella A 2. Database delle condizioni climatiche (R: radiazione solare, T: temperatura dell'aria, UR: umidità relativa dell'aria) e stato del sistema di riscaldamento in serra, 20-22 dicembre 2021.

Data e ora	R [Wm ⁻²]	T [°C]	RH [%]	Stato	Data e ora	R [Wm ⁻²]	T [°C]	RH [%]	Stato	Data e ora	R [Wm ⁻²]	T [°C]	RH [%]	Stato
20/12 0.00	0.1	6.7	67.1	ON	21/12 0.00	0.1	4.9	90.9	ON	22/12 0.00	0.1	5.5	67.0	ON
0.15	0.1	6.9	66.4	ON	0.15	0.0	4.7	91.6	ON	0.15	0.1	5.5	67.9	ON
0.30	0.2	7.1	64.7	ON	0.30	0.1	5.1	92.1	ON	0.30	0.1	5.4	68.9	ON
0.45	0.1	7.1	64.4	ON	0.45	0.0	5.0	91.4	ON	0.45	0.3	5.4	68.7	ON
1.00	0.0	6.9	64.6	ON	1.00	0.1	4.7	91.3	ON	1.00	0.2	5.5	68.6	ON
1.15	0.0	6.4	66.3	ON	1.15	0.1	4.3	90.9	ON	1.15	0.0	5.4	69.4	ON
1.30	0.1	7.0	63.1	ON	1.30	0.1	4.2	90.6	ON	1.30	0.3	5.4	68.9	ON
1.45	0.1	6.9	62.3	ON	1.45	0.0	3.8	90.8	ON	1.45	0.4	5.4	69.1	ON
2.00	0.1	6.7	62.7	ON	2.00	0.1	3.6	91.2	ON	2.00	0.1	5.4	68.5	ON
2.15	0.1	6.8	61.7	ON	2.15	0.2	3.6	91.0	ON	2.15	0.1	5.2	69.1	ON
2.30	0.2	6.9	60.6	ON	2.30	0.0	3.7	91.4	ON	2.30	0.2	4.9	69.4	ON
2.45	0.1	6.7	61.2	ON	2.45	0.0	3.7	91.1	ON	2.45	0.2	4.6	70.6	ON
3.00	0.2	6.6	61.5	ON	3.00	0.1	3.6	91.0	ON	3.00	0.1	4.7	68.8	ON
3.15	0.2	6.3	62.8	ON	3.15	0.0	3.7	90.7	ON	3.15	0.0	4.7	68.1	ON
3.30	0.0	6.0	63.9	ON	3.30	0.1	3.8	90.5	ON	3.30	0.3	4.7	67.9	ON
3.45	0.1	6.0	64.3	ON	3.45	0.0	3.3	90.3	ON	3.45	0.4	4.7	68.4	ON
4.00	0.1	5.9	65.6	ON	4.00	0.0	2.9	90.5	ON	4.00	0.1	4.8	68.0	ON
4.15	0.1	5.8	65.5	ON	4.15	0.3	3.1	90.6	ON	4.15	0.3	5.0	66.9	ON
4.30	0.1	5.6	66.2	ON	4.30	0.1	2.5	90.5	ON	4.30	0.2	5.0	66.8	ON
4.45	0.2	5.3	67.9	ON	4.45	0.1	3.0	90.8	ON	4.45	0.2	5.0	66.5	ON
5.00	0.2	4.9	69.3	ON	5.00	0.0	3.1	88.7	ON	5.00	0.4	4.9	66.8	ON
5.15	0.1	4.1	71.7	ON	5.15	0.1	2.3	89.5	ON	5.15	0.4	4.8	67.9	ON
5.30	0.0	3.8	74.1	ON	5.30	0.0	2.4	89.7	ON	5.30	0.2	4.9	68.2	ON
5.45	0.0	3.0	76.6	ON	5.45	0.1	2.0	89.1	ON	5.45	0.2	5.1	67.5	ON
6.00	0.2	2.7	78.3	ON	6.00	0.0	1.7	89.8	ON	6.00	0.2	5.1	68.2	ON
6.15	0.1	2.5	79.7	ON	6.15	0.0	1.7	89.7	ON	6.15	0.1	4.7	70.4	ON
6.30	0.2	2.4	80.7	ON	6.30	0.0	1.7	89.5	ON	6.30	0.0	4.3	71.7	ON
6.45	0.1	2.8	80.3	ON	6.45	0.1	1.3	89.5	ON	6.45	0.3	4.0	72.3	ON
7.00	0.4	2.6	79.7	ON	7.00	0.5	1.5	89.6	ON	7.00	0.3	3.7	73.2	ON
7.15	2.4	2.4	80.4	ON	7.15	2.3	1.2	89.4	ON	7.15	1.9	3.4	75.0	ON
7.30	8.3	2.5	80.6	ON	7.30	8.4	1.0	89.8	ON	7.30	6.3	3.2	75.8	ON
7.45	29.8	2.9	80.5	ON	7.45	29.6	1.5	89.7	ON	7.45	24.3	3.4	75.7	ON
8.00	58.0	4.0	77.7	ON	8.00	51.4	1.9	89.0	ON	8.00	53.9	4.2	72.3	ON
8.15	90.8	4.6	76.8	ON	8.15	82.5	2.7	88.8	ON	8.15	85.6	4.5	70.9	ON
8.30	126.8	5.7	74.2	ON	8.30	115.9	3.6	86.7	ON	8.30	120.7	5.0	70.0	ON
8.45	164.8	7.1	67.9	ON	8.45	178.8	4.5	83.3	ON	8.45	157.6	5.9	66.8	ON
9.00	202.4	8.3	61.8	ON	9.00	245.8	5.7	80.8	ON	9.00	192.0	6.7	63.3	ON
9.15	234.6	9.3	58.2	OFF	9.15	282.0	6.8	72.7	ON	9.15	221.7	7.6	57.9	ON
9.30	264.3	10.4	52.5	OFF	9.30	285.7	7.9	62.6	ON	9.30	251.5	8.1	55.1	ON
9.45	285.0	11.2	46.4	OFF	9.45	282.3	8.6	56.0	OFF	9.45	274.8	8.7	53.6	ON
10.00	309.9	11.8	47.4	OFF	10.00	296.6	9.2	53.5	OFF	10.00	300.2	9.4	51.8	OFF
10.15	345.7	12.0	52.2	OFF	10.15	330.8	9.5	52.0	OFF	10.15	336.1	9.7	52.6	OFF
10.30	370.0	12.1	55.3	OFF	10.30	361.8	9.6	49.9	OFF	10.30	364.7	10.7	51.1	OFF
10.45	383.3	12.3	56.2	OFF	10.45	385.1	9.6	48.5	OFF	10.45	378.3	11.3	50.0	OFF
11.00	389.8	12.5	56.3	OFF	11.00	394.7	9.7	48.2	OFF	11.00	390.4	11.5	49.9	OFF
11.15	395.1	12.7	54.7	OFF	11.15	400.4	9.9	46.8	OFF	11.15	407.6	11.9	49.5	OFF
11.30	396.9	12.9	52.9	OFF	11.30	402.5	10.0	46.2	OFF	11.30	445.7	12.3	48.5	OFF
11.45	401.5	12.8	52.5	OFF	11.45	408.0	9.9	46.6	OFF	11.45	465.6	12.8	47.7	OFF
12.00	404.9	13.3	51.9	OFF	12.00	412.0	10.0	46.4	OFF	12.00	441.2	12.9	47.1	OFF
12.15	405.6	13.7	51.3	OFF	12.15	413.6	10.0	46.9	OFF	12.15	285.1	12.5	47.9	OFF

12.30	399.4	14.1	47.6	OFF	12.30	408.3	10.0	46.4	OFF	12.30	281.2	12.1	47.8	OFF
12.45	388.6	14.3	45.3	OFF	12.45	397.0	9.8	47.0	OFF	12.45	283.4	12.0	47.0	OFF
13.00	378.6	14.6	46.5	OFF	13.00	387.2	9.8	46.4	OFF	13.00	251.0	11.9	45.7	OFF
13.15	367.4	14.4	50.3	OFF	13.15	379.0	9.5	46.2	OFF	13.15	217.6	11.7	45.5	OFF
13.30	356.1	14.2	54.4	OFF	13.30	361.7	9.5	46.7	OFF	13.30	188.7	11.2	47.1	OFF
13.45	321.4	14.3	57.8	OFF	13.45	332.6	9.3	46.0	OFF	13.45	173.4	10.9	47.2	OFF
14.00	289.1	14.0	60.4	OFF	14.00	300.9	8.9	45.7	OFF	14.00	158.0	10.8	47.5	OFF
14.15	263.3	13.9	61.2	OFF	14.15	275.5	9.1	45.1	OFF	14.15	150.0	10.7	47.0	OFF
14.30	246.5	13.4	65.1	OFF	14.30	260.6	9.1	44.8	OFF	14.30	136.6	10.5	48.4	OFF
14.45	221.5	13.3	66.9	OFF	14.45	236.5	9.0	46.5	OFF	14.45	126.2	10.4	48.5	OFF
15.00	183.5	13.4	68.5	OFF	15.00	203.5	8.7	47.4	OFF	15.00	105.8	10.3	49.7	OFF
15.15	94.6	13.2	70.0	OFF	15.15	159.4	8.9	48.7	OFF	15.15	81.8	10.1	51.4	OFF
15.30	88.1	12.7	73.0	OFF	15.30	57.0	8.5	50.2	OFF	15.30	60.1	10.0	54.3	OFF
15.45	61.5	12.5	73.9	OFF	15.45	28.9	7.7	54.4	ON	15.45	41.7	9.8	56.0	ON
16.00	23.3	11.9	76.0	OFF	16.00	25.3	7.1	56.9	ON	16.00	26.1	9.6	57.1	ON
16.15	12.8	11.4	77.1	ON	16.15	15.5	7.0	57.2	ON	16.15	13.7	9.4	58.9	ON
16.30	5.8	10.4	78.8	ON	16.30	5.8	6.8	58.0	ON	16.30	4.7	9.0	62.1	ON
16.45	1.2	10.0	80.4	ON	16.45	1.4	6.1	62.4	ON	16.45	0.9	8.0	64.6	ON
17.00	0.2	9.7	81.6	ON	17.00	0.1	5.3	65.5	ON	17.00	0.2	8.0	66.8	ON
17.15	0.0	9.8	83.3	ON	17.15	0.1	5.0	66.6	ON	17.15	0.0	7.8	68.0	ON
17.30	0.0	10.0	83.5	ON	17.30	0.1	4.8	68.8	ON	17.30	0.0	7.3	69.4	ON
17.45	0.0	10.2	82.8	ON	17.45	0.1	4.9	69.0	ON	17.45	0.6	6.7	70.1	ON
18.00	0.0	10.7	84.2	ON	18.00	0.1	5.0	68.3	ON	18.00	0.7	7.2	70.0	ON
18.15	0.0	10.9	81.9	ON	18.15	0.2	5.0	67.5	ON	18.15	0.5	7.3	70.2	ON
18.30	0.1	10.9	79.5	ON	18.30	0.1	4.7	68.5	ON	18.30	0.1	7.3	70.5	ON
18.45	0.0	10.8	79.1	ON	18.45	0.1	4.1	70.6	ON	18.45	0.2	7.3	70.6	ON
19.00	0.0	10.8	78.2	ON	19.00	0.2	3.6	62.7	ON	19.00	0.2	7.1	70.1	ON
19.15	0.0	10.6	77.3	ON	19.15	0.2	3.8	71.5	ON	19.15	0.2	7.1	69.4	ON
19.30	0.0	10.1	78.9	ON	19.30	0.4	4.0	71.9	ON	19.30	0.3	6.9	69.7	ON
19.45	0.0	10.0	80.9	ON	19.45	0.3	4.5	69.6	ON	19.45	0.3	6.8	70.9	ON
20.00	0.0	9.9	79.9	ON	20.00	0.1	4.5	69.2	ON	20.00	0.2	6.7	71.0	ON
20.15	0.0	9.6	79.9	ON	20.15	0.1	4.6	69.5	ON	20.15	0.1	6.7	69.8	ON
20.30	0.0	9.5	79.4	ON	20.30	0.2	4.8	69.3	ON	20.30	0.2	6.8	67.6	ON
20.45	0.1	9.0	80.9	ON	20.45	0.2	5.0	69.6	ON	20.45	0.2	7.3	68.0	ON
21.00	0.0	8.7	84.0	ON	21.00	0.1	5.2	69.3	ON	21.00	0.1	7.3	68.9	ON
21.15	0.0	8.6	84.8	ON	21.15	0.1	5.3	69.0	ON	21.15	0.1	7.2	69.9	ON
21.30	0.1	8.4	87.1	ON	21.30	0.2	5.5	67.6	ON	21.30	0.2	7.0	71.2	ON
21.45	0.0	8.1	89.0	ON	21.45	0.4	5.8	64.0	ON	21.45	0.1	6.7	73.2	ON
22.00	0.0	7.7	89.5	ON	22.00	0.2	5.8	65.4	ON	22.00	0.3	6.6	74.3	ON
22.15	0.0	7.3	89.3	ON	22.15	0.2	5.7	66.0	ON	22.15	0.3	6.7	74.2	ON
22.30	0.0	6.9	89.7	ON	22.30	0.1	5.7	67.5	ON	22.30	0.1	6.6	73.5	ON
22.45	0.0	6.7	90.8	ON	22.45	0.1	5.5	67.5	ON	22.45	0.1	6.7	72.9	ON
23.00	0.1	6.7	90.8	ON	23.00	0.1	5.6	66.0	ON	23.00	0.3	6.8	72.1	ON
23.15	0.1	6.2	90.5	ON	23.15	0.3	5.5	66.0	ON	23.15	0.2	6.8	71.0	ON
23.30	0.1	5.9	90.9	ON	23.30	0.1	5.5	66.5	ON	23.30	0.1	6.9	71.1	ON
23.45	0.1	5.5	91.0	ON	23.45	0.4	5.5	66.9	ON	23.45	0.1	6.7	72.1	ON
Tempo di accensione [%]				71	Tempo di accensione [%]				75	Tempo di accensione [%]				76