



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA ENERGETICA

# IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE MULTISORGENTE: ANALISI E CONFRONTO CON SOLUZIONI A POMPA DI CALORE TRADIZIONALE

Tesi di laurea magistrale in Progettazione di impianti a Pompa di Calore M

**Relatore**

**Prof. Claudia Naldi**

**Correlatore esterno**

**Dott. Geol. Gabriele Cesari**

**Presentata da**

**Irene Manara**

---

**Sessione dicembre 2024**

**Anno Accademico 2023/2024**

*A Tania e Stefano,  
per l'amore e il supporto.*

*E per tutto il resto.*

## INDICE

<b>1 INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
1.1 Obiettivi	1
1.2 Struttura della tesi	2
<b>2 IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE A POMPA DI CALORE</b>	<b>3</b>
2.1 Pompe di calore elettriche EHP	3
2.1.1 Efficienza nelle EHP	5
2.2 Scambiatori ad aria	6
2.2.1 Il problema dello sbrinamento	7
2.3 Scambiatori geotermici	8
2.3.1 Sonde geotermiche verticali	10
<b>3 IMPIANTO IN ANALISI</b>	<b>12</b>
3.1 Sito	12
3.1.1 Inquadramento morfologico e geologico dell'area	12
3.1.2 Inquadramento idrologico e idrogeologico dell'area	13
3.1.3 Inquadramento climatico dell'area	14
3.2 Schema di impianto	15
3.3 Componenti	16
3.3.1 Pompa di calore ecoGEO	16
3.3.2 Unità di scambio AU12	19
3.3.3 Componenti accessori circuito di captazione	21
3.3.4 Componenti accessori circuito di produzione	21
3.4 Sonda geotermica	23
3.4.1 Dimensionamento EED	24
3.4.2 Caratteristiche tecniche di installazione	26
3.4.3 Test avanzati	28
3.5 Collegamenti orizzontali	37
3.6 Glicole propilenico	38
3.5 Logica di funzionamento multisorgente	40
3.6 Sistema di monitoraggio	41
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>43</b>
4.1 Dataset da monitoraggio	43
4.2 Dataset da schede tecniche	46
4.3 Simulazione impianto aerotermico	52
4.4 Simulazione impianto geotermico	55
4.4.1 G-functions	55
4.4.2 Codice di calcolo	59
<b>5 IMPIANTO MULTISORGENTE</b>	<b>63</b>
5.1 Analisi dati di monitoraggio	63
5.1.1 Fabbisogni energetici	63

5.1.2 Temperature di captazione	66
5.1.3 Ripartizione del carico sulle sorgenti	69
5.1.4 Consumi ed efficienze	71
<b>6 IMPIANTO AEROTERMICO</b>	<b>73</b>
6.1 Schema di impianto	73
6.2 Analisi dati di simulazione	74
6.2.1 Fattore correttivo	74
6.2.2 Consumi ed efficienze	75
6.2.3 Costi di investimento	77
<b>7 IMPIANTO GEOTERMICO</b>	<b>78</b>
7.1 Schema di impianto	78
7.2 Analisi dati di simulazione	79
7.2.1 Temperatura di captazione	79
7.2.2 Consumi ed efficienze	81
7.2.3 Costi di investimento	83
<b>8 CONFRONTO</b>	<b>84</b>
8.1 Temperature di captazione	84
8.2 Consumi ed efficienze	85
8.3 Costi di investimento e di esercizio	87
<b>9 LIMITI E SVILUPPI FUTURI</b>	<b>90</b>
<b>10 CONCLUSIONI</b>	<b>91</b>
<b>RIFERIMENTI</b>	<b>92</b>

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 Obiettivi

L'energia consumata dal settore residenziale rappresenta circa il 36% del consumo energetico globale totale, di cui il 50% è costituito dalla climatizzazione invernale ed estiva degli ambienti. Si prevede che tale fabbisogno raggiungerà circa il 65% del consumo totale di energia nel settore residenziale entro il 2050 a causa della crescita della popolazione e dell'urbanizzazione accelerata. Secondo il report R-93-004 EPA (Ente Protezione Ambientale USA) la climatizzazione con pompe di calore geotermiche è la tecnologia più efficiente dal punto di vista energetico e sostenibile dal punto di vista ambientale. La difficoltà di diffusione di tali impianti nel nostro Paese è determinata da una ancora scarsa conoscenza della tecnologia e dall'importante investimento economico che richiede per la realizzazione.

La tesi si prefigge l'obiettivo di promuovere la geotermia a bassa entalpia per la climatizzazione anche in applicazioni del piccolo residenziale e approfondire una configurazione di impianto che permette di abbattere sensibilmente l'investimento iniziale, dunque rendere la tecnologia accessibile ad un maggior numero di utenti finali: Impianto multisorgente. La configurazione multisorgente prevede il contributo combinato della risorsa geotermica e della risorsa aria, riducendo il numero di perforazioni necessarie.

L'analisi che segue si basa su un impianto reale in esercizio monitorato dall'anno 2018 in assetto multisorgente, si procederà a simulare il funzionamento in assetto puramente geotermico e puramente aerotermico per valutare benefici e svantaggi delle diverse soluzioni, in termini energetici ed economici.

Il presente elaborato è frutto del lavoro svolto negli ultimi anni presso E.GEO s.r.l., azienda leader in Italia nel settore della realizzazione chiavi in mano di impianti geotermici. Il supporto, la disponibilità e le competenze di tutti i miei collaboratori sono stati fondamentali per la stesura della presente analisi.

## 1.2 Struttura della tesi

L'elaborato si sviluppa in dieci capitoli. Il primo capitolo, a scopo introduttivo, contiene le motivazioni che portano alla trattazione del tema in analisi e gli obiettivi prefissati.

Il secondo capitolo contiene una descrizione generale degli impianti di climatizzazione a pompa di calore, classificazione, funzionamento e componenti principali.

La descrizione approfondita dell'impianto in analisi è contenuta nel terzo capitolo, affrontando le caratteristiche del sito di installazione, lo schema di impianto, i componenti e le relative caratteristiche tecniche.

Il quarto capitolo è dedicato alla descrizione dei metodi e gli strumenti utilizzati per l'analisi dei dati di monitoraggio e lo sviluppo delle successive simulazioni.

I tre capitoli successivi, quinto, sesto e settimo, riportano i risultati delle analisi rispettivamente sull'impianto multisorgente, aerotermico e geotermico.

Si sviluppano di seguito un capitolo dedicato al confronto dei risultati ottenuti, i limiti della trattazione e i possibili futuri sviluppi, ed infine il decimo capitolo contenente le conclusioni generali sul presente elaborato ed il lavoro svolto.

## 2 IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE A POMPA DI CALORE

### 2.1 Pompe di calore elettriche EHP

La pompa di calore (o termopompa) è una macchina termica in grado di estrarre e trasferire energia termica. Le pompe di calore si classificano per tecnologia di generazione:

- Elettrica (EHP)
- Motore endotermico (GHP)
- Assorbitore (AHP)

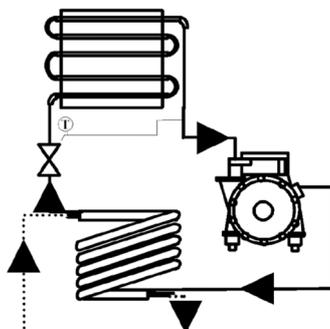
E per vettori di scambio termico coinvolti:

- air to air
- air to water
- water to water
- water to air

Nel presente documento si farà riferimento a pompe di calore elettriche a compressione di vapore (EHP) in configurazione water-to-water. La macchina utilizza energia elettrica ed energia termica rinnovabile prelevata dalle risorse naturali, per fornire energia termica all'utenza. L'utilizzo di EHP può contribuire in modo sostanziale alla elettrificazione dei consumi termici legati alla climatizzazione degli edifici.

Le EHP presentano quattro componenti principali:

1. Compressore
2. Condensatore
3. Valvola di laminazione
4. Evaporatore



*Fig. 1 : Schema componenti EHP*

Il compressore, alimentato da energia elettrica, innalza la pressione del fluido frigorifero contenuto nel circuito, questo cede calore al mezzo da riscaldare tramite il condensatore. La valvola di laminazione riporta il fluido al livello di bassa pressione di partenza ed il fluido assorbe calore dal mezzo da raffreddare tramite l'evaporatore. Condensatore ed evaporatore sono costituiti da due scambiatori generalmente a piastre. La possibilità di intercambiare gli scambiatori di condensazione ed evaporazione permette alle pompe di calore di soddisfare il fabbisogno invernale ed estivo degli edifici.

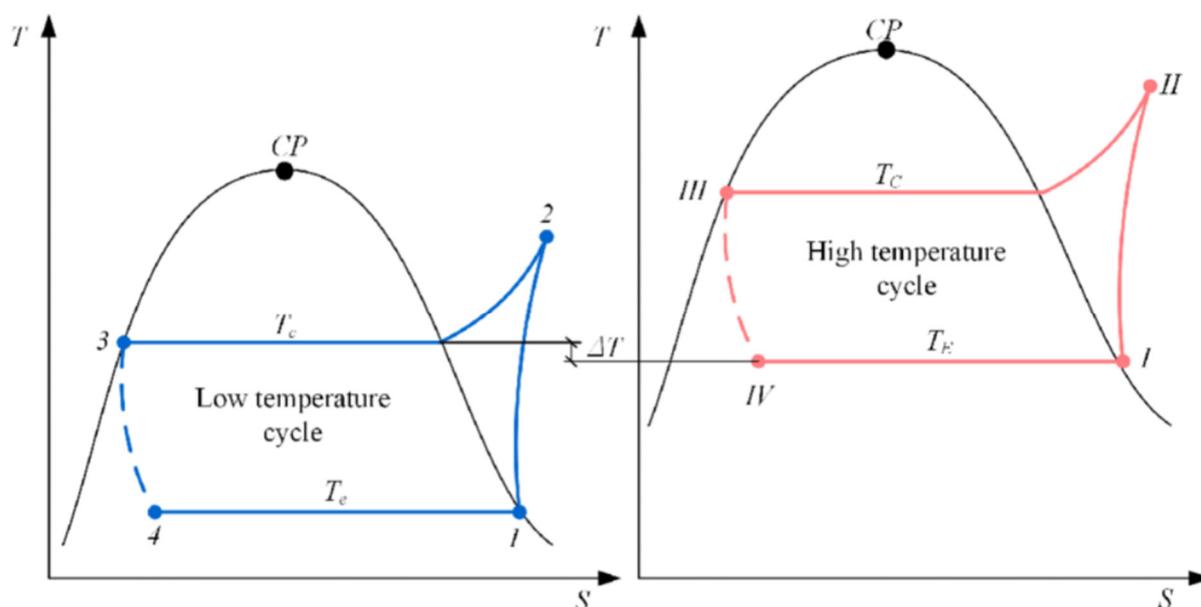


Fig. 2 : Grafici T-S ciclo termodinamico in assetto estivo e invernale

La risorsa naturale da cui estrarre o in cui smaltire l'energia termica necessaria per il ciclo può essere individuata in qualsiasi fluido che presenti temperature favorevoli disponibile nei pressi della centrale, ad esempio: aria esterna, acqua di falda, acque superficiali (fiumi, laghi, acqua di mare), acqua o aria di processo, risorse geotermiche.

Nel presente documento si analizzeranno configurazioni di scambio termico con aria esterna, sonde geotermiche e la combinazione delle due.

### 2.1.1 Efficienza nelle EHP

Le pompe di calore sono macchine dalle performance variabili. Generalmente per valutare le prestazioni di un generatore tradizionale viene confrontata la quantità di energia termica prodotta rispetto all'energia primaria consumata:

$$\eta_{gen} = \frac{E_{Termica}}{E_{Primaria}} \quad (1)$$

Nel caso delle pompe di calore l'efficienza con la quale viene trasferito il calore è definita dal coefficiente di prestazione invernale COP ed estivo EER che confronta il calore ceduto o sottratto all'ambiente (effetto utile), con l'energia elettrica assorbita:

$$COP = \frac{Q_H}{L} \quad EER = \frac{Q_L}{L} \quad (2)$$

Concettualmente si considera l'energia prelevata o smaltita nella sorgente naturale come gratuita. Per questa ragione COP ed EER hanno valori superiori all'unità, a differenza degli altri indici di efficienza. Tale valore può variare considerevolmente in base a:

- Temperatura della sorgente naturale;
- Temperatura di mandata della distribuzione nell'ambiente;

In particolare, a prescindere dalla stagione, le prestazioni migliorano al diminuire del salto termico tra le due temperature sopra citate. Questo si realizza con temperature di sorgente favorevoli, alte nel periodo di riscaldamento e basse nel periodo di raffrescamento e temperature di distribuzione il più vicine possibili a quelle di sorgente.

Altre variabili che influenzano l'efficienza:

- Fattore di carico, coerentemente con le mappe di funzionamento del compressore installato sulla pompa di calore.
- Cicli di sbrinamento.

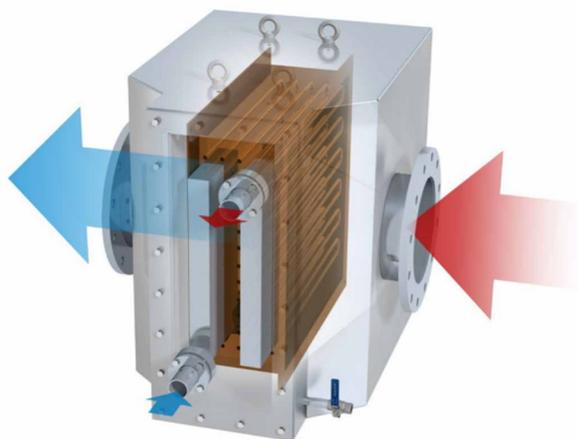
Le schede tecniche riportano, infatti, più valori di prestazione in funzione delle diverse temperature sia della sorgente, sia dell'acqua di mandata.

## 2.2 Scambiatori ad aria

Gli scambiatori ad aria sono componenti necessari per prelevare o cedere calore dall'aria esterna. Tale calore può essere trasmesso direttamente al fluido frigorifero in impianti detti ad espansione diretta, oppure interfacciarsi con un fluido termovettore, generalmente acqua, che a sua volta trasferirà il calore al ciclo frigorifero della pompa di calore.

In questo secondo caso lo scambiatore è composto da un'unità di scambio posta all'esterno dell'edificio. L'unità contiene fasci di tubi in cui scorre l'acqua tecnica ed è solitamente provvista di una ventola elettrica che favorisce il passaggio dell'aria sulla superficie dei tubi.

Di seguito schema semplificato:



*Fig. 3 : Schema scambiatore aria - acqua*

L'acqua tecnica all'interno dell'unità esterna può anche raggiungere temperature prossime a 0°C in pieno picco di funzionamento invernale, è quindi necessario aggiungere l'acqua tecnica con glicole, propilenico o etilenico, una sostanza che ne abbassa la temperatura di congelamento. Il congelamento dell'acqua tecnica nell'impianto causerebbe infatti gravissimi danni ai componenti della pompa di calore. Generalmente si prevedono miscele di glicole a percentuali variabili tra il 15-25% che garantiscono protezione fino ai -15°C.

### 2.2.1 Il problema dello sbrinamento

La protezione fornita dal glicole permette dunque all'acqua che scorre nelle tubazioni interne di raggiungere temperature anche inferiori a 0°C. In queste condizioni l'umidità naturalmente contenuta nell'aria esterna può congelare a contatto con il fascio di tubi. Si viene così a formare un sottile strato di ghiaccio che ricopre le tubazioni impedendo lo scambio termico, necessario per il funzionamento del ciclo.

È quindi necessario prevedere cicli di sbrinamento che possano essere realizzati con varie tecnologie, si riportano le principali:

- **Inversione di ciclo:** In questo caso la pompa di calore rilevando temperature in ritorno dal circuito di captazione troppo basse interrompe la produzione di acqua calda, inverte il ciclo e produce acqua calda che scorre nel circuito dell'unità ad aria.
- **Resistenza elettrica:** Si prevede una resistenza all'interno dell'unità che preleva energia elettrica dalla rete e tramite effetto Joule fornisce calore allo scambiatore
- **Prelievo di acqua tecnica:** In questa configurazione si utilizza parte dell'acqua calda prodotta che viene deviata sull'unità esterna.

Le tecnologie hanno diverse efficienze, in base alle condizioni operative della pompa di calore si può individuare la migliore soluzione. In ogni caso i cicli di sbrinamento rappresentano sempre un consumo aggiuntivo per la produzione, diminuendo sensibilmente l'efficienza effettiva della pompa di calore. Lo sbrinamento rappresenta il maggiore limite delle EHP con scambio ad aria, in particolare nelle zone climatiche che presentano basse temperature invernali ed alti tassi di umidità.

### 2.3 Scambiatori geotermici

Con energia geotermica si indica il calore naturale della Terra. In termini tecnologici essa è associata a quella parte di calore terrestre che può essere estratta e utilizzata dall'uomo.

La radioattività naturale delle componenti contenute all'interno del pianeta Terra e i vari processi fisici che avvengono all'interno di essa sono le cause principali dell'energia geotermica. Di seguito si riporta in figura un esempio dell'andamento di vari profili di temperatura in funzione della profondità e si può notare come, sebbene in prossimità della superficie l'andamento di questi profili risulta essere molto diverso a seconda delle stagioni, ad una profondità di circa 15 m la temperatura si assesta su valori costanti.

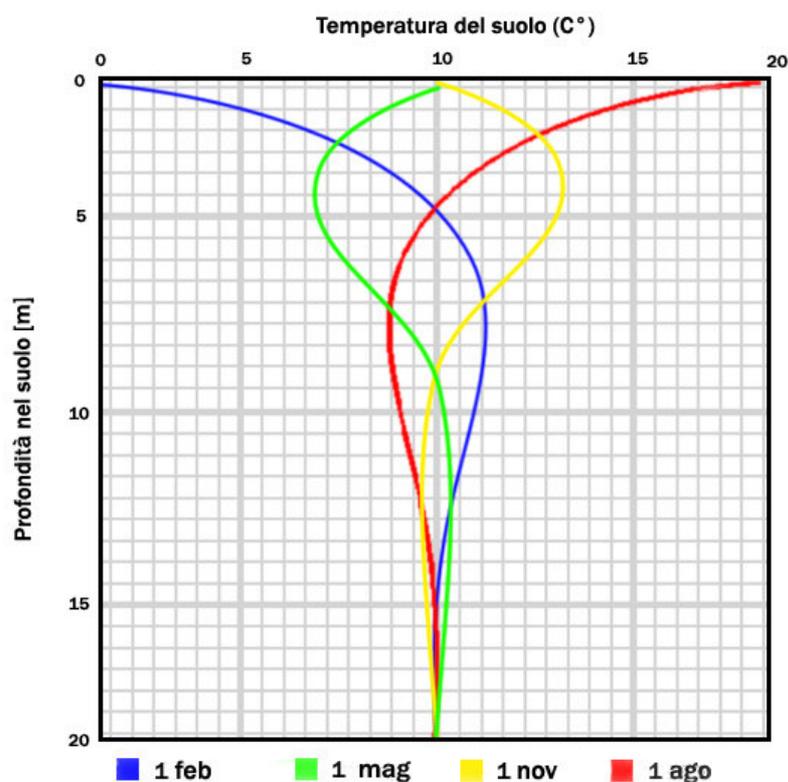


Fig. 3 : Andamento della temperatura nel sottosuolo 0-15 mt

Procedendo con la profondità, però, il valore di temperatura aumenta e grazie al gradiente geotermico è possibile quantificare questo incremento. Il valore medio è uguale a  $2,5^{\circ}\text{-}3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  per cui pensando che la temperatura nei primi metri sotto la superficie, corrisponda, con buona approssimazione, alla temperatura media annua dell'aria esterna, ovvero  $14,3^{\circ}\text{C}$  per la località in esame.

Le risorse geotermiche si dividono sulla base della temperatura in:

- Bassa entalpia  $T < 90^{\circ}\text{C}$
- Media entalpia  $90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$
- Alta entalpia  $T > 150^{\circ}\text{C}$

Le risorse geotermiche a Media e Alta entalpia si riscontrano in specifici siti, a profondità generalmente molto elevate. L'energia viene prelevata tramite acqua o vapore, l'applicazione principale è la produzione di energia elettrica.

Risorse a bassa entalpia sono invece disponibili su tutto il territorio, le perforazioni necessarie per sfruttare tale energia sono normalmente comprese tra 50 e 100 metri.

È proprio quest'ultima risorsa che viene utilizzata in combinazione con le pompe di calore per la climatizzazione degli edifici.

Il prelievo o smaltimento dell'energia nel terreno avviene tramite acqua come fluido termovettore, tramite circuiti aperti sfruttando l'acqua naturalmente presente nel sito (falde, fiumi, laghi, mare) o tramite circuiti chiusi costituiti da tubazioni in polietilene in cui circola acqua tecnica (serpentine orizzontali, sonde geotermiche verticali.)

Di seguito rappresentazione schematica delle tecnologie descritte:

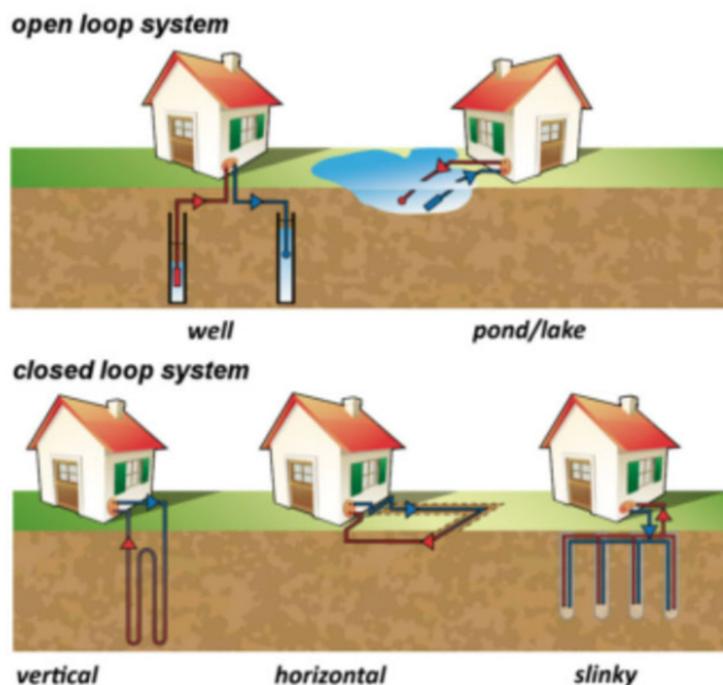


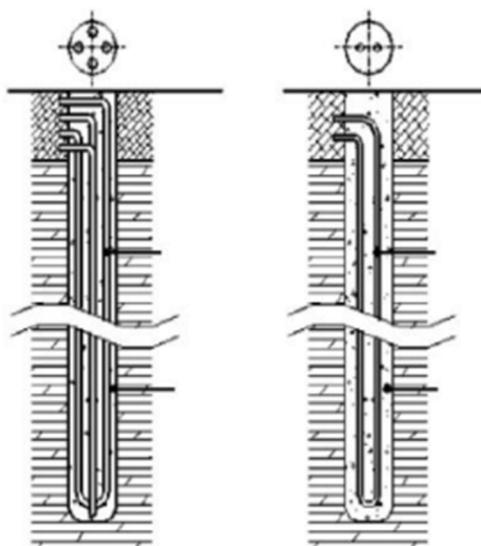
Fig. 4 : Tipologie di geo-scambiatori

### 2.3.1 Sonde geotermiche verticali

A seguito di specifici test ed analisi eseguite sul terreno, è possibile dimensionare in profondità e numero il campo sonde geotermiche da realizzare.

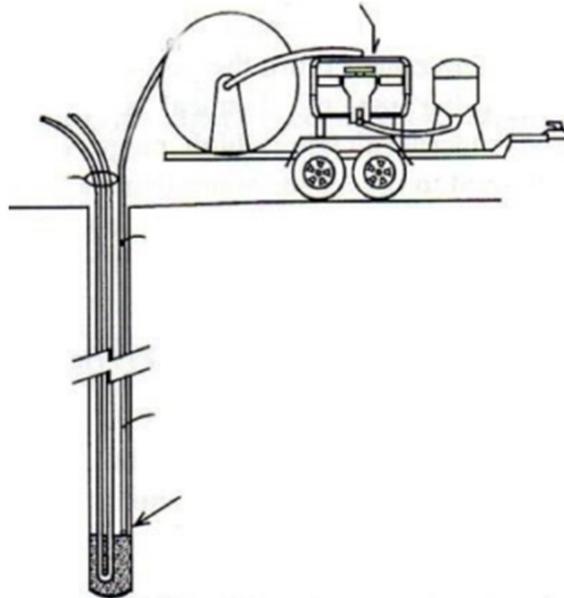
L'analisi dell'assetto stratigrafico consente la possibilità di valutare alternativamente due differenti tecniche di perforazione: a roto-percussione o a rotazione con distruzione di nucleo. Contemporaneamente all'avanzamento delle aste di manovra vengono posati i tubi di rivestimento almeno nella coltre superficiale alterata (presumibilmente nei primi 10-12 metri) per evitare il franamento del foro e per consentire la successiva installazione della sonda geotermica a regola d'arte. Se necessario, possono essere utilizzati fluidi di perforazione idonei compatibili con quanto previsto dalla normativa di riferimento. Il tubo di rivestimento viene rimosso dal foro all'atto del suo completamento e dell'installazione al suo interno della sonda geotermica.

Una volta completato il perforo fino alla profondità indicata, si provvede all'installazione al suo interno della relativa sonda geotermica (sonda costituita da tubazioni ad "U" o "doppiaU" in Polietilene PEHD), mediante l'utilizzo di un apposito srotolatore dotato di sistema frenante e di protezione di bocca-pozzo per la salvaguardia della sonda stessa. Al fondo della sonda può essere agganciata una zavorra, che, oltre a facilitare la discesa, contribuirebbe a mantenere i tubi allineati in fase di inserimento.



*Fig. 5 : Sonde geotermiche a doppia e singola U*

Una volta installata la sonda, si provvede alla cementazione delle intercapedini residue tra i tubi della sonda stessa e l'intradosso del perforo. Tale cementazione si realizza iniettando, a partire dal fondo del foro e per mezzo di un'apposita tubazione  $\varnothing 25$  mm Pe inserita in profondità assieme alla sonda geotermica, una miscela di cemento, bentonite e sabbia a conducibilità termica certificata e compresa tra 1,6 e 1,8 W/m°C. L'iniezione della miscela prosegue fino alla fuoriuscita della stessa dal bocca-pozzo: conseguito tale obiettivo si potrà procedere alla rimozione delle tubazioni di rivestimento provvisorio del perforo e, se necessario, al rabbocco finale della miscela cementizia per ottenere il riempimento completo del foro.



*Fig. 6 : Schema cementazione sonda geotermica*

Le sonde sono poi collegate tra loro tramite tratti orizzontali in trincee scavate generalmente tra 0,5-1 mt di profondità. Vengono quindi unificati i flussi in un unico collettore provvisto di valvole di bilanciamento, la cui mandata e ritorno si interfacciano direttamente con la pompa di calore. L'acqua tecnica all'interno della sonda geotermica può anche raggiungere temperature prossime a 0°C in pieno picco di funzionamento invernale, è quindi necessario come per gli scambiatori aria-acqua, aggiungere l'acqua tecnica con glicole, propilenico o etilenico.

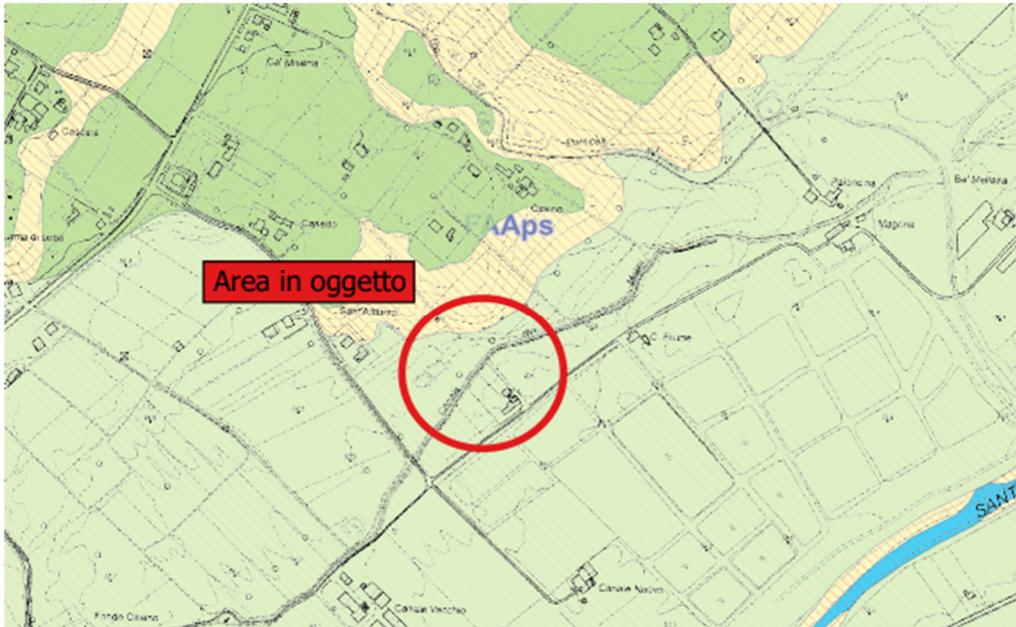
## 3 IMPIANTO IN ANALISI

### 3.1 Sito

#### 3.1.1 Inquadramento morfologico e geologico dell'area

L'area oggetto di studio è situata nel comune di Imola (BO), località Ponticelli, in un contesto morfologico di pianura caratterizzata dalla presenza di superfici topografiche regolari e sub-pianeggianti che digradano con bassa pendenza verso il Fiume Santerno, in direzione SE. Come evidenziato nell'estratto della Carta Tecnica Regionale riportato in allegato, il sito si trova ad una quota assoluta della superficie topografica pari a circa m. 61,4 s.l.m., in una zona pianeggiante in prossimità del Fiume Santerno e del Canale dei Molini. La suddetta zona insiste su un complesso di depositi sedimentari continentali di origine alluvionale. In tale ambiente deposizionale la distribuzione delle varie facies litologiche è condizionata fortemente dalla disposizione dei principali canali fluviali, i quali erano in passato soggetti a frequenti e ripetute tracimazioni, non essendo in grado di contenere buona parte delle piene stagionali. Le acque fuoriuscite dagli alvei in tali circostanze inondarono i territori adiacenti e depositavano i materiali in carico con una gradazione dei sedimenti proporzionale alla capacità di trasporto del flusso; a maggiori distanze dagli alvei si instaurano condizioni palustri in corrispondenza delle quali avveniva la deposizione delle frazioni più fini dei sedimenti alluvionali, intervallati da materiali più grossolani che raggiungevano queste aree solo in occasione di piene eccezionali.

L'esame della Carta Geologica evidenzia come il sito in oggetto insista sul Subsistema di Ravenna (AES8), più nello specifico nell' Unità di Modena (AES8a), costituito da un' unità stratigrafica a limiti inconformi depositasi tra il Pleistocene superiore e l'Olocene. Tali depositi sono descritti come "sabbie e limi di canale, argine e rotta fluviale", costituiti da "sabbie da finissime a grossolane, localmente limose... alternate a limi, limi sabbiosi e subordinatamente limi argillosi", che formano corpi sedimentari a geometria prevalentemente nastriforme e tabulare/allungata. Al di sotto del Subsistema di Ravenna è possibile riscontrare il Subsistema di Villa Verucchio (AES7). Entrambe le unità insistono su un substrato di origine marina attribuito alla Formazione delle Argille Azzurre – litofacies pelitico sabbiosa. Si riporta di seguito stralcio della Carta Geologica del sito in esame:



*Fig. 7 : Carta geologica sito*

Rispettivamente: In verde chiaro AES8a: Unità di Modena, verde scuro AES8: Subsistema di Ravenna, in beige FAAps: Argille azzurre.

### 3.1.2 Inquadramento idrologico e idrogeologico dell'area

L'area in esame è solcata da numerosi scoli e canali che fluiscono generalmente in direzione appenninica, con andamento pressoché rettilineo. In particolare, vanno segnalati:

- Il Canale dei Molini, di origine antropica, che scorre 60 metri a Nord-Est del sito in direzione SW-NE;
- Il Fiume Santerno, che fluisce con andamento moderatamente sinuoso in direzione SW-NE, circa 500 metri a Sud-Est del sito in oggetto.

La deposizione dei sedimenti su cui insiste il sito in oggetto è attribuibile a tale Fiume. La regimazione delle acque meteoriche è affidata ad una rete di fossi e scoline di derivazione agricola concentrati, in particolar modo, in corrispondenza delle aree interpoderali e lungo i principali assi viari. Per quanto riguarda la circolazione idrica sotterranea si riscontra la presenza di una falda idrica nel sito in oggetto, con profondità di soggiacenza compresa tra

4 - 5 metri. Il livello piezometrico della falda è da considerarsi suscettibile ad oscillazioni correlate all'andamento degli apporti meteorici.

### 3.1.3 Inquadramento climatico dell'area

Il Comune di Imola (BO) si trova in zona climatica E, dunque il periodo di climatizzazione invernale indicato risulta 15 ottobre - 15 aprile, considerando un massimo di 14 ore giornaliere di accensione impianto. I Gradi Giorno della località sono 2.292, Il grado-giorno (GG) di una località è l'unità di misura che stima il fabbisogno energetico necessario per mantenere un clima confortevole nelle abitazioni. Rappresenta la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, degli incrementi medi giornalieri di temperatura necessari per raggiungere la soglia di 20 °C.

Più alto è il valore del GG e maggiore è la necessità di tenere acceso l'impianto termico.

Il clima di Imola è classificato come caldo e temperato, vi è una piovosità significativa durante l'anno. La temperatura media annuale è pari a 14,3 °C. 898 mm è il valore di piovosità media annuale.

Di seguito si riporta la tabella dei principali dati climatici della località:

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Medie Temperatura (°C)	3,9	5,1	9,3	13,3	17,9	22,8	25,3	24,8	19,8	15,1	9,8	5
Temperatura minima (°C)	0,4	0,7	4,3	8	12,4	16,9	19,4	19,1	14,9	11,1	6,3	1,5
Temperatura massima (°C)	8,3	10	14,4	18,3	23	28,1	30,7	30,3	24,8	19,6	13,8	9,1
Precipitazioni (mm)	54	74	71	90	81	68	57	62	76	89	100	76
Umidità(%)	82%	77%	72%	70%	65%	59%	54%	58%	66%	76%	82%	83%
Giorni di pioggia (g.)	6	6	6	9	7	6	5	6	7	7	8	8
Ore di sole (ore)	4,9	6	7,8	9,2	11,2	12,4	12,5	11,3	9,2	6,3	5,1	4,9

*Tab. 1 : Dati climatici località Imola, BO*

### 3.2 Schema di impianto

La tecnologia multi-source consente di utilizzare alternativamente o contemporaneamente diverse fonti naturali di scambio termico. I vantaggi principali di questa tecnologia sono quello di ridurre il costo iniziale di investimento, ad esempio sostituendo parte del campo sonde con un'unità di scambio ad aria, in questo caso la somma dei contributi delle due risorse permette di soddisfare il fabbisogno di picco, e la possibilità di ottimizzare il sistema sfruttando sempre la fonte più conveniente istante per istante in base alla temperatura più favorevole. Il fluido, in assetto combinato, compie lo scambio sull'unità ad aria e successivamente scorre attraverso la sonda geotermica. L'impianto in esame, di potenza nominale richiesta 12 kW in riscaldamento, rientra nella tipologia di impianto dual-source: le risorse naturali a disposizione della pompa di calore sono, alternativamente o in serie, un'unità di scambio aria-acqua e una sonda geotermica verticale di profondità 90 mt. Si riporta di seguito schema di principio dell'impianto reale:

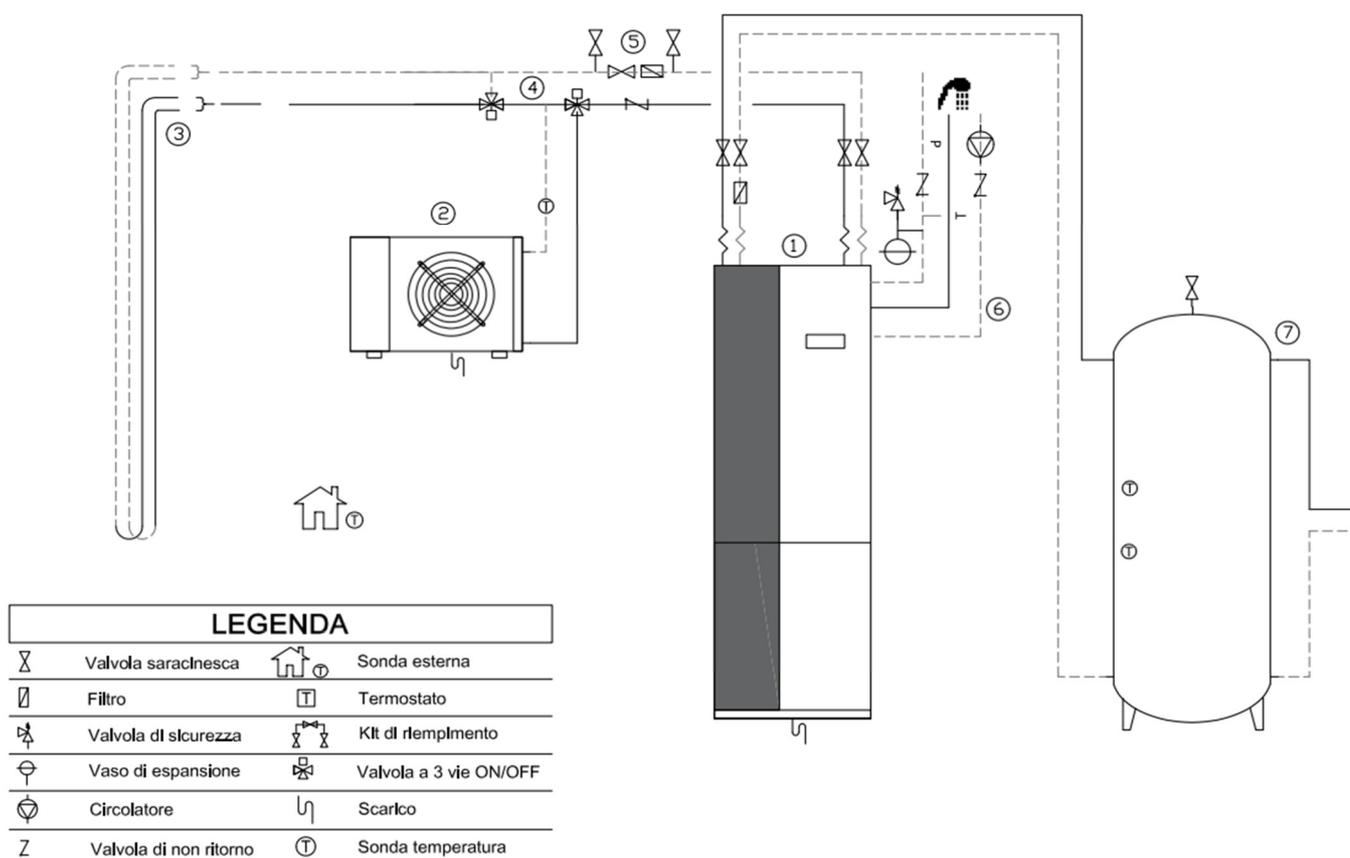
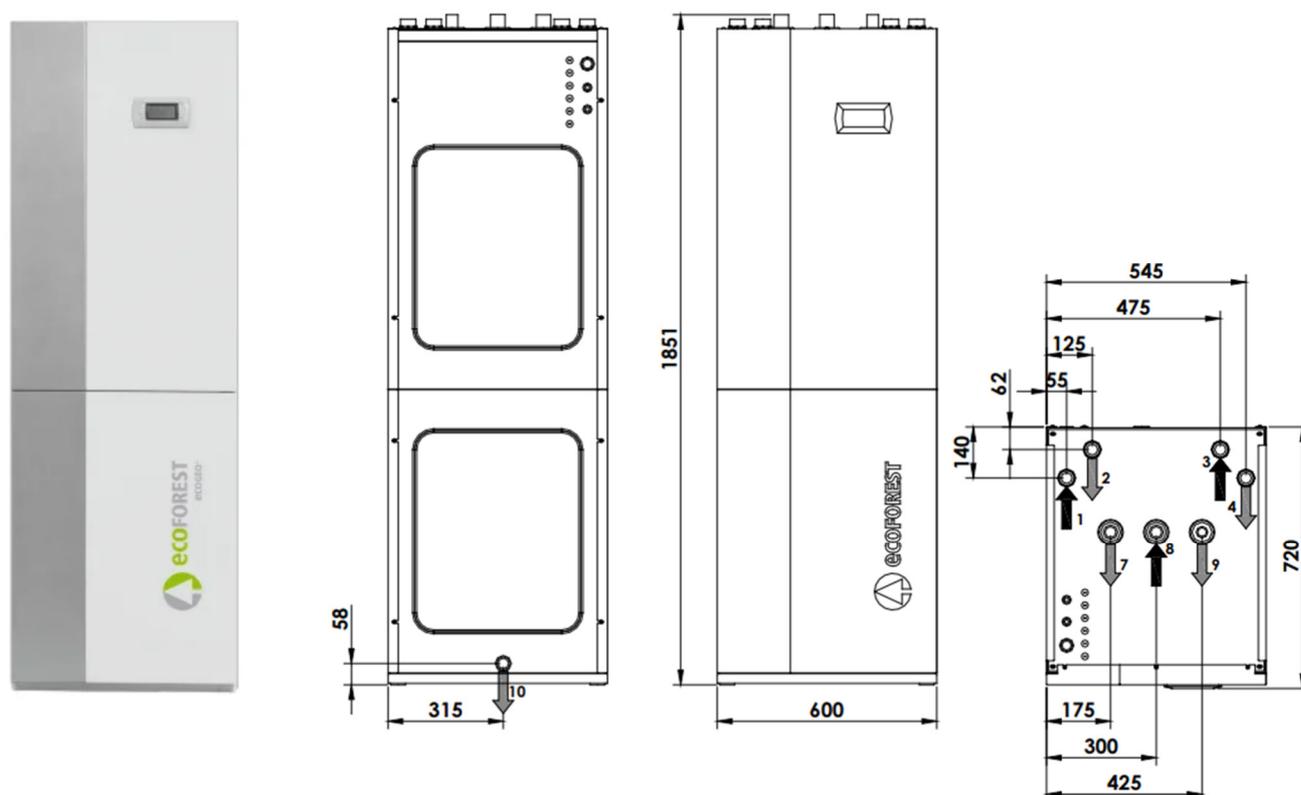


Fig. 8 : Schema impianto reale

### 3.3 Componenti

#### 3.3.1 Pompa di calore ecoGEO

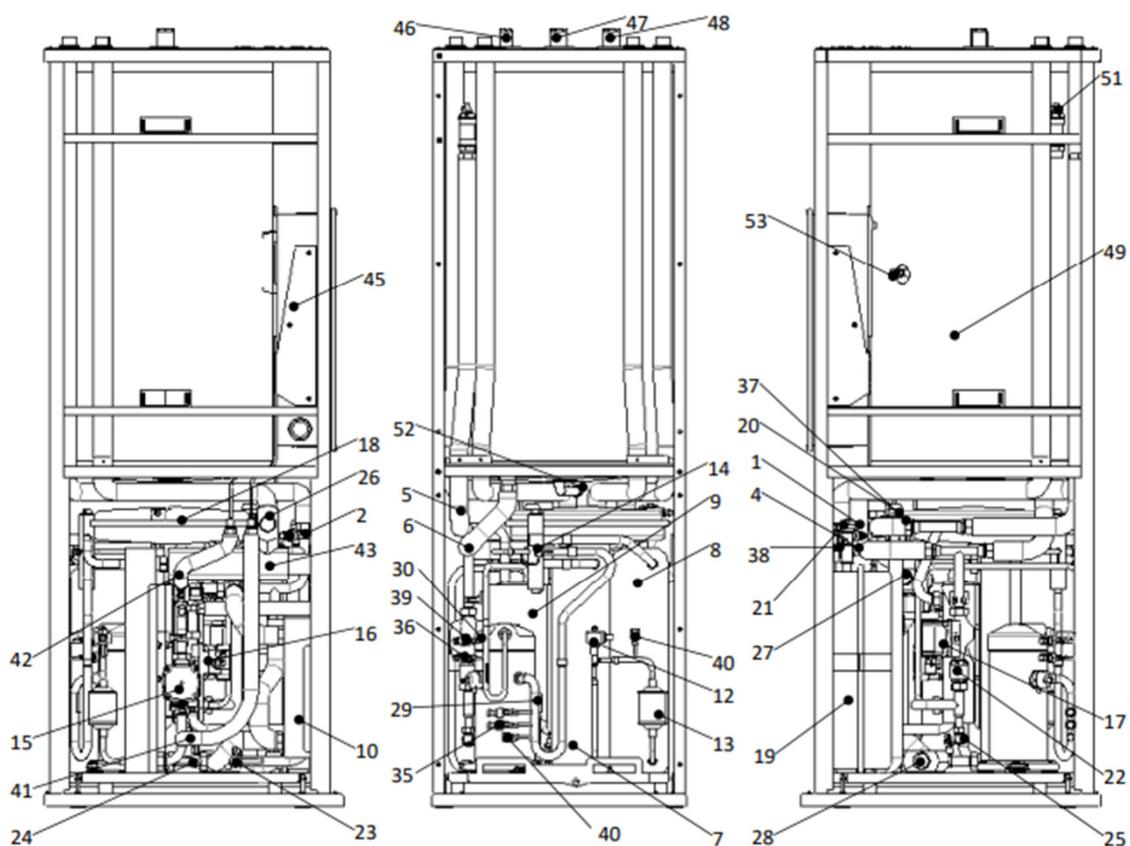
La pompa di calore installata nell'impianto in analisi (*Rif. nr. 1 - Fig. 8*) è modello ecoGEO+ 1-9 Compact, appartenente alla gamma ecoGEO di marchio Ecoforest. La pompa di calore, di tipo EHP water to water, presenta compressore con inverter, in grado di modulare la potenza di produzione istante per istante da 1 kW a 11 kW. Il fluido frigorifero è R410a, una miscela composta da R32 (diclorometano, CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) e R125 (pentafluoroetano, C<sub>2</sub>HF<sub>5</sub>), entrambi idrocarburi fluorurati. Di seguito si riporta immagine della pompa di calore e relativi dimensionali:



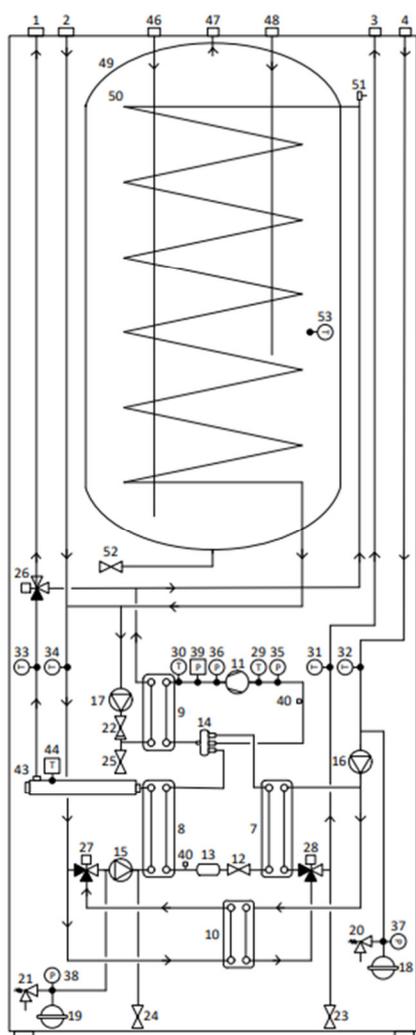
*Fig. 9 : Immagine e dimensionali ecoGEO+ 1-9 C4*

Il modello fa parte della gamma domestica Ecoforest di pompe di calore geotermiche, di cui sono disponibili tre diverse taglie con R410a e ulteriori tre con gas propano CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>.

L'unità contiene tutti i principali componenti necessari per il ciclo frigorifero, inoltre a bordo si trovano due circolatori inverter, due vasi di espansione e valvole di sicurezza (lato sorgente e lato produzione), un serbatoio di capienza 160 lt per la produzione di ACS (acqua calda sanitaria), scambiatore aggiuntivo di recupero calore e resistenze elettriche di emergenza. Sempre a bordo macchina si presentano valvole motorizzate, valvole di sezionamento, ritegno, svuotamento e tutta la sensoristica necessaria al monitoraggio. Di seguito si riportano schemi ed elenco dei componenti interni alla pompa di calore:



*Fig. 10 : Schema disposizione componenti interni*



N°	Descrizione	N°	Descrizione
1	Spinta produzione	28	Valvola freddo passivo captazione
2	Ritorno produzione	29	Sonda T <sup>°</sup> aspirazione compressore
3	Spinta captazione	30	Sonda T <sup>°</sup> scarica compressore
4	Ritorno captazione	31	Sonda T <sup>°</sup> spinta captazione
5	Spinta interaccumulatore di ACS	32	Sonda T <sup>°</sup> ritorno captazione
6	Ritorno interaccumulatore di ACS	33	Sonda T <sup>°</sup> spinta produzione
7	Evaporatore (ciclo diretto)	34	Sonda T <sup>°</sup> ritorno produzione
8	Condensatore (ciclo diretto)	35	Trasduttore pressione aspirazione
9	Interscambiatore sistema HTR	36	Trasduttore pressione di scarico
10	Interscambiatore freddo passivo/sbrinamento	37	Trasduttore di pressione captazione
11	Compressore	38	Trasduttore pressione produzione
12	Valvola di espansione elettronica	39	Mini-pressostato scarica
13	Filtro asciugatore	40	Preso di servizio
14	Valvola inversione ciclo	41	Spinta refrigerazione Inverter
15	Pompa circolatoria produzione	42	Ritorno refrigerazione Inverter
16	Pompa circolatoria captazione	43	Resistenza impulso
17	Pompa circolatoria HTR	44	Termostato di sicurezza
18	Vaso espansione captazione	45	Quadro elettrico
19	Vaso espansione produzione	46	Ingresso acqua di rete
20	Valvola di sicurezza captazione	47	Uscita di ACS
21	Valvola di sicurezza produzione	48	Ricircolo di ACS
22	Valvola di ritenzione sistema HTR	49	Accumulatore di ACS
23	Valvola di svuotamento captazione	50	Serpentina di ACS
24	Valvola di svuotamento produzione	51	Spurgatore manuale
25	Valvola di svuotamento sistema HTR	52	Valvola di svuotamento accumulatore
26	Valvola di ACS	53	Sensore di temperatura di ACS
27	Valvola freddo passivo produzione		

Fig. 11 : Elenco e ubicazione componenti interni

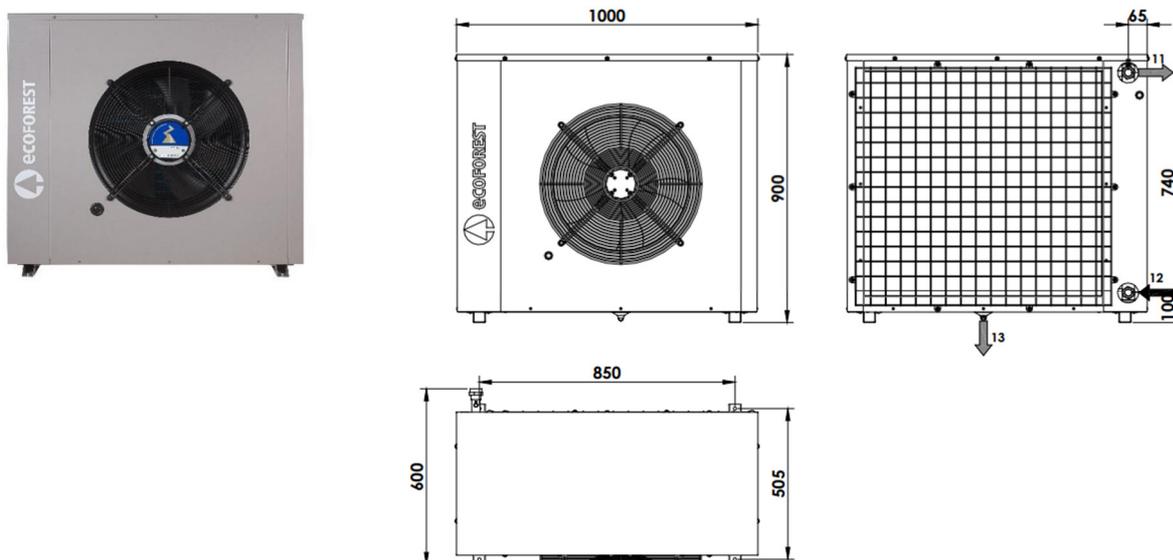
Gli attacchi idraulici sono sette in totale:

- Mandata e ritorno circuito di captazione
- Mandata e ritorno circuito di produzione
- Ingresso AFS (Acqua Fredda Sanitaria), uscita ACS, ed eventuale circuito di ricircolo ACS

### 3.3.2 Unità di scambio AU12

L'unità esterna di scambio aria-acqua (Rif. nr. 2 - Fig. 8) è installata nella pertinenza dell'abitazione. Il modello è denominato AU12, prodotto Ecoforest.

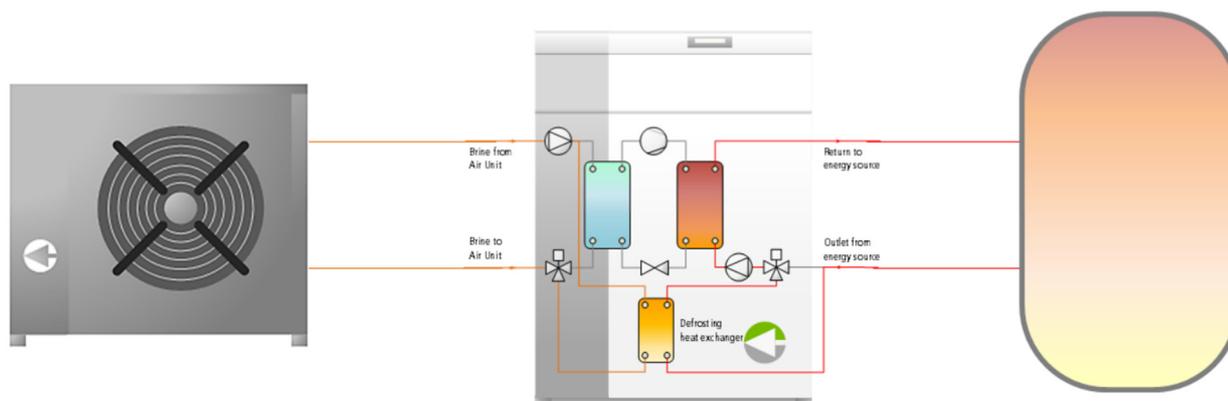
Si riportano di seguito immagine e dimensionali dell'unità:



*Fig. 12 : Immagini e dimensionali unità di scambio AU12*

Come descritto in precedenza, la criticità maggiore che presentano le unità di scambio ad aria è quella dello sbrinamento. I cicli di sbrinamento per l'unità AU12 vengono gestiti direttamente dalla pompa di calore, sfruttando la presenza dello scambiatore aggiuntivo per il recupero calore: la strategia non prevede infatti una vera e propria inversione del ciclo frigorifero, ma l'acqua calda da destinare all'unità esterna viene prelevata direttamente dal serbatoio di produzione.

Di seguito si riporta schema del funzionamento descritto:



*Fig. 13 : Schema del ciclo di sbrinamento*

Il ciclo frigorifero viene escluso e sono attivi i soli circolatori che portano allo scambiatore di recupero da un lato l'acqua calda proveniente dal serbatoio di produzione e dall'altra l'acqua del circuito di captazione.

Questa modalità, come tutte le procedure di sbrinamento descritte, penalizza il rendimento del sistema, infatti parte dell'energia termica prodotta per l'utenza viene reindirizzata all'unità esterna ed è dunque da sottrarre alla produzione utile. Il vantaggio rispetto alla soluzione di sbrinamento tradizionale è quello di evitare l'inversione di ciclo che richiede tempi di commutazione maggiori e soprattutto il funzionamento attivo del compressore.

Per l'impianto dual-source in esame un ruolo chiave per lo sbrinamento è giocato dalla presenza della sonda geotermica: nelle condizioni invernali di picco infatti entrambe le sorgenti saranno coinvolte nello scambio termico con priorità sulla risorsa geotermica, dunque la miscela acqua-glicole si presenta alla pompa di calore con una temperatura maggiore di quanto farebbe in assetto solo aerotermico, di conseguenza anche la temperatura del fluido in ingresso all'unità ad aria è sensibilmente più alta. In questo assetto si riduce notevolmente il range di condizioni esterne in cui si verifica il fenomeno di brinamento.

### 3.3.3 Componenti accessori circuito di captazione

A completamento dell'impianto sono previste valvole 3-vie motorizzate sul circuito di captazione (*Rif. nr. 4 - Fig. 8*), queste sono gestite direttamente dalla pompa di calore e permettono la gestione delle due risorse di scambio, in particolare determinano l'esclusione o l'inclusione dell'unità AU nel circuito.

Sempre sul circuito di captazione si installa un kit di riempimento manuale (*Rif. nr. 5 - Fig. 8*), composto da valvole di sezionamento e filtro, necessario per il primo riempimento dell'impianto e dosaggio del glicole. Sempre tramite questo kit è possibile procedere all'aggiunta di glicole se necessario a seguito delle verifiche annuali di concentrazione.

I kit manuali sono generalmente preferibili a quelli automatici, infatti in caso di perdite non evidenti del circuito questi ultimi provvedono in modo continuo al ripristino della pressione tramite prelievo dall'acquedotto, ne risulta un progressivo abbassamento della percentuale di glicole che può causare consistenti danni all'impianto.

### 3.3.4 Componenti accessori circuito di produzione

Come precedentemente descritto, la macchina presenta una doppia coppia di tubazioni lato edificio. Si presenta nell'impianto il circuito dedicato alla produzione ACS (*Rif. nr. 6 - Fig. 8*) composto da vaso di espansione aggiuntivo, valvola di sicurezza e linea di ricircolo con circolatore dedicato. La produzione ACS risulta il funzionamento generalmente più critico in termini di efficienza per le pompe di calore, a causa dell'alta temperatura richiesta.

La pompa di calore ecoGEO sfrutta lo scambiatore aggiuntivo a bordo macchina, sistema HTR, per una produzione ACS ottimizzata. Il funzionamento si differenzia in base alla stagione:

- STAGIONE INVERNALE (produzione in caldo)

Il ciclo frigorifero reale presenta una zona di surriscaldamento al termine della compressione, in cui è possibile cedere calore a temperature maggiori di quelle a cui avviene la condensazione. In questo frangente interviene lo scambiatore aggiuntivo che si occupa di recuperare tale energia termica ad alta temperatura e indirizzarla verso il serbatoio ACS. In questo modo la produzione vera e propria avviene alla temperatura di set dell'impianto di riscaldamento, ma si recupera una parziale produzione a temperatura maggiore da dedicare al serbatoio ACS.

Si riporta immagine che indica la zona del ciclo in esame sul diagramma T-S:

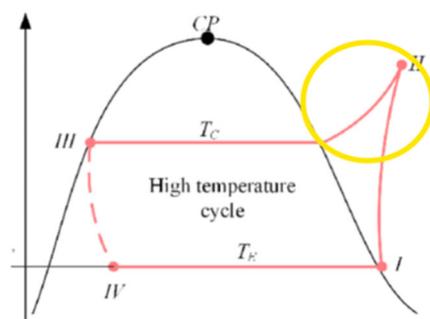


Fig. 14 : Grafico T-S sistema HTR

- STAGIONE ESTIVA (produzione in freddo)

Durante la produzione estiva si realizza il recupero totale tradizionale: l'energia termica da smaltire per poter produrre acqua fredda all'edificio viene deviata sul serbatoio ACS, quando necessario, invece che smaltita sul circuito captazione.

In termini di efficienza questa produzione ACS in recupero risulta del tutto gratuita e migliora notevolmente le prestazioni generali dell'impianto.

Si riportano di seguito schemi di principio delle due configurazioni sopra descritte:

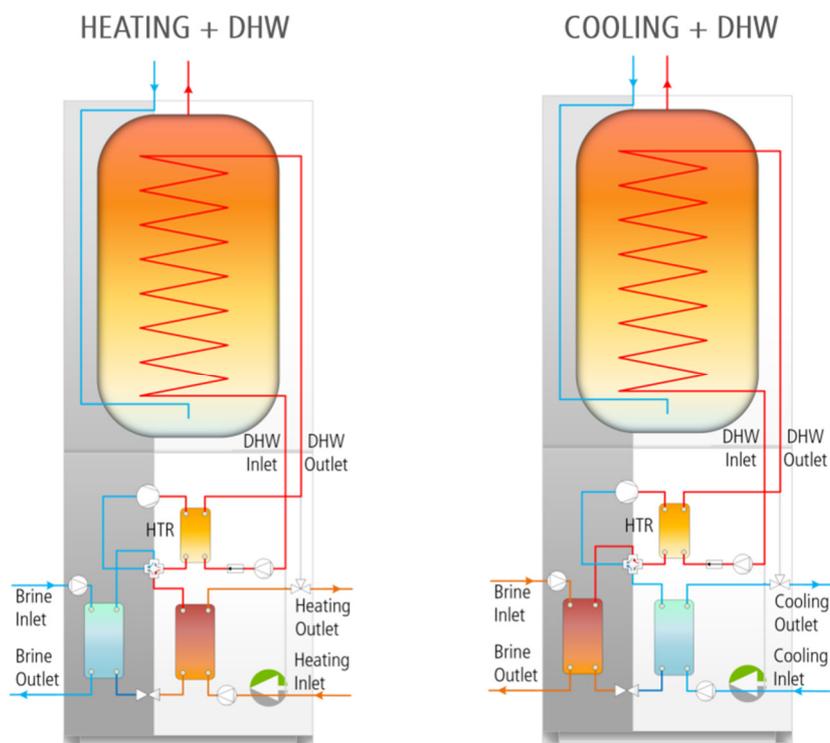


Fig. 15 : Schemi di principio sistema HTR

- Il secondo circuito è invece dedicato alla climatizzazione, presenta in parallelo un serbatoio inerziale (*Rif. nr. 7 - Fig. 8*) di volume 300 lt, al suo interno viene stoccata acqua calda o fredda, a seconda della produzione stagionale. Tale serbatoio garantisce minori oscillazioni di temperatura lato impianto e riduzione delle variazioni sulle richieste rilevate dalla pompa di calore, dunque accensioni/spegnimenti e repentine variazioni nella potenza in produzione. Inoltre, essendo installato in parallelo, rappresenta un punto di separazione tra generazione e distribuzione con conseguente maggiore flessibilità nella gestione delle portate e temperature agli elementi terminali.

### 3.4 Sonda geotermica

A servizio dell'impianto in oggetto è stata realizzata una sonda geotermica verticale di profondità 90 mt (*Rif. nr. 3 - Fig. 8*). Il dimensionamento, nel caso di impianto multisorgente, non è vincolato alla potenza di picco, ma al miglior compromesso tecnico-economico della proporzione tra le due risorse, aria e terreno.

Per la progettazione ed il dimensionamento di un sistema di geoscambio a circuito chiuso (sonda geotermica verticale) è necessario conoscere alcuni parametri fisici fondamentali del terreno interessato dal sistema stesso, in particolare:

- temperatura indisturbata del terreno;
- conduttività termica;
- capacità termica volumetrica

In primo luogo si stabilisce una stratigrafia presunta, con riferimento all'assetto geologico descritto precedentemente nella sezione 3.1.1

La successione stratigrafica presunta è:

- da m. 0 a m. 0,5 circa, terreno alterato e/o di riporto;
- da m. 0,5 a m. 3,0 circa, limi sabbiosi con intercalazioni sabbiose;
- da m. 3,0 a m. 5,0 circa, ghiaie a sabbie addensate;
- da m. 5,0 a m. 120,0 circa, argille appartenenti alla Formazione Argille Azzurre

Si determinano quindi le caratteristiche termo-fisiche del terreno secondo la ricostruzione stratigrafica precedentemente indicata, tramite una stima dei valori medi (con il metodo della media pesata), in accordo con quanto indicato dalle Norme UNI 11466:2012 “Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti per il dimensionamento e la progettazione”

Di seguito tabella di calcolo preliminare delle caratteristiche termo-fisiche:

<b>Caratteristiche termo-fisiche dei terreni del sito di progetto (valutazioni preliminari su basi tabellari e con riferimento a stratigrafia presunta)</b>							
PROFONDITA' (m)		SPESSORE	LITOTIPO	UMIDITA'	CONDUCIBILITÀ TERMICA	DENSITA'	CAPACITÀ TERMICA VOLUMETRICA
inizio	fine	(m)			(W/m K)	(kg/m <sup>3</sup> )	[MJ/(m <sup>3</sup> K)]
0,0	0,5	0,5	Suolo	secchi	0,47	1,40	1,60
0,5	3,0	2,5	Limi Sabbiosi	secchi	0,80	2,00	1,50
3,0	5,0	2,0	Ghiaie e sabbie addensate	saturi	2,20	2,20	2,50
5,0	120,0	115,0	Argille e argille limose	saturi	1,70	2,10	2,00
<b>Valor medio sui primi 122 metri</b>					<b>1,68</b>	<b>2,10</b>	<b>2,00</b>

Tab. 2 : Caratteristiche termo-fisiche del terreno presunte

### 3.4.1 Dimensionamento EED

Il dimensionamento delle sonde geotermiche viene effettuato mediante software di calcolo EED 3.2 (Blocon). La simulazione viene eseguita sul lungo periodo, per meglio valutare il comportamento dello scambiatore.

Il procedimento di imputazione dei dati prevede anzitutto l’inserimento delle proprietà termiche del terreno, sopra riportate. Successivamente, si imputano le caratteristiche geometriche e fisiche dello scambiatore di calore a terreno, la tipologia di sonde geotermiche, nel caso specifico a doppia U. Si inseriscono quindi il diametro di perforazione, la resistenza di contatto tubo/riempimento, la conduttività termica della miscela di cementazione, la portata all’interno dei singoli pali, il diametro e lo spessore della tubazione delle sonde.

Di seguito si riportano alcune schermate del software EED utilizzato:

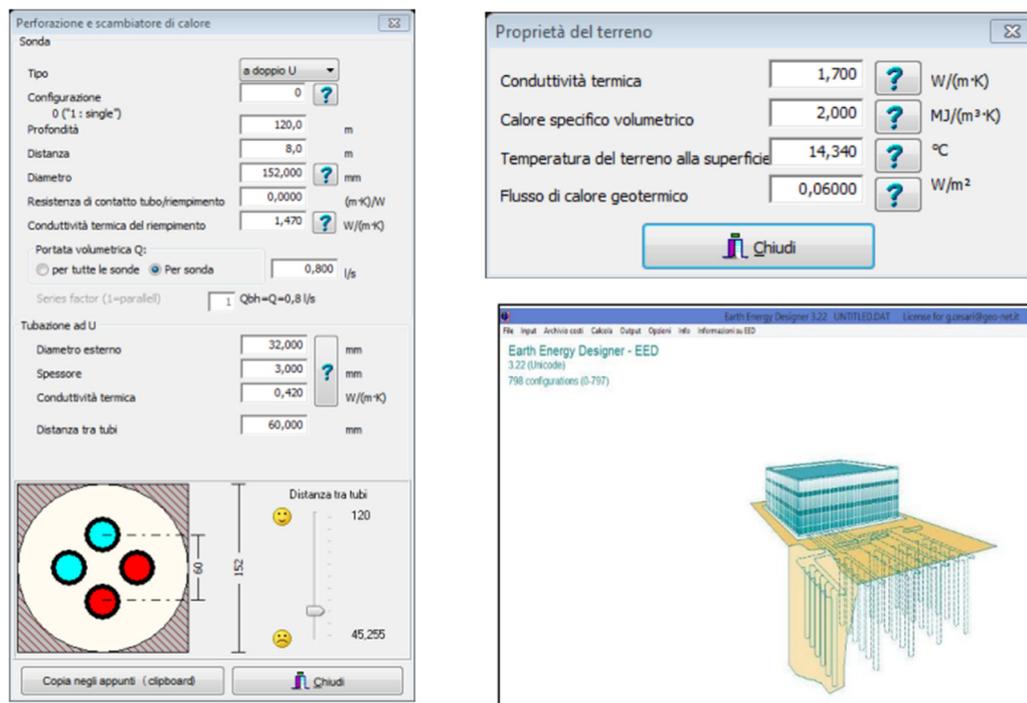


Fig. 16 : Schermate di input EED

I dati riguardanti il geoscalambiatore sono quindi completati con le caratteristiche del fluido termovettore. Il software a questo punto prevede l'inserimento dei dati di fabbisogno energetico della struttura da climatizzare, suddivisi su base mensile in termini di riscaldamento e raffrescamento, oltre al dato complessivo di produzione annua di acqua calda sanitaria. I dati energetici possono essere ricavati da consumi reali, se è presente un monitoraggio pre-sostituzione o da simulazione energetiche. Il programma richiede inoltre l'inserimento dei valori medi di SPF (Stagional Performance Factor) che si desumono dai valori di COP/EER alle varie condizioni di funzionamento dell'impianto, tramite le schede tecniche delle pompe di calore di progetto.

Si riportano di seguito le schermate EED riguardanti i parametri energetici imputati.

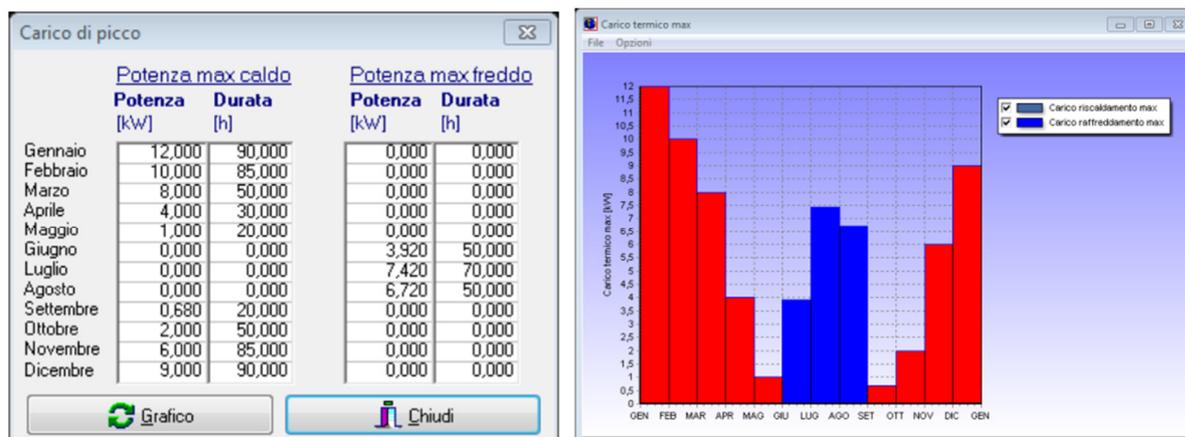


Fig. 17 : Schermate fabbisogni EED

Come anticipato precedentemente, il dimensionamento delle sonde geotermiche nel caso della configurazione multisorgente non si prefissa l'obiettivo di soddisfare pienamente le richieste dell'edificio. Nel caso specifico si è scelto di installare un'unità di scambio ad aria di potenza nominale 12 kW, che potrebbe dunque coprire autonomamente la potenza di picco. In base alla distribuzione delle potenze richieste sulle ore di funzionamento e nell'ottica dell'ottimizzazione, si dimensiona una singola sonda di profondità 90 mt, in grado di coprire indicativamente il 50% del picco di potenza lato produzione.

### 3.4.2 Caratteristiche tecniche di installazione

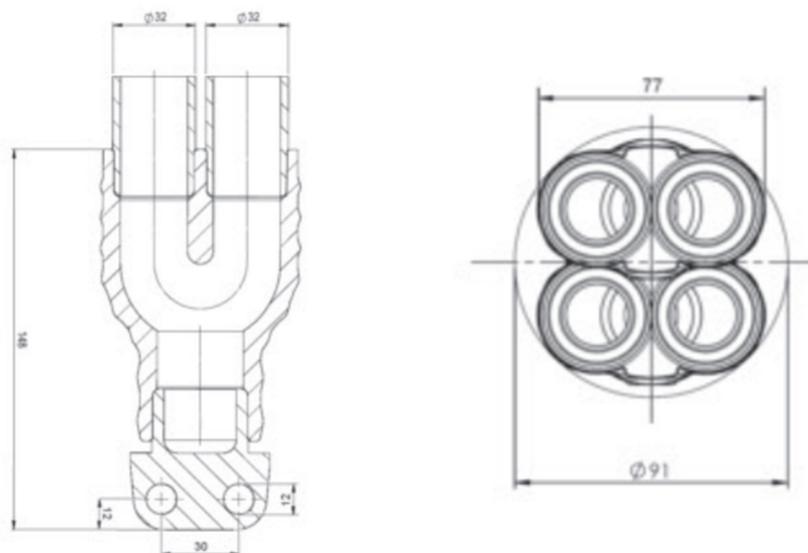
Si procede quindi alla realizzazione della perforazione e installazione del circuito così come descritto nella sezione 2.3.1

In fase di perforazione, il tecnico campiona a intervalli regolari il materiale di risulta, in modo da ricostruire e verificare la stratigrafia effettiva.

La cementazione viene effettuata con materiale Termoplast PLUS, un premiscelato appositamente studiato per il riempimento di pozzi geotermici. Si tratta di una speciale miscela di leganti cementizi da altoforno, bentoniti ad alto valore plastico e sabbie selezionate ad alta finezza (< 0,25 mm) ed elevata conducibilità termica, 2,3 W/Mk in condizioni di laboratorio. La cementazione è un aspetto fondamentale dell'installazione della sonda geotermica, il materiale scelto deve garantire la preservazione fisica della sonda e contemporaneamente garantire lo scambio termico con il terreno.

La sonda installata è un modello GEROtherm® di marca HakaGerodur, tipo doppia U in polietilene PE100.

Di seguito si riportano i dimensionali della sonda installata:

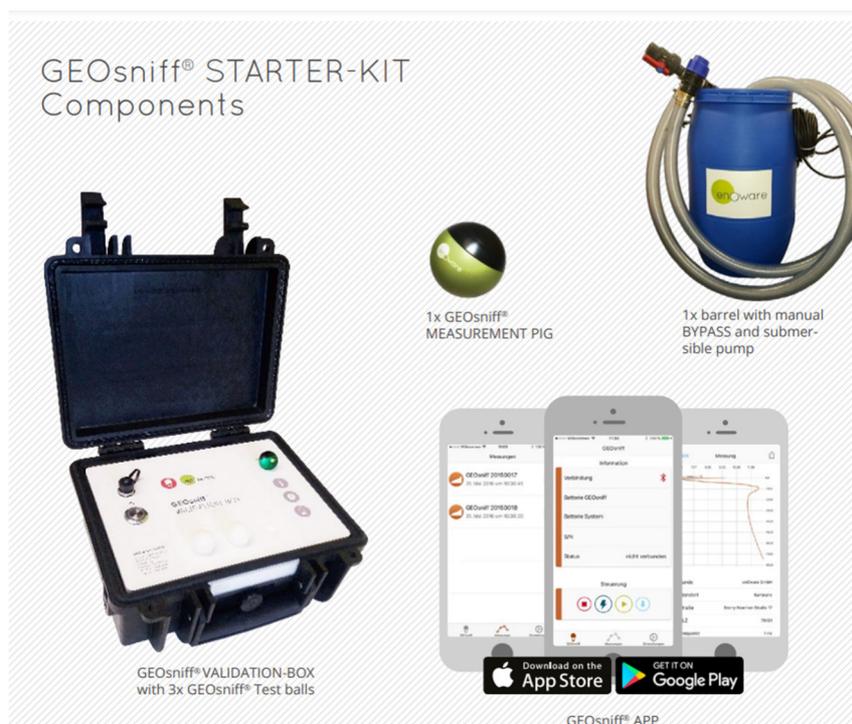


*Fig. 18 : Dimensionali sonda geotermica*

A seguito della realizzazione della sonda si procede ad un test di tenuta idraulica per certificare la corretta esecuzione. In particolare, si procede mettendo in pressione il circuito, risulta necessario che sia dapprima portato ad una pressione tale da vincere le dilatazioni della tubazione (circa 3,0 bar). A dilatazione avvenuta, si rimette il sistema in pressione e si procede a letture tramite manometro ad intervalli di tempo regolari, nell'ordine delle ore. Le prime letture potrebbero rilevare contenute diminuzioni dovute alla fuoriuscita di aria presente nel circuito, in tal caso è necessario riportare il circuito alla pressione di test. La caduta di pressione ammissibile da normativa non può superare in ogni caso il 30% della pressione di partenza. Se il valore si stabilizza nei limiti previsti con le letture successive, è possibile certificare la tenuta della sonda, quindi escludere perdite nel circuito.

### 3.4.3 Test avanzati

Una volta realizzata la perforazione ed installata la sonda geotermica è possibile eseguire ulteriori test di verifica sulla stessa. Al fine di ottenere dati completi e verificare la bontà dell'installazione su diversi fronti, le grandezze da monitorare lungo la profondità della sonda sono temperatura e pressione. Nel caso specifico è stata utilizzata la strumentazione "Validation Box" prodotta dall'azienda enOware. Le misure di temperatura e pressione vengono realizzate attraverso apposito sensore "GEOsniff®" che viene inserito nella sonda geotermica e raggiunge per gravità il fondo colonna all'interno della sonda stessa. Prima di inserire il PIG viene inserito preventivamente un PIN che funge da scandaglio per verificare la presenza di eventuali restringimenti o problematiche nella sonda geotermica. Una volta recuperato il sensore (PIG) attraverso apposita pompa di circolazione, i dati di temperatura e di pressione registrati con una risoluzione di 0,01 K e 1,0 mbar vengono trasmessi via wireless ad uno smartphone in formato .csv. Il set di parametri del test (compreso la frequenza di campionamento tipicamente pari ad 1 HZ) viene definito preliminarmente e controllato con accesso wireless tramite smartphone direttamente sul posto. Nel caso in esame, con una frequenza di campionamento pari ad 1 HZ si è ottenuto mediamente un dato ogni 10 cm circa. Di seguito si riportano immagini della strumentazione sopra descritta.



*Fig. 19 : GEOsniff Validation Box*

Questa strumentazione consente l'esecuzione delle seguenti verifiche:

1) Certificazione dell'effettiva profondità della sonda

La pressione rilevata dal sensore GEOSniff coincide con quella esercitata dalla colonna d'acqua a cui è sottoposto al momento della misura. La misura di massima pressione coincide con la massima profondità raggiungibile dal sensore, facilmente calcolabile conoscendo il diametro del ramo di sonda testato e le caratteristiche di densità del fluido termovettore.

2) Verifica della temperatura del terreno indisturbato

Evitando temporalmente i transitori termici dovuti al ricambio del fluido termovettore e della cementazione della sonda, è possibile eseguire un Log registrando la temperatura lungo la colonna in equilibrio termico con il terreno circostante. La media delle temperature registrate determina il valore di  $T_{ind}$ , ossia la temperatura del terreno indisturbato.

3) Verifica di corretta cementazione

Per procedere a tale verifica è necessario eseguire un Log termico nelle ore subito successive alla cementazione. Essendo la reazione di consolidamento del cemento una reazione esotermica, le misure di temperatura subiranno una traslazione verso l'alto, rispetto alle misure di temperatura indisturbata. Verificando che tale traslazione sia presente, proporzionalmente alle caratteristiche termiche dello strato di terreno, è possibile verificare che la cementazione sia avvenuta in maniera omogenea e idonea su tutta la profondità della colonna.

4) Enhanced Ground Response Test - EGRT

Il test EGRT è un'applicazione avanzata del tradizionale Thermal Response Test o Ground Response Test, abbreviato TRT o GRT. Il test consiste nell'imprimere alla sonda una sollecitazione termica costante e misurare a vari intervalli di tempo la temperatura del fluido. Questo test permette di verificare l'effettiva capacità della sonda di smaltire il calore fornito, in particolare gli output possibili sono:

- conducibilità termica del terreno  $k_g$
- resistenza termica della sonda  $R_b$  oppure la diffusività termica del terreno  $\alpha_g$

Per un test tradizionale TRT si connette un generatore di calore alla sonda, a potenza termica fissata, e si fa circolare il fluido termovettore all'interno della sonda a portata nota. Le misure

di temperatura vengono rilevate sul ramo di mandata e ritorno della sonda fuori dal terreno, dunque si ottengono dei dati medi relativi all'intera colonna.

Di seguito si riporta lo schema di funzionamento per test TRT.

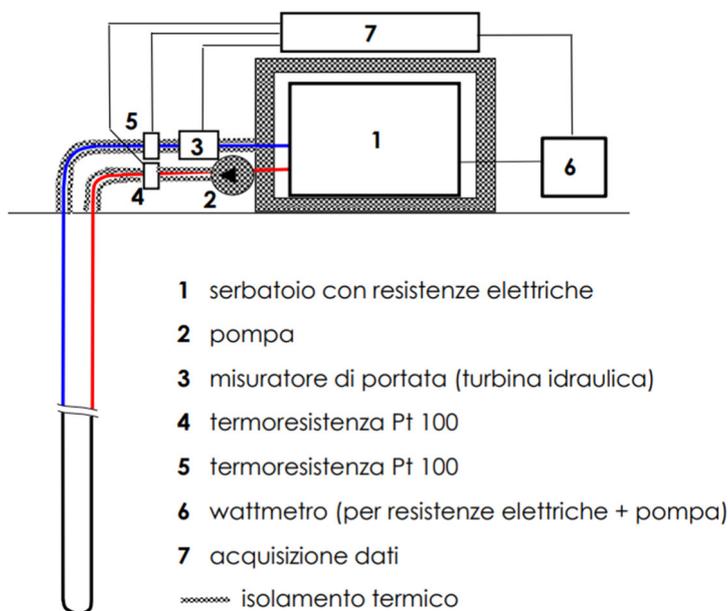


Fig. 20 : Schema test TRT

Per un test EGRT avanzato si utilizza un cavo scaldante immerso nel fluido termovettore della sonda e si procede a LOG successivi di temperatura su tutta la colonna a passo 10 cm di profondità. Per sonde a doppia U un ramo della sonda si utilizza per l'inserimento del cavo scaldante, che rimane inserito e attivo per tutta la durata della prova, mentre nel secondo ramo di sonda si eseguono i LOG termici con sensore wireless. Questo permette di ottenere, oltre ai parametri medi da utilizzare per il dimensionamento generale del sistema, anche una caratterizzazione stratigrafica delle grandezze. E' necessario stimare il tempo critico  $t_c$  del sistema per individuare l'intervallo di tempo minimo a cui svolgere le misurazioni per superare i transitori.

$$t_c = \frac{5a^2}{\alpha_g} \quad (3)$$

Dove  $a$  è il raggio interno della sonda, e  $\alpha_g$  è stimato da stratigrafia.

Una volta raccolti i dati di temperatura, tempi delle rilevazioni e di potenza termica impressa al sistema, è possibile procedere al post-processing. Il calcolo si basa sul Metodo Infinite

Line Source (ILS), in cui la sonda è approssimata come una sorgente lineare infinita posta in un solido omogeneo infinitamente esteso, ossia il terreno.

A questo modello è associato il seguente campo di temperatura nel terreno in funzione del tempo e della coordinata radiale r:

$$T(r, t) = \frac{q_l}{4\pi k_g} \int_{\frac{r^2}{4\alpha_g t}}^{\infty} \frac{e^{-\beta}}{\beta} d\beta + T_g \quad (4)$$

Per i test di risposta termica si utilizza la forma approssimata.

$$T(r, t) = \frac{q_l}{4\pi k_g} \left[ \ln\left(\frac{4\alpha_g t}{r^2}\right) - 0.5772 \right] + T_g \quad (5)$$

Dove 0,5772 è la costante di Eulero. È possibile rielaborare l'equazione come segue:

$$T_m(t) - T_g = \frac{q_l}{4\pi k_g} \ln t + \frac{q_l}{4\pi k_g} \left[ \ln\left(\frac{4\alpha_g}{a^2}\right) - 0.5772 \right] + q_l R_b \quad (6)$$

$$T_m(t) - T_g = A \ln t + B \quad (7)$$

In cui:

$$A = \frac{q_l}{4\pi k_g} \quad (8)$$

$$B = q_l \left\{ R_b + \frac{1}{4\pi k_g} \left[ \ln\left(\frac{4\alpha_g}{a^2}\right) - 0.5772 \right] \right\} \quad (9)$$

Si calcolano le variabili A e B considerando la  $T_g$  nota, e la  $T_m$  misurata a vari istanti di tempo di t durante il test, come coefficienti della relazione lineare di  $\ln(t)$ .

Dalla costante A è possibile determinare il valore di  $K_g$ , mentre dalla variabile B si possono ottenere alternativamente  $R_b$  o  $\alpha_g$ . La norma ASHRAE suggerisce di stimare il valore di  $\alpha_g$  dalla stratigrafia presunta, ed eventualmente confermata o corretta da campionamenti in fase di perforazione, ed utilizzare il presente metodo per calcolare  $R_b$ .

Nel post-processing di un test EGRT tali calcoli vengono svolti per LOG raccolto, ottenendo quindi i parametri discretizzati su tutta la profondità.

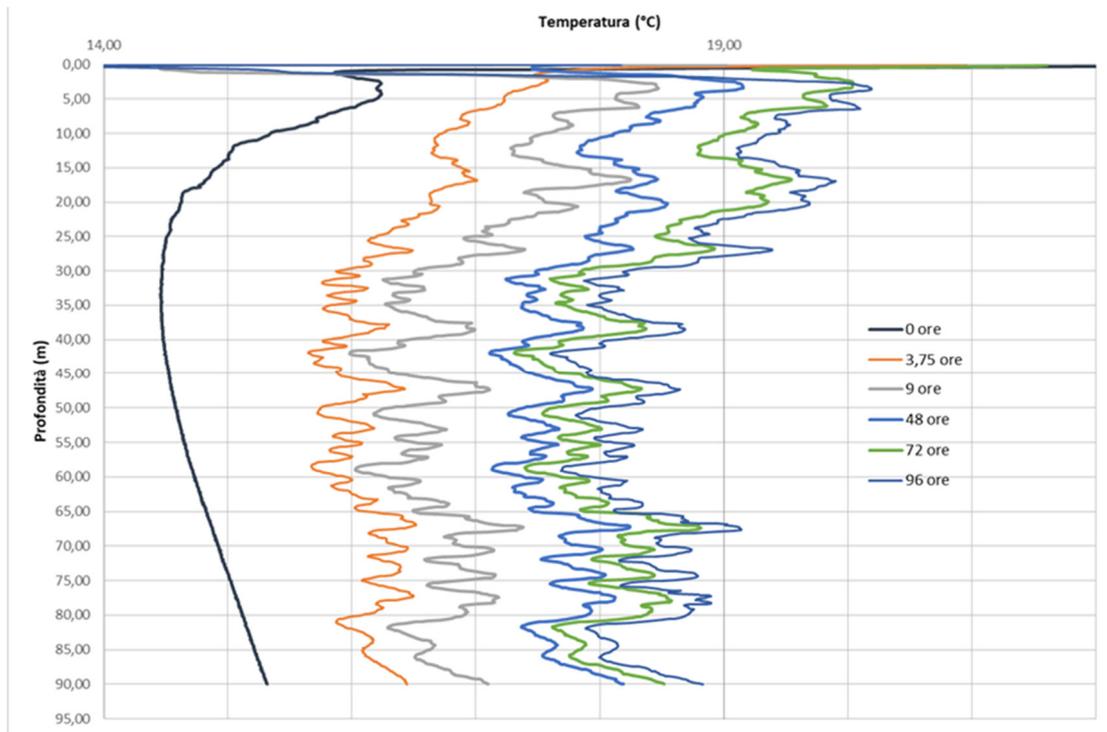
Si descrivono di seguito caratteristiche e esiti di test EGRT eseguito nell'area in esame.

A seguito della determinazione di  $T_{ind}$  ( o  $T_g$ ) e  $t_c$ , si programmano gli intervalli di misura dei profili di temperatura nel tempo, di seguito elencati:

Misure di temperatura	Tempo	Cavo scaldante
Misura n.0 (Temp. Indisturbata)	T = 0 ore	OFF
Avvio fase scaldante	-	ON
Misura n.1 (Temp. disturbata)	T = 3,75 ore	ON
Misura n.2 (Temp. disturbata)	T = 9 ore	ON
Misura n.3 (Temp. disturbata)	T = 22 ore	ON
Misura n.4 (Temp. disturbata)	T = 48 ore	ON
Misura n.5 (Temp. disturbata)	T = 72 ore	ON
Misura n.6 (Temp. disturbata)	T = 96 ore	ON

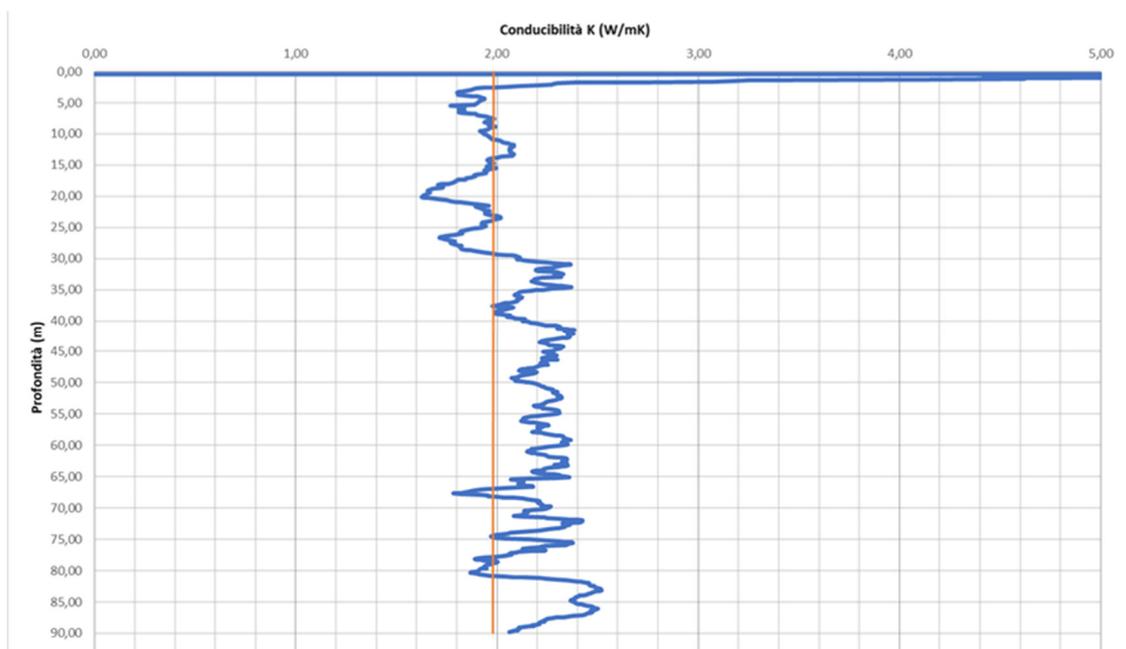
*Tab. 3 : Intervalli LOG test EGRT*

Si impostata una potenza termica specifica di dissipazione pari a 19 W/m, sulla base delle caratteristiche del cavo scaldante. Complessivamente la potenza totale sull'intera sonda geotermica è stata pari a circa 1,7 kW. La fase di sollecitazione termica ha una durata di 96 ore, quindi in linea con le norme nazionali UNI 11466 e con quelle internazionali ASHRAE. L'energia termica dissipata nell'arco delle 96 ore di sollecitazione termica è stata pari a circa 164,2 kWh. Nel grafico riportato l'andamento dei profili di temperatura ottenuti in campo al tempo iniziale del test (T = 0), durante la sollecitazione termica (T = 3,75, 9, 22, 48 e 72 ore) ed alla fine della sollecitazione termica stessa (T= 96 ore).



*Fig. 21 : LOG termici test EGRT*

I dati ottenuti si utilizzano per determinare la retta di interpolazione (7) e ottenere i profili di conducibilità termica e resistenza termica sulla profondità. Si specifica che i valori relativi ai primi metri non si considerano significativi, e perciò non vengono processati. Di seguito si riportano i grafici delle due grandezze ottenute.



*Fig. 22 : Conducibilità test EGRT*

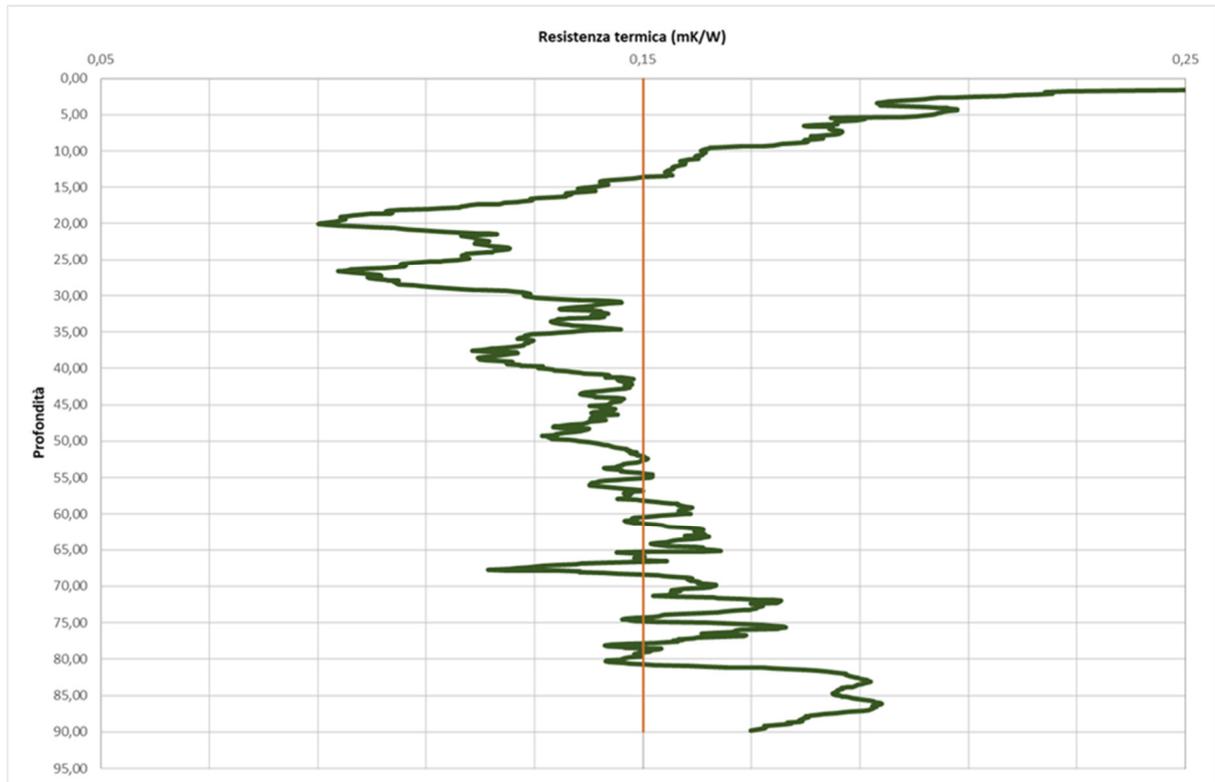


Fig. 23 : Resistenza test EGRT

Di seguito si riporta infine schermata di calcolo post-processing, contenente input utilizzati:

Lunghezza	TEMPERATURA												
90,00	0	3,74	9,01	22,09	47,75	70,07	93,48						
Cavo sc. on	LOG 0	LOG 1	LOG 2	LOG 3	LOG 4	LOG 5	LOG 6	q	α	a	γ		
Potenza totale	Tempo in sec	13.470	32.452	79.515	171.890	252.239	336.539	19,00	0,10	0,077	0,57		
1710,00							159.856		m <sup>2</sup> /day			0,963	
ln t	0	9,508	10,388	11,284	12,055	12,438	12,726			90,00	1,98	0,15	
prima riga	12		164,16							0	1,98	0,15	
ultima riga	505												
PROF.	0 ore	3,75 ore	9 ore	22 ore	48 ore	72 ore	96 ore	λ [-1]	A * ln(t)	B	λ [regr]	R <sub>s</sub> [regr]	
0,00	25,82	20,96	19,02	14,85	18,17	21,51	18,16	-1,74	-0,29	22,09	-5,20	0,95	
0,10	25,40	20,96	14,65	14,70	17,69	21,61	14,11	-0,71	-0,44	22,25	-3,47	0,96	
0,20	22,62	19,44	14,55	12,88	17,54	21,54	12,96	-0,75	-0,25	19,29	-6,14	0,77	
0,30	21,81	18,86	14,45	12,15	17,47	21,05	13,62	-0,93	-0,04	16,74	-36,12	0,68	
0,40	20,72	18,50	14,45	12,15	17,45	20,21	14,00	-1,08	-0,01	16,20	-242,95	0,62	
0,50	18,88	18,23	14,45	12,17	17,46	19,35	14,37	-1,26	0,01	15,89	151,94	0,52	
0,60	18,14	17,97	14,46	12,19	17,47	19,30	14,84	-1,55	0,14	14,42	10,64	0,45	
0,70	17,39	17,85	14,50	12,21	17,46	19,25	15,18	-1,82	0,21	13,63	7,06	0,39	
0,80	16,54	17,79	14,54	12,26	17,48	19,23	15,32	-1,98	0,25	13,27	6,08	0,34	
0,90	16,10	17,71	14,62	12,46	17,53	19,32	15,41	-2,12	0,29	12,92	5,29	0,31	
1,00	15,93	17,67	14,69	12,75	17,66	19,51	15,44	-2,18	0,32	12,62	4,71	0,29	
1,10	15,86	17,62	14,77	12,94	17,76	19,60	15,46	-2,25	0,34	12,45	4,42	0,28	
1,20	15,86	17,56	15,27	13,09	17,93	19,68	15,52	-2,39	0,33	12,78	4,62	0,29	
1,30	15,87	17,52	15,68	13,15	18,10	19,74	15,87	-2,96	0,36	12,52	4,15	0,28	
1,40	15,88	17,47	16,34	13,22	18,27	19,75	16,83	-7,57	0,47	11,67	3,25	0,26	
1,50	15,91	17,47	16,77	13,79	18,42	19,75	17,20	-17,64	0,48	11,80	3,17	0,26	
1,60	15,94	17,48	17,16	14,19	18,57	19,74	17,56	58,59	0,49	11,85	3,08	0,26	
1,70	15,97	17,50	17,29	14,40	18,62	19,74	18,14	7,56	0,57	11,14	2,66	0,24	
1,80	16,01	17,51	17,43	14,60	18,67	19,75	18,63	4,34	0,63	10,54	2,39	0,23	
1,90	16,03	17,52	17,64	14,71	18,72	19,80	18,89	3,54	0,66	10,39	2,30	0,22	
2,00	16,05	17,55	17,76	14,80	18,76	19,86	19,01	3,34	0,66	10,40	2,28	0,22	

Fig. 24 : Post-processing test EGRT

Dal test EGRT si verificano quindi tre parametri fondamentali, che saranno utilizzati nelle successive fasi di simulazione:

$$T_g = 14.95 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$K_g = 1,98 \text{ W/mK}$$

$$R_b = 0,15 \text{ mK/W}$$

L'approccio EGRT risulta molto utile per procedere a considerazioni approfondite, ad esempio:

- Determinare la presenza e profondità di acqua di falda, stimarne l'apporto in termini di scambio termico.
- Per campi sonde di grande taglia è fondamentale realizzare una perforazione pilota ed eseguire un test avanzato, in questo modo si può valutare non solo la potenza complessiva che è in grado di smaltire la sonda, ma anche a che profondità si presentano i migliori apporti di scambio: potrebbe risultare sconveniente ad esempio superare una certa profondità nella perforazione qualora il terreno non contribuisca sufficientemente allo scambio, o al contrario si potrebbe valutare l'aumento di profondità e la riduzione del numero di sonde qualora temperature e caratteristiche risultino più prestazionali a profondità elevate.

Di seguito si riportano alcuni esempi di risultati da test EGRT esemplificativi delle potenzialità in termini progettuali:

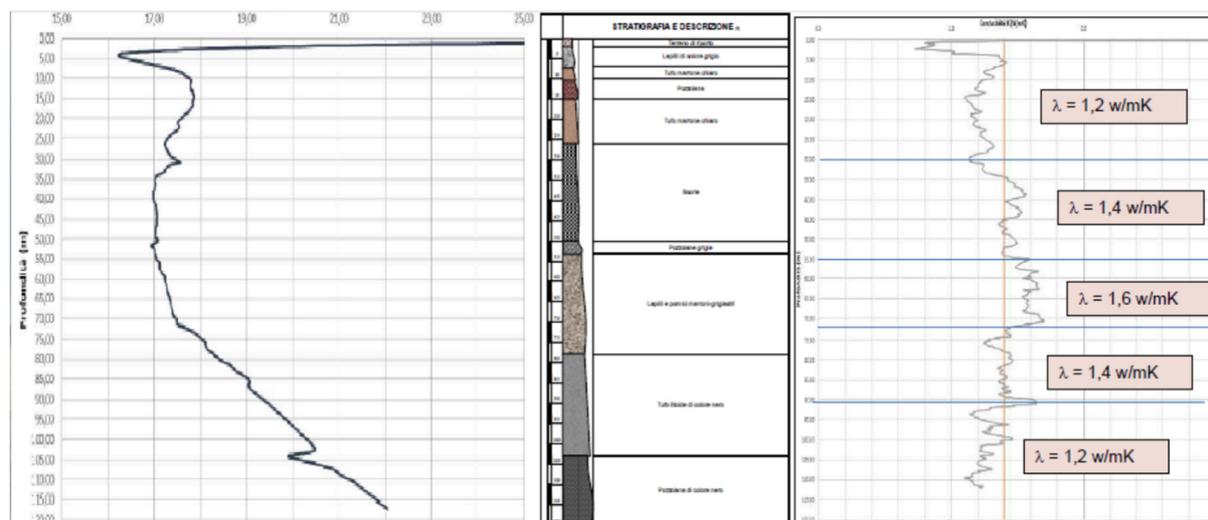


Fig. 25 : Corrispondenza stratigrafia-conducibilità EGRT

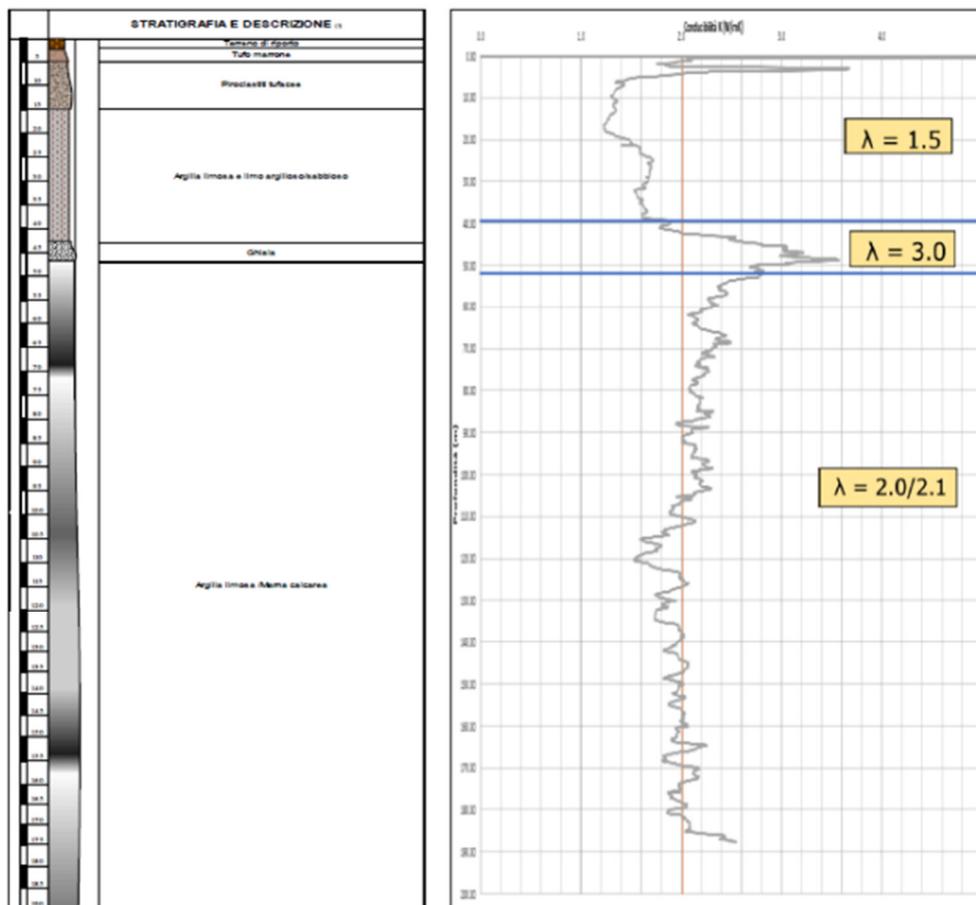


Fig. 26 : Individuazione acqua di falda EGRT

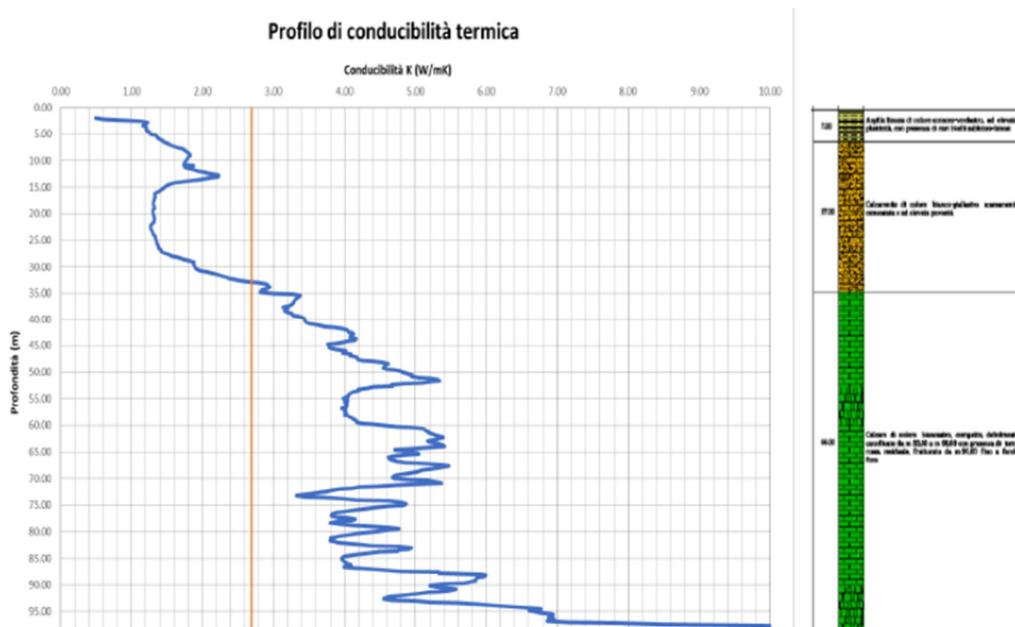
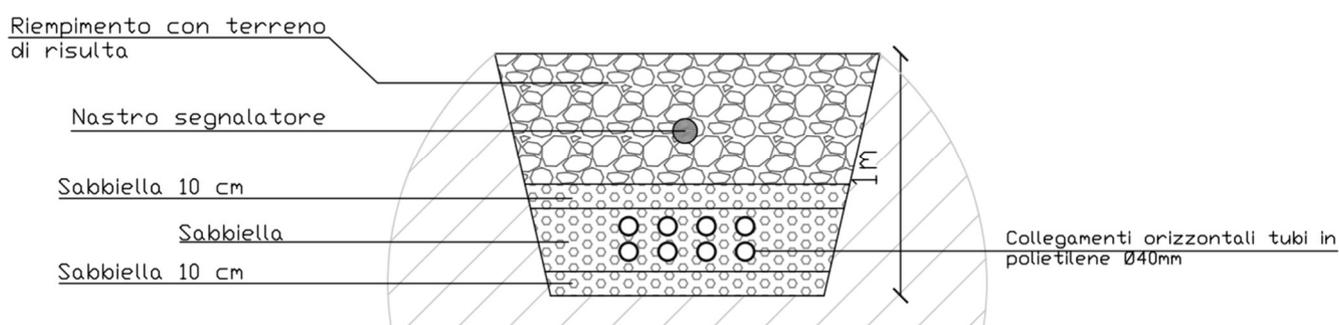


Fig. 27 : Conducibilità a profondità elevate EGRT

### 3.5 Collegamenti orizzontali

Una volta realizzata e testata la sonda, questa deve essere collegata ad un collettore geotermico, per circuiti di scambio con più di una sonda, o direttamente alla pompa di calore per circuiti con sonda singola. In caso di sonde geotermiche a doppia U è necessario prevedere dei raccordi a “Y” per collegare a coppie i quattro rami di sonda.

Si realizza dunque uno scavo, generalmente di profondità 0,8 - 1,0 mt circa, dalla testa sonda alla centrale termica o al pozzetto collettore. Sul fondo dello scavo viene realizzato uno strato di sabbietta su cui si posano tubi in polietilene, ricoperti da un ulteriore strato di sabbietta. È consigliato posare anche un nastro segnalatore, che possa facilitare l'individuazione delle tubazioni in caso di futuri scavi. Il tutto viene quindi coperto con terreno di risulta. Di seguito si riporta esempio della sezione degli scavi di collegamento orizzontali.



*Fig. 28 : Sezione scavi di collegamento*

### 3.6 Glicole propilenico

Terminata la realizzazione del circuito di captazione si procede al dosaggio del liquido antigelo, in questo caso glicole propilenico. La concentrazione è definita in fase progettuale in base alle temperature di esercizio previste. Nel caso specifico si determina una percentuale del 25%. Di seguito si riporta la tabella dei rapporti percentuale-protezione per il liquido antigelo utilizzato.

Proporzione di miscela		
Contenuto d'acqua dell'impianto	Quantità di anticongelante	Protezione fino a
100 lt	12 %	- 3°C
100 lt	18 %	- 6°C
100 lt	25 %	- 10°C
100 lt	32 %	- 15°C
100 lt	40 %	- 20°C

*Tab. 4 : Temperature protezione glicole*

È necessario calcolare il contenuto d'acqua delle seguenti sezioni del circuito di captazione:

- Sonda geotermica, quattro tubazioni Ø32 lunghezza 90 mt
- Collegamenti orizzontali, due tubazioni Ø40 lunghezza 10 mt
- Unità esterna, contenuto acqua interno
- Pompa di calore, contenuto acqua lato sorgente

Si ottiene dal calcolo dei volumi un totale del contenuto dell'impianto di 250 lt circa, a cui corrispondono 75 lt di glicole.

Una volta versata la quantità calcolata all'interno del circuito è necessaria una fase di miscelazione, detta di flussaggio, che consiste nel pompaggio forzato del fluido termovettore tramite il circolatore dedicato a bordo macchina o circolatore esterno ausiliario. Questa fase è fondamentale per la distribuzione omogenea del glicole in tutto il circuito, dunque per garantire una corretta protezione.

Al termine della miscelazione è opportuno procedere ad una misurazione tramite rifrattometro ottico per verificare la concentrazione effettiva. Il rifrattometro ottico sfrutta la proporzionalità tra la concentrazione di zuccheri in una sostanza e il suo indice di rifrazione, consentendo una lettura diretta del livello di protezione nel campione prelevato. Di seguito si riporta un'immagine dello strumento di misura.

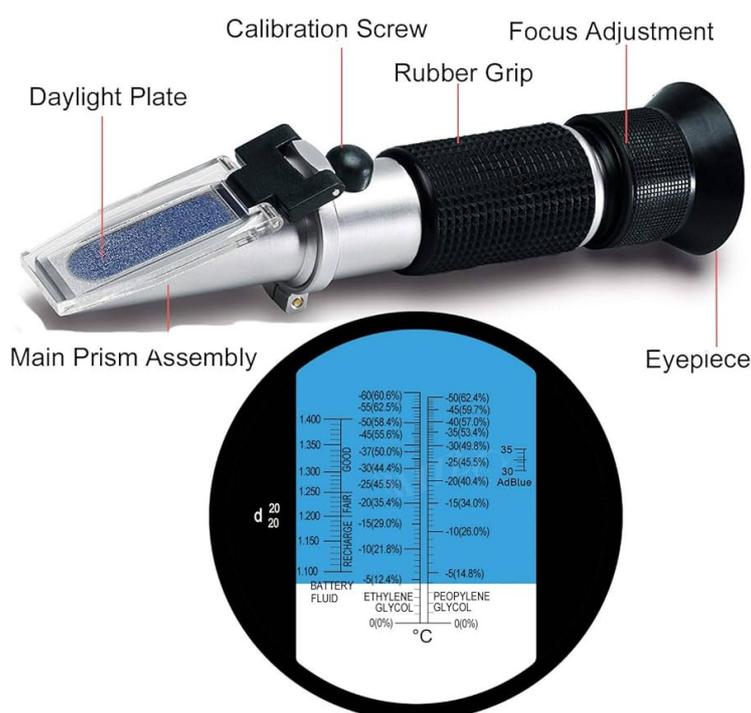
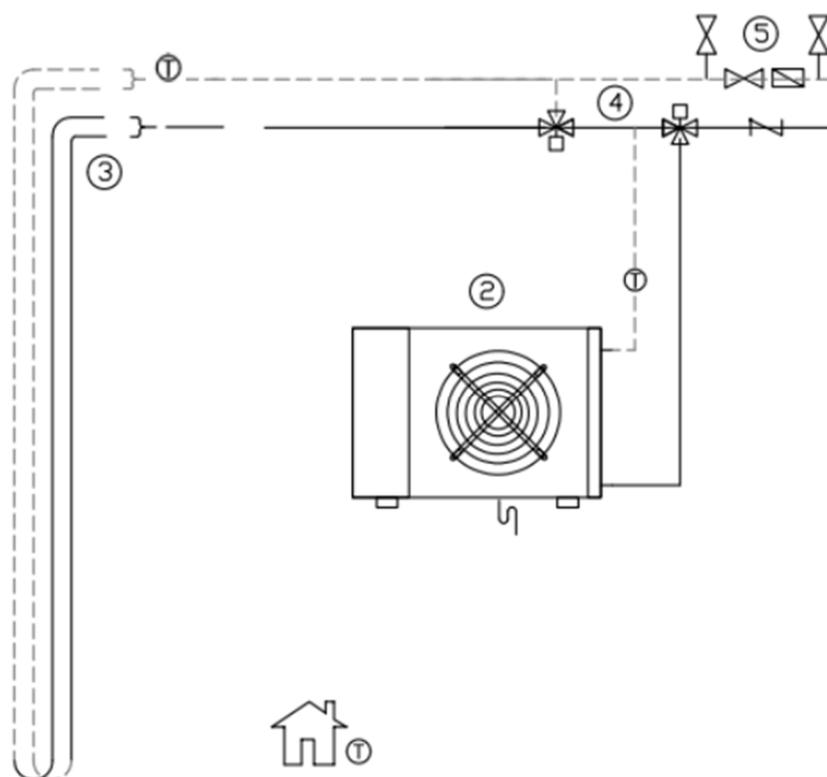


Fig. 29 : Rifrattometro ottico

Tale misurazione viene ripetuta normalmente con cadenza annuale in occasione della manutenzione ordinaria dell'impianto, provvedendo ad un rabbocco qualora risultasse necessario.

### 3.5 Logica di funzionamento multisorgente

L'elemento determinante per il buon funzionamento di un impianto multisorgente risiede nella corretta gestione delle risorse a disposizione. Per l'impianto in esame tale compito è svolto direttamente dall'elaboratore a bordo della pompa di calore. Le misure di temperatura in uscita dalla sonda geotermica e dell'aria esterna vengono lette in continuo e, a seconda della produzione istantanea, si individua la risorsa più conveniente per lo scambio. Le valvole motorizzate 3-vie vengono quindi governate per deviare il flusso sul circuito che garantisce l'efficienza maggiore. La singola risorsa viene utilizzata in modo prioritario fino a quando la potenza richiesta lo consente, non appena la richiesta supera le potenzialità della risorsa conveniente si affianca la seconda. Di seguito si riporta schema della porzione di impianto sopra descritta.



*Fig. 30 : Dettaglio circuito captazione*

### 3.6 Sistema di monitoraggio

Il monitoraggio puntuale e di dettaglio di un impianto geotermico risulta un elemento di grande utilità per il proprietario nella gestione dei propri consumi e di eventuali ottimizzazioni con impianti di produzione elettrica puntuale, tipicamente impianti fotovoltaici.

La raccolta dei dati tecnici, e la registrazione di questi ultimi in Cloud, permette inoltre ai tecnici incaricati della manutenzione di ricevere allarmi di eventuali malfunzionamenti, che permettono di intervenire anticipando guasti e garantire un servizio di assistenza da remoto.

Di seguito si riporta la schermata principale della piattaforma a cui è possibile accedere per la visualizzazione dei dati e la gestione da remoto dell'impianto.

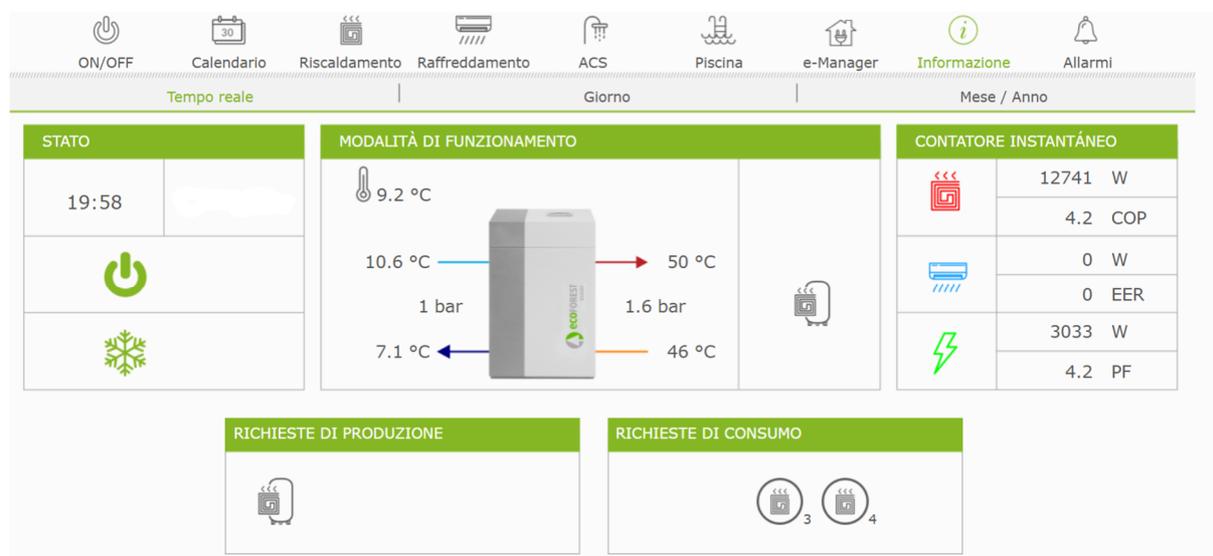


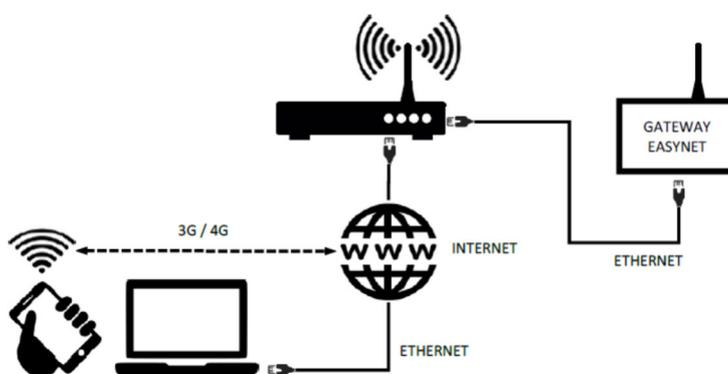
Fig. 31 : Schermata di monitoraggio Ecoforest

I successivi capitoli del presente elaborato si prefiggono l'obiettivo di analizzare le prestazioni dell'impianto reale e le prestazioni simulate di corrispondenti impianti in assetto geotermico e aerotermico. A tale scopo è fondamentale avere a disposizione un database di dati reali di funzionamento e condizioni di lavoro. La pompa di calore ecoGEO in esame è in grado di registrare su portale web messo a disposizione dal costruttore tutti i principali parametri, tramite componente dedicato, EasyNet.

Il sistema registra i dati ad intervalli di 5 minuti grazie alla gestione integrata della sensoristica a bordo macchina ed esterna. Di particolare interesse per la presente analisi:

- Temperatura esterna
- Temperatura circuito captazione
- Temperature di distribuzione
- Potenza di produzione termica
- Potenza di produzione frigorifera
- Potenza elettrica
- Energia termica
- Energia frigorifera
- Energia elettrica
- Energia geotermica
- Energia aerotermica

Il componente EasyNet può essere collegato a rete internet domestica tramite connessione Wi-Fi o cavo Ethernet. Di seguito si riporta schema di connessione:



*Fig. 32 : Schema di connessione alla rete EasyNet*

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Dataset da monitoraggio

Relativamente all'impianto reale multisorgente, come descritto precedentemente, è presente un sistema di monitoraggio che archivia in Cloud i dati di funzionamento dell'impianto ad intervalli di 5 minuti. Per la presente analisi si decide di valutare dati di funzionamento giornaliero per analizzare tre anni completi di funzionamento. Il periodo scelto va dal 01/07/2021 al 15/04/2024, comprendendo dunque tre periodi di funzionamento in climatizzazione estiva e tre periodi di funzionamento in climatizzazione invernale.

I parametri giornalieri vengono elaborati dal software interno come somme e medie sulla base dei dati registrati ogni 5 minuti, ottenendo così un dataset composto da 1020 misurazioni a cui è associato un valore Timestamp, riconvertibile in formato data. I dati sono esportati dalla piattaforma in file ad estensione .csv e successivamente rielaborati con programma Excel. Successivamente si trattano i dati con operazioni di data-cleaning, in particolare:

#### 1) Identificazione e rimozione di dati duplicati o irrilevanti

Per questa fase si verifica la correttezza generale dei dati e la corrispondenza tra i valori di Timestamp e l'intervallo di tempo desiderato, non sono stati riscontrati errori. Si procede eliminando i dati durante la stagione estiva in cui vi è stata esclusiva produzione ACS, l'analisi di questi carichi esula dal puro fabbisogno energetico per la climatizzazione che si vuole studiare nella presente analisi, inoltre richiederebbe uno studio dedicato in termini di efficienze, essendo le condizioni operative molto differenti da quelle di produzione in riscaldamento. Lo stesso dato non è da scorporare nelle altre misurazioni in quanto, come descritto nella sezione 3.3.4 , la produzione ACS avviene normalmente in recupero, dunque non conteggiata nei consumi elettrici che determinano l'efficienza.

## 2) Correzione degli errori di sintassi

Le variabili vengono rinominate secondo lo scopo dell'analisi, è necessario inoltre modificare il formato numerico sostituendo il separatore decimale “.” con il separatore decimale “,” per la successiva rielaborazione.

## 3) Filtraggio di valori anomali indesiderati

Si individuano alcune misurazioni segnalate errate dal sistema, corrispondenti a ore di funzionamento anomalo dell'impianto, ad esempio ad allarmi, o misurazioni assenti dovute alla momentanea disconnessione del sistema alla rete internet domestica. Per individuare le giornate senza alcun funzionamento effettivo, ossia a fabbisogno nullo, e separarle da quelle in cui non vi sono dati per mancanza di connessione, si utilizza la misura di temperatura esterna, sempre rilevata anche a pompa di calore spenta, se correttamente connessa in rete.

## 4) Gestione dei dati mancanti

Per le misurazioni anomale sopra descritte, è necessario procedere all'imputazione manuale adottando diverse strategie a seconda dell'entità e della natura dei dati mancanti. In particolare, si procede effettuando una media tra precedente e successivo nel caso di singolo giorno mancante per le misure di energia, potenza e temperatura. Per le stesse grandezze si opta per l'elaborazione di una regressione lineare, tramite comando REGR.LIN, valutata sui 5 giorni precedenti e successivi in caso più di una misura mancante consecutiva.

Si procede, per tali misurazioni, al ricalcolo di COP o EER, a seconda della stagione, utilizzando l'equazione (2), utilizzando i valori di energia precedentemente stimati.

Si riporta di seguito tabella dei dati ottenuti per ciascuna delle 1020 misurazioni e relativa unità di misura:

<b>Descrizione</b>	<b>Simbolo</b>	<b>u.d.m</b>
Temperatura esterna	$T_{ext}$	°C
Temperatura ritorno captazione	$T_{cap}$	°C
Temperatura ritorno geotermica	$T_{geo}$	°C
Temperatura ritorno aerotermica	$T_{air}$	°C
Temperature di distribuzione	$T_{dis}$	°C
Potenza di produzione termica	$P_{th}$	kW
Potenza di produzione frigorifera	$P_c$	kW
Potenza elettrica	$P_{el}$	kW
Energia termica	$En_{th}$	kWh
Energia frigorifera	$En_c$	kWh
Energia elettrica	$En_{el}$	kWh
Energia geotermica	$En_{geo}$	kWh
Energia aerotermica	$En_{air}$	kWh
Coefficient of Performance	COP	[-]
Energy Efficiency Ratio	EER	[-]

*Tab. 5 : Grandezze reali impianto multisorgente*

Il dato giornaliero di temperatura di mandata non verrà di fatto utilizzato come variabile dell'analisi, in quanto fondamentalmente costante per le due stagioni.

In particolare, la pompa di calore è a servizio di un impianto di distribuzione a pannelli radianti, con mandata a 35°C in assetto invernale e 17°C in assetto estivo.

Terminata la fase di data-cleaning si procede al calcolo di alcune grandezze ausiliarie all'analisi, riportate nella tabella seguente.

Descrizione	Simbolo	u.d.m	Calcolo
Energia termica totale	$En_{th\_tot}$	kWh	Sommatoria energia termica
Energia frigorifera totale	$En_{c\_tot}$	kWh	Sommatoria energia frigorifera
Energia elettrica totale	$En_{el\_tot}$	kWh	Sommatoria energia elettrica
Percentuale energia geotermica	$\%_{geo}$	[-]	Percentuale $En_{geo}$ su $(En_{geo} + En_{air})$
Percentuale energia aerotermica	$\%_{air}$	[-]	Percentuale $En_{air}$ su $(En_{geo} + En_{air})$
COP medio	sCOP	[-]	Media COP
EER medio	sEER	[-]	Media EER

Tab. 6 : Grandezze calcolate impianto multisorgente

Le simulazioni successive si svilupperanno nel medesimo periodo di tempo, a parità di fabbisogni energetici e condizioni di clima esterno, dunque le misure reali valide anche per le successive simulazioni saranno:  $T_{ext}$ ,  $P_{th}$ ,  $P_c$ ,  $En_{th}$ ,  $En_c$

## 4.2 Dataset da schede tecniche

L'analisi si prefigge l'obiettivo del confronto tra i dati di funzionamenti dell'impianto reale, multisorgente con due configurazioni simulate, a parità di condizioni, di seguito denominati Impianto Geotermico e Impianto Aerotermico. Come base per la simulazione dei due scenari alternativi si parte dai dati di funzionamento delle schede tecniche fornite dal costruttore.

Le schede forniscono grafici di andamento differenziati per funzionamento estivo e invernale. Per il funzionamento invernale, a fissata temperatura di mandata è fornito un grafico che mette in correlazione la potenza termica erogata con la percentuale di carico del compressore, a diverse temperature fissate di sorgente. È poi presente un secondo grafico che mostra la relazione tra percentuale di carico e COP, alle medesime temperature di sorgente sopra citate. Per il funzionamento, allo stesso modo, a fissata temperatura di mandata è fornito un grafico che mette in correlazione la potenza frigorifera erogata con la percentuale di carico del compressore, a diverse temperature fissate di sorgente. E' poi presente un secondo grafico che mostra la relazione tra percentuale di carico e EER, alle medesime temperature di sorgente sopra citate.

Di seguito si riportano le schede tecniche contenenti i grafici descritti per la configurazione geotermica, ecoGEO, e la configurazione aerotermica, ecoGEO + AU12.

# ecoGEO+ B/C 1-9

- Controllo modulante della potenza termica in un ampio intervallo di modulazione (12,5-100%) e controllo modulante del flusso dei circuiti primario e secondario (20-100%).
- Tecnologia Inverter e compressore scroll.
- Design compatto che integra le pompe di circolazione, i vasi di espansione (primario 8l e secondario 12l), e le valvole di sicurezza dei circuiti primario e secondario, e la valvola a tre vie per la produzione di acqua calda sanitaria.
- Sistema di recupero ad alta temperatura (HTR) per la produzione di acqua calda sanitaria fino a 70 °C senza backup elettrico e la produzione simultanea di ACS-riscaldamento / raffreddamento.
- Gestione integrata di: fino a 4 diverse temperature di produzione, 2 accumuli inerziali (riscaldamento e raffreddamento), 1 serbatoio ACS, 1 piscina e controllo orario di ricircolo ACS.
- Gestione integrata di unità esterne modulanti, per sistemi di captazione aerotermica o ibridi geotermia-aerotermia.
- Gestione integrata di sistemi di supporto ausiliari esterni On/Off o modulanti, come resistenze elettriche, caldaie On/Off o caldaie modulanti.
- Gestione integrata di cascata fino a 3 pompe di calore in parallelo.
- Gestione integrata di produzione contemporanea caldo/freddo secondo schema.
- Raffreddamento passivo integrato in modelli 2 e 4.
- Raffreddamento attivo tramite inversione di ciclo integrato in modelli 3 e 4.
- Modelli disponibili in versione Monofase e Trifase.
- Gestione integrata dell'ibridazione con il fotovoltaico.
- Contatori di energia integrati: consumo elettrico, produzione termica caldo/freddo e rese istantanee, mensili e annuali.

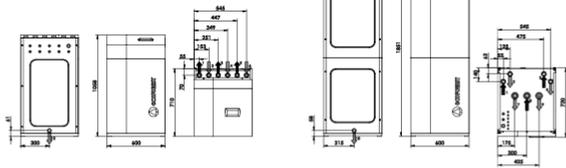
SPECIFICHE ecoGEO+ B/C 1-9		UNITÀ	B1/C1	B2/C2	B3/C3	B4/C4	
APPLICAZIONI	Luogo di installazione	-	Interno				
	Tipo di sistema di captazione <sup>1</sup>	-	Geotermico / Aerotermico / Ibrido				
	ACS, Riscaldamento e Piscina	-	✓	✓	✓	✓	
	Opzione sistema di recupero ad alta temperatura HTR	-	✓	✓	✓ sempre incluso	✓ sempre incluso	
	Raffreddamento attivo integrato	-	-	-	✓	✓	
PRESTAZIONI	Raffreddamento passivo integrato	-	-	✓	-	✓	
	Intervallo di modulazione del compressore	%	12,5 a 100				
	PPotenza di riscaldamento <sup>2</sup> , B0W35	kW	1,3 a 11,0				
	COP <sup>2</sup> , B0W35	-	4,5				
	Potenza di raffreddamento attivo <sup>2</sup> , B35W7	kW	-	1,4 a 11,0			
	EER <sup>2</sup> , B35W7	-	-	5,2			
	Temperatura massima di ACS senza / con supporto <sup>5</sup>	°C	63 / 70				
	Livello di potenza acustica <sup>6</sup>	db	33 a 44				
LIMITI OPERATIVI	Etich. energet. / ηs / SCOP W35 controllo di clima medio	-	A+++ / 190% / 4,84				
	Etich. energet. / ηs / SCOP W55 controllo di clima medio	-	A++ / 138% / 3,54				
	Intervallo di temperature di mandata / setpoint riscald.	°C	10 a 60 / 20 a 60				
	Intervallo di temperature di mandata / setpoint raffredd.	°C	5 a 35 / 7 a 25				
	Intervallo di temperature di primario in riscaldamento	°C	-25 a 35				
	Intervallo di temperature di primario in raffreddamento	°C	10 a 60				
	Pressione del circuito frigorifico minima / massima	bar	2 / 45				
	Intervallo di pressione del circuito secondario / precarico	bar	0,5 a 3,0 / 1,5				
FLUIDI DI LAVORO	Intervallo di pressione del circuito primario / precarico	bar	0,5 a 3,0 / 0,7				
	Pressione massima del serbatoio ACS (ecoGEO+ C)	l / bar	165 / 8				
	Carico di refrigerante R410A senza / con HTR	kg	0,8 / 0,85		1,0		
DATI ELETTRICI CONTROLLO	Tipo / Carico di olio del compressore	kg	POE / 0,74				
	1/N/PE 230 V / 50-60 Hz <sup>8</sup>	-	✓				
	Protezione esterna massima consigliata <sup>9</sup>	-	C16A				
	Fusibile del circuito primario del trasformatore	A	0,5				
DATI ELETTRICI POMPA DI CALORE MONOFASE	Fusibile del circuito secondario del trasformatore	A	2,5				
	1/N/PE 230 V / 50-60 Hz <sup>8</sup>	-	✓				
	Protezione esterna massima consigliata <sup>9</sup>	-	C25A				
	Consumo massimo <sup>2</sup> , B0W35	kW / A	2,7 / 11,8				
	Consumo massimo <sup>2</sup> , B0W55	kW / A	3,8 / 16,5				
	Intensità di avviamento minima / massima <sup>7</sup>	A	2,8 / 5,8				
DATI ELETTRICI POMPA DI CALORE TRIFASE	Correzione del cos φ	-	0,96 / 1				
	3/N/PE 400 V / 50-60Hz <sup>8</sup>	-	✓				
	Protezione esterna massima consigliata <sup>9</sup>	-	C10A				
	Consumo massimo <sup>2</sup> , B0W35	kW / A	2,7 / 4,0				
	Consumo massimo <sup>2</sup> , B0W55	kW / A	3,8 / 5,5				
	Intensità di avviamento minima / massima <sup>7</sup>	A	0,9 / 1,9				
DIMENSIONI E PESO	Correzione del cos φ	-	0,96 / 1				
	Altezza x larghezza x profondità	mm	ecoGEO+ B: 1058x600x710 · ecoGEO+ C: 1851x600x720				
	Peso a vuoto (senza imballaggio)	kg	B 184 · C 245	B 192 · C 253	B 184 · C 245	B 192 · C 253	

1. Sorgente aerotermica sostituendo/combinando la geotermia per/con una unità aerotermica ecoGEO+ AU. Per ulteriori informazioni, consultare il manuale delle unità aerotermiche ecoGEO+ AU.
2. In conformità con EN 14511, consumi delle pompe di circolazione e del driver del compressore inclusi.
3. Prendendo in considerazione delle portate nei circuiti di captazione e di produzione in conformità con EN 14511.
4. Riscaldamento da 20 °C a 50 °C in assenza di consumo.
5. Prendendo in considerazione un backup elettrico o il sistema HTR. La temperatura massima dell'acqua calda sanitaria con HTR può essere limitata secondo la temperatura di scarico del compressore.
6. In conformità con EN 12102.
7. L'intensità di avviamento dipende delle condizioni di lavoro dei circuiti idraulici.
8. Intervallo di tensione consentito per il corretto funzionamento della pompa di calore: ± 10%.
9. Il consumo massimo può variare considerevolmente secondo le condizioni di lavoro o se la potenza del compressore è limitata.
10. Certificazione in corso.

**Dimensioni e connessioni idrauliche**

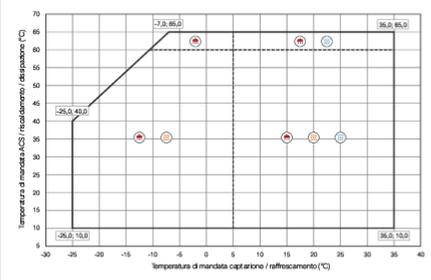
ecoGEO+ B

ecoGEO+ C

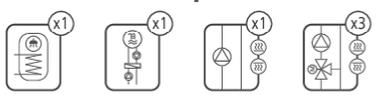


- 1. Mandata Risc./Raffr. - 1 1/4" M
- 2. Ritorno Risc./Raffr. - 1 1/4" M
- 3. Mandata Captazione - 1 1/4" M
- 4. Ritorno Captazione - 1 1/4" M
- 5. Mandata scambiatore ACS - 1 1/4" M
- 6. Ritorno scambiatore ACS - 1 1/4" M
- 7. Ingresso AFS - 1" H
- 8. Mandata ACS - 1" H
- 9. Ritorno ricircolo ACS - 3/4" H
- 10. Bocca di scarico - 16 mm

**Mappa di lavoro**

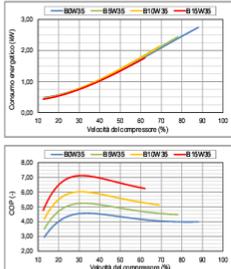
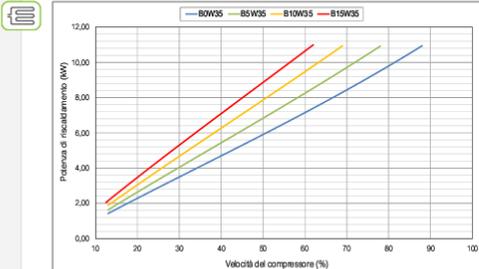


**Gestione dell'impianto**



**Curve di funzionamento**

Prestazioni termiche



Prestazioni idrauliche

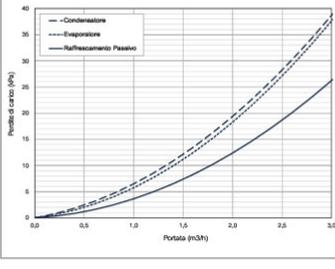
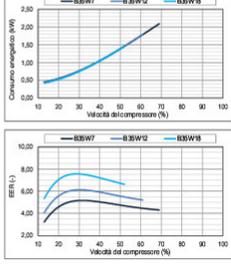
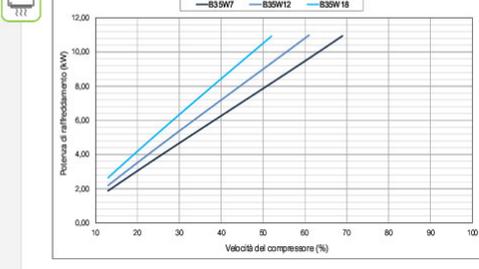
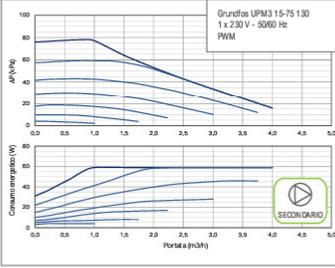
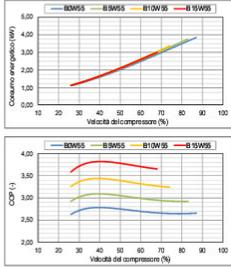
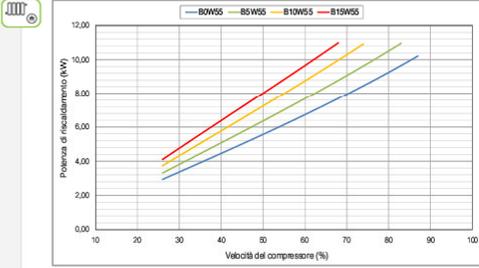
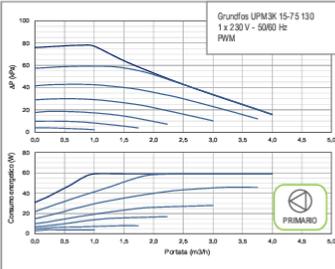


Fig. 33 : Scheda tecnica ecoGEO

# ecoGEO+ B/C 1-9 & AU12

- Controllo modulante della potenza termica in un ampio intervallo di modulazione (12,5-100%) e controllo modulante del flusso dei circuiti primario e secondario (20-100%).
- Tecnologia Inverter e compressore scroll.
- Design compatto che integra le pompe di circolazione, i vasi di espansione (primario 8l e secondario 12l), e le valvole di sicurezza dei circuiti primario e secondario, e la valvola a tre vie per la produzione di acqua calda sanitaria.
- Sistema di recupero ad alta temperatura (HTR) per la produzione di acqua calda sanitaria fino a 70 °C senza backup elettrico e la produzione simultanea di ACS-riscaldamento / raffreddamento.
- Gestione integrata di: fino a 3 diverse temperature di produzione, 2 accumuli inerziali (riscaldamento e raffreddamento), 1 serbatoio ACS, 1 piscina e controllo orario di ricircolo ACS.
- Gestione integrata di unità esterne modulanti, per sistemi di captazione aerotermica o ibridi geotermia-aerotermia.
- Gestione integrata di sistemi di supporto ausiliari esterni On/Off o modulanti, come resistenze elettriche, caldaie On/Off o caldaie modulanti.
- Gestione integrata di cascata fino a 3 pompe di calore in parallelo.
- Gestione esclusiva dello sbrinamento.
- Raffreddamento attivo tramite inversione di ciclo integrato in modelli 4.
- Modelli disponibili in versione Monofase e Trifase.
- Gestione integrata dell'ibridazione con il fotovoltaico.
- Contatori di energia integrati: consumo elettrico, produzione termica caldo/freddo e rese istantanee, mensili e annuali.

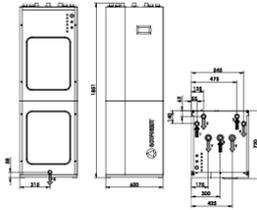
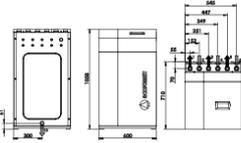
SPECIFICHE ecoGEO+ B/C 1-9 & AU12		UNITÀ	B2/C2	B4/C4
APPLICAZIONI	Luogo di installazione	-	Interno: ecoGEO+ · Esterno: AU12	
	Tipo di sistema di captazione <sup>1</sup>	-	Aerotermico / Ibrido	
	ACS, Riscaldamento e Piscina	-	✓	✓
	Opzione sistema di recupero ad alta temperatura HTR	-	✓	✓ <small>da serie</small>
	Raffreddamento attivo integrato	-	-	✓
PRESTAZIONI	Sistema di sbrinamento ecoGEO+ integrato	-	✓	✓
	Intervallo di modulazione del compressore	%	12,5 a 100	
	Potenza di riscaldamento <sup>2</sup> , A7W35	kW	1,7 a 11,0	
	COP <sup>2</sup> , A7W35	-	5,0	
	Potenza di raffreddamento attivo <sup>2</sup> , A35W7	kW	-	1,5 a 9,8
	EER <sup>2</sup> , A35W7	-	-	3,6
	Temperatura massima di ACS senza / con supporto <sup>5</sup>	°C	63 / 70	
	Livello di potenza acustica <sup>6</sup>	db	33 a 44	
	Etich. energet. / η <sub>s</sub> / SCOP W35 controllo di clima medio	-	A+++ / 192% / 4,91	
	Etich. energet. / η <sub>s</sub> / SCOP W55 controllo di clima medio	-	A++ / 143% / 3,68	
LIMITI OPERATIVI	Intervallo di temperature di mandata / setpoint riscald.	°C	10 a 60 / 20 a 60	
	Intervallo di temperature di mandata / setpoint raffredd.	°C	5 a 35 / 7 a 25	
	Intervallo di temperature di primario in riscaldamento	°C	-25 a 35	
	Intervallo di temperature di primario in raffreddamento	°C	10 a 60	
	Pressione del circuito frigorifero minima / massima	bar	2 / 45	
	Intervallo di pressione del circuito secondario / precarico	bar	0,5 a 3,0 / 1,5	
	Intervallo di pressione del circuito primario / precarico	bar	0,5 a 3,0 / 0,7	
	Pressione massima del serbatoio ACS (ecoGEO+ C)	l / bar	165 / 8	
FLUIDI DI LAVORO	Carico di refrigerante R410A senza / con HTR	kg	0,8 / 0,85	
	Tipo / Carico di olio del compressore	kg	POE / 0,74	
DATI ELETTRICI CONTROLLO	1/N/PE 230 V / 50-60 Hz <sup>8</sup>	-	✓	
	Protezione esterna massima consigliata <sup>9</sup>	-	C16A	
	Fusibile del circuito primario del trasformatore	A	0,5	
DATI ELETTRICI POMPA DI CALORE MONOFASE	Fusibile del circuito secondario del trasformatore	A	2,5	
	1/N/PE 230 V / 50-60 Hz <sup>8</sup>	-	✓	
	Protezione esterna massima consigliata <sup>9</sup>	-	C25A	
	Consumo massimo <sup>2</sup> , A7W35	kW / A	2,7 / 11,8	
	Consumo massimo <sup>2</sup> , A7W55	kW / A	3,8 / 16,5	
DATI ELETTRICI POMPA DI CALORE TRIFASE	Intensità di avviamento minima / massima <sup>7</sup>	A	2,8 / 5,8	
	Correzione del cos Ø	-	0,96 / 1	
	3/N/PE 400 V / 50-60Hz <sup>8</sup>	-	✓	
	Protezione esterna massima consigliata <sup>9</sup>	-	C10A	
	Consumo massimo <sup>2</sup> , A7W35	kW / A	2,7 / 4,0	
DIMENSIONI E PESO	Consumo massimo <sup>2</sup> , A7W55	kW / A	3,8 / 5,5	
	Intensità di avviamento minima / massima <sup>7</sup>	A	0,9 / 1,9	
	Correzione del cos Ø	-	0,96 / 1	
	Altezza x larghezza x profondità	mm	ecoGEO+ B: 1058x600x710 · ecoGEO+ C: 1851x600x720 / AU12: 900x1000x600	
Peso a vuoto (senza imballaggio)	kg	ecoGEO+ B: 192 · ecoGEO+ C: 253 / AU12: 92		

1. Sorgente aerotermica sostituendo/combinando la geotermia per/con una unità aerotermica ecoGEO+ AU. Per ulteriori informazioni, consultare il manuale delle unità aerotermiche ecoGEO+ AU.
2. In conformità con EN 14511, consumi delle pompe di circolazione e del driver del compressore inclusi.
3. Prendendo in considerazione delle portate nei circuiti di captazione e di produzione in conformità con EN 14511.
4. Riscaldamento da 20 °C a 50 °C in assenza di consumo.
5. Prendendo in considerazione un backup elettrico o il sistema HTR. La temperatura massima dell'acqua calda sanitaria con HTR può essere limitata secondo la temperatura di scarico del compressore.
6. In conformità con EN 12102.
7. L'intensità di avviamento dipende dalle condizioni di lavoro dei circuiti idraulici.
8. Intervallo di tensione consentito per il corretto funzionamento della pompa di calore: ± 10%.
9. Il consumo massimo può variare considerevolmente secondo le condizioni di lavoro o se la potenza del compressore è limitata.
10. Certificazione in corso.

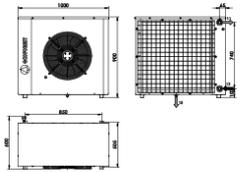
### Dimensioni e connessioni idrauliche

Unità interna - ecoGEO+ B

Unità interna - ecoGEO+ C

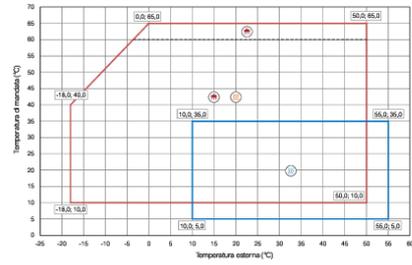


Unità esterna - AU6

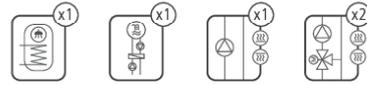


1. Mandata Risc./Raffr. - 1 1/4" M
2. Ritorno Risc./Raffr. - 1 1/4" M
3. Mandata Captazione - 1 1/4" M
4. Ritorno Captazione - 1 1/4" M
5. Mandata scambiatore ACS - 1 1/4" M
6. Ritorno scambiatore ACS - 1 1/4" M
7. Ingresso AFS - 1" H
8. Mandata ACS - 1" H
9. Ritorno ricircolo ACS - 3/4" H
10. Bocca di scarico - 16 mm
11. Mandata Captazione - 1 1/2" M
12. Ritorno Captazione - 1 1/2" M
13. Bocca di scarico - 15 mm

### Mapa di lavoro

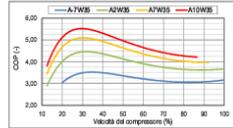
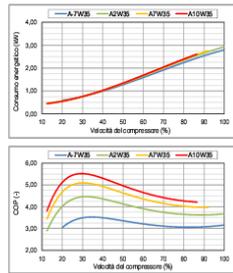
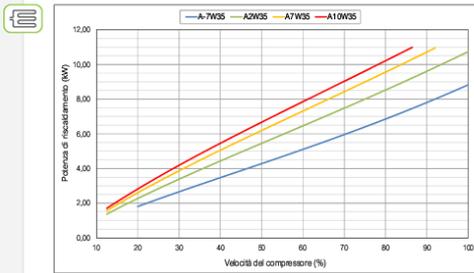


### Gestione dell'impianto



### Curve di funzionamento

Prestazioni termiche



Prestazioni idrauliche

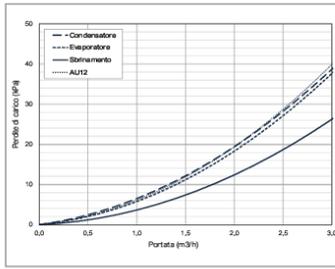
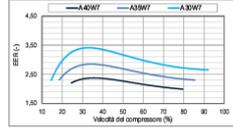
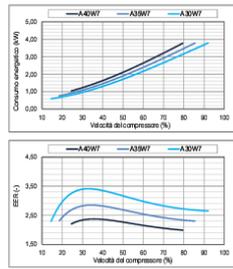
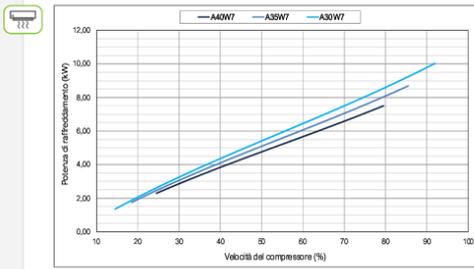
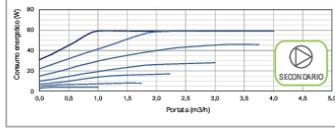
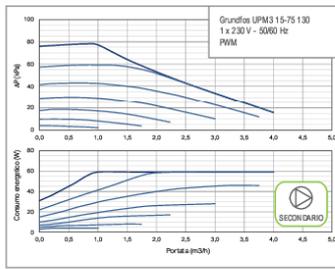
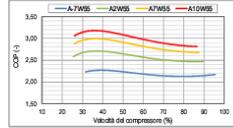
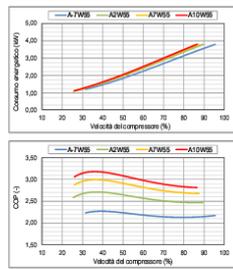
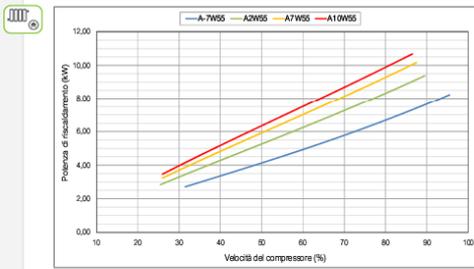
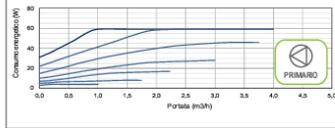
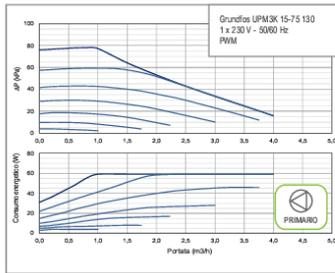


Fig. 34 : Scheda tecnica ecoGEO + AU12

Dunque l'efficienza è determinata dalla temperatura di sorgente e dalla percentuale di carico del compressore, quest'ultima è a sua volta determinata dalla potenza termica richiesta e dalla temperatura di sorgente.

Si procede mappando i punti delle curve date utilizzando il software Graphic Reader, che permette di ottenere in output un dataset ad intervalli impostati, in questo caso si sceglie una definizione di 0,25% sul valore della percentuale di carico.

Di seguito si riportano schermate del software utilizzato e stralcio dei dataset ottenuti.

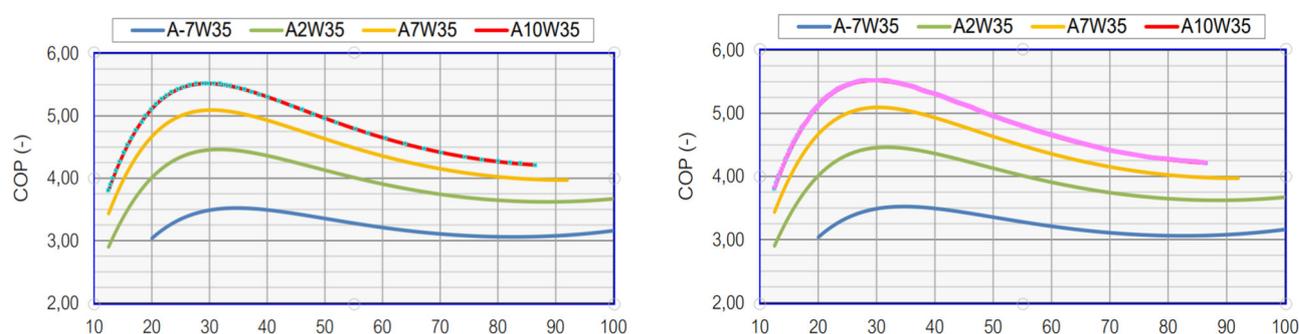


Fig. 35 : Individuazione dei punti su Graphic Reader

%	PA10W35	%	PA7W35	%	PA2W35	%	PA-7W35
21,5	3,055	21,5	2,791	21,5	2,457	21,5	1,969
21,75	3,086	21,75	2,823	21,75	2,486	21,75	1,995
22	3,115	22	2,855	22	2,514	22	2,021
22,25	3,145	22,25	2,888	22,25	2,543	22,25	2,045
22,5	3,175	22,5	2,92	22,5	2,572	22,5	2,068
22,75	3,206	22,75	2,952	22,75	2,601	22,75	2,09
23	3,238	23	2,984	23	2,631	23	2,111
23,25	3,272	23,25	3,015	23,25	2,66	23,25	2,131
23,5	3,308	23,5	3,046	23,5	2,69	23,5	2,15
23,75	3,344	23,75	3,077	23,75	2,72	23,75	2,169
24	3,382	24	3,108	24	2,751	24	2,188
24,25	3,42	24,25	3,139	24,25	2,781	24,25	2,206
24,5	3,459	24,5	3,171	24,5	2,811	24,5	2,224
24,75	3,498	24,75	3,202	24,75	2,841	24,75	2,242
25	3,536	25	3,234	25	2,87	25	2,26
25,25	3,573	25,25	3,266	25,25	2,899	25,25	2,279
25,5	3,61	25,5	3,298	25,5	2,928	25,5	2,297
25,75	3,645	25,75	3,332	25,75	2,957	25,75	2,315
26	3,678	26	3,366	26	2,984	26	2,334
26,25	3,71	26,25	3,401	26,25	3,011	26,25	2,353
26,5	3,741	26,5	3,436	26,5	3,038	26,5	2,373

%	COPA10W	%	COPA7W35	%	COPA2W35	%	COPA-7W35
20,5	5,159	20,5	4,688	20,5	4,042	20,5	3,079
20,75	5,185	20,75	4,709	20,75	4,065	20,75	3,099
21	5,21	21	4,73	21	4,087	21	3,118
21,25	5,234	21,25	4,751	21,25	4,109	21,25	3,137
21,5	5,256	21,5	4,772	21,5	4,13	21,5	3,156
21,75	5,275	21,75	4,792	21,75	4,151	21,75	3,174
22	5,292	22	4,812	22	4,171	22	3,192
22,25	5,307	22,25	4,831	22,25	4,191	22,25	3,21
22,5	5,32	22,5	4,849	22,5	4,209	22,5	3,227
22,75	5,332	22,75	4,866	22,75	4,227	22,75	3,243
23	5,343	23	4,883	23	4,244	23	3,257
23,25	5,352	23,25	4,899	23,25	4,26	23,25	3,271
23,5	5,362	23,5	4,913	23,5	4,274	23,5	3,284
23,75	5,371	23,75	4,927	23,75	4,288	23,75	3,296
24	5,38	24	4,941	24	4,301	24	3,307
24,25	5,389	24,25	4,953	24,25	4,313	24,25	3,318
24,5	5,398	24,5	4,965	24,5	4,325	24,5	3,327
24,75	5,407	24,75	4,975	24,75	4,335	24,75	3,337
25	5,415	25	4,985	25	4,345	25	3,346
25,25	5,423	25,25	4,995	25,25	4,354	25,25	3,355
25,5	5,431	25,5	5,003	25,5	4,362	25,5	3,364
25,75	5,439	25,75	5,011	25,75	4,37	25,75	3,373
26	5,446	26	5,018	26	4,377	26	3,382

Fig. 36 : Schermate parziali dataset da Graphic Reader

Si ipotizza, con buona approssimazione, che a fissato valore della percentuale di carico, la potenza termica e l'efficienza abbiano comportamento lineare con la temperatura.

Si valuta quindi, con comando REGR.LIN, la coppia di coefficiente angolare e valore noto della relazione lineare per ogni valore di carico percentuale, utilizzando in input i valori alle temperature di captazione note dai grafici. La stessa procedura è applicata per le due configurazioni, geotermica e aerotermica, per entrambi gli assetti, estivo e invernale.

Ne risulta un dataset che permette, imputando le condizioni reali di fabbisogno e temperatura di sorgente, di ottenere l'efficienza teorica prevista. È necessario procedere per step:

- 1) A fissata potenza termica richiesta corrisponde una relazione lineare che varia con la temperatura di sorgente, fornendo in output la percentuale di carico.
- 2) Al carico così ottenuto corrisponde una seconda relazione lineare che varia con la temperatura di sorgente, fornendo in output l'efficienza teorica, da scheda tecnica.

La discretizzazione scelta nella fase di mappatura dei dati dai grafici impone un'approssimazione dei valori di input, in particolare si utilizza il comando CERCA.VERT per associare al valore reale il valore più prossimo tra quelli mappati. Questa procedura, se da un lato determina un'approssimazione sui risultati, dall'alto permette di utilizzare in input nelle simulazioni solo valori previsti da scheda tecnica, determinando così un limite ad esempio alle potenze minime e massime ottenibili a determinate temperature di sorgente.

### 4.3 Simulazione impianto aerotermico

Per l'assetto aerotermico gli input delle relazioni da dataset per ottenere il valore di efficienza giornaliera saranno: Potenza termica, frigorifera e Temperatura esterna. Entrambe le grandezze sono disponibili come valori reali da monitoraggio:  $T_{ext}$ ,  $P_{th}$ ,  $P_c$

È quindi possibile utilizzare i parametri reali per ottenere i dati di efficienza da scheda tecnica. Come già descritto nelle sezioni precedenti, è fondamentale in assetto invernale per gli impianti in pompa di calore con scambio ad aria, tener conto degli sbrinamenti. Questi non vengono simulati nella realizzazione dei test della casa costruttrice per la valutazione dei parametri da scheda. Risulta dunque fondamentale per il COP da scheda, indicato nella successiva

trattazione con  $COP_{th}$  , individuare un coefficiente correttivo che tenga conto di questo importante aspetto in una simulazione di funzionamento reale.

A causa di alcune problematiche tecniche, una volta avviato, l'impianto reale ha potuto sfruttare il solo scambio con drycooler per la prima stagione invernale. Il periodo considerato è compreso tra il 13/10/2020 e il 15/04/2021. I relativi dati di funzionamento sono stati regolarmente registrati su piattaforma.

Si procede quindi ad un confronto tra il COP effettivo registrato e il  $COP_{th}$  che si ottiene dal dataset secondo procedura sopra descritta, nel periodo in questione.

Di seguito si riporta la prima porzione della tabella dei dati ottenuti:

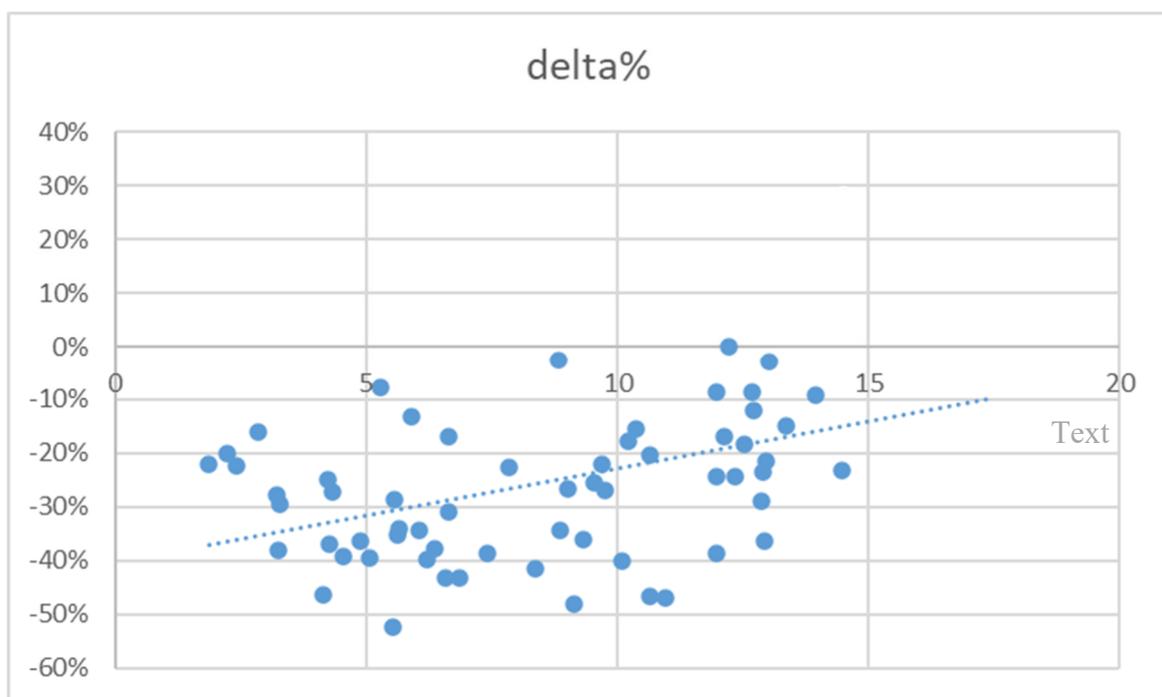
DATA	COP	COP <sub>th</sub>	delta	delta%
13/10/2020	5,24	5,524519	-0,28452	-8%
14/10/2020	4,52	4,659795	-0,1398	-5%
17/10/2020	4,63	5,686276	-1,05628	-30%
18/10/2020	4,67	5,70784	-1,03784	-29%
19/10/2020	4,58	5,707042	-1,12704	-32%
20/10/2020	4,39	5,782328	-1,39233	-39%
21/10/2020	4,9	5,801075	-0,90107	-25%
27/10/2020	5,04	5,89041	-0,85041	-23%
28/10/2020	4,47	4,470208	-0,00021	0%
31/10/2020	4,93	5,69577	-0,76577	-22%
01/11/2020	4,87	5,165702	-0,2957	-9%
02/11/2020	4,71	4,353843	0,356157	13%
03/11/2020	5,29	4,525357	0,764643	27%
06/11/2020	5,08	5,171989	-0,09199	-3%
07/11/2020	4,11	4,441927	-0,33193	-12%
09/11/2020	5,1	5,392074	-0,29207	-9%
11/11/2020	4,74	5,592604	-0,8526	-24%
12/11/2020	4,93	5,782513	-0,85251	-24%
13/11/2020	5,09	4,949737	0,140263	5%
15/11/2020	5,26	5,797504	-0,5375	-15%
16/11/2020	5,28	5,577885	-0,29788	-9%
17/11/2020	4,98	5,563355	-0,58335	-17%
18/11/2020	4,71	5,393605	-0,68361	-20%
19/11/2020	4,2	5,210416	-1,01042	-31%

Tab. 7 : Risultati di COP e  $COP_{th}$  per aerotermo

Si calcola il delta assoluto tra le due efficienze, e il delta percentuale sul  $COP_{th}$  , si ottiene sul periodo di riferimento un delta percentuale medio del -31% .

Il numero e la durata giornaliera dei cicli di sbrinamento, con conseguente penalizzazione del COP, dipendono principalmente dalla potenza termica richiesta, dalla temperatura esterna e dall'umidità relativa dell'aria esterna. Quest'ultimo dato non è disponibile con cadenza giornaliera per il periodo di simulazione, dunque procedendo per approssimazione si cerca una relazione lineare tra il fattore correttivo percentuale e la temperatura esterna, procedendo con una regressione lineare sui dati del periodo di funzionamento in assetto aerotermico.

Si riporta di seguito grafico a dispersione del fattore correttivo in funzione della temperatura e relativa regressione lineare.



*Fig. 37 : Grafico fattori correttivi e temperatura esterna*

Tale relazione viene quindi utilizzata nella simulazione aerotermica, nei periodi di funzionamento invernale, per calcolare il fattore correttivo da applicare al  $COP_{th}$  per ottenere il COP effettivo.

## 4.4 Simulazione impianto geotermico

Per l'assetto geotermico gli input delle relazioni da dataset per ottenere il valore di efficienza giornaliera saranno: Potenza termica, frigorifera e Temperatura della miscela acqua e glicole in ingresso alla pompa di calore. Le potenze sono disponibili come valori reali da monitoraggio:  $P_{th}, P_c$

I valori di temperatura della miscela acqua e glicole in ingresso alla pompa di calore non sono invece disponibili da monitoraggio, infatti la temperatura di captazione  $T_{geo}$  è influenzata dalla presenza dell'unità ad aria e non è utilizzabile per la comparazione. Risulta quindi necessario calcolare tale temperatura partendo dalle potenze richieste e dalle informazioni note sul terreno del sito. Si deve calcolare una temperatura media per ogni giornata del periodo di simulazione, tenendo conto delle caratteristiche specifiche del sito e dei carichi giornalieri che dovranno essere smaltiti nel terreno. Per il calcolo di questa temperatura si utilizza il metodo delle g-functions.

### 4.4.1 G-functions

Il metodo di calcolo si basa su dei fattori di risposta di temperatura adimensionali, chiamati g-functions. I fattori di risposta sono calcolati con un procedimento in due passaggi. Il primo passaggio è la determinazione della risposta alla parete esterna della perforazione di una singola sonda di lunghezza e diametro finiti ad un unico impulso di temperatura. La risposta di temperatura viene ottenuta mediante una simulazione bidimensionale (radiale, assiale) alle differenze finite, con condizioni iniziali ed al contorno costanti. Il secondo passaggio è la sovrapposizione degli effetti spaziale, mediante la quale si ottiene la risposta di temperatura di un campo di sonde caratterizzate da un certo rapporto tra spaziatura orizzontale e lunghezza. La g-function è la curva che si ottiene adimensionalizzando la risposta di temperatura della parete esterna delle perforazioni rispetto al tempo.

Le g-function per una sonda singola possono essere determinate utilizzando uno schema 2D assialsimmetrico che tiene conto dello scambio termico con la superficie del terreno. La sonda può essere schematizzata come:

- Sorgente termica cilindrica di lunghezza finita (Finite Cylindrical Source, FCS)
- Sorgente termica lineare di lunghezza finita (Finite Line Source, FLS)

Le g-function per singole sonde di profondità H e interrimento Bd fissati sono disponibili a libreria di software di calcolo. Successivamente è possibile determinare la g-field, ossia la g-function del campo sonde complessivo utilizzando il principio della sovrapposizione degli effetti, dunque come combinazione lineare delle g-function delle singole sonde.

Nel caso specifico si calcola la g-field per un campo sonde composto da tre sonde in linea di profondità H = 90 mt , interasse della sonda r = 0,091 m, distanza reciproca tra le sonde d<sub>1</sub> = 8 mt, d<sub>2</sub> = 16 mt. A queste corrispondono le grandezze adimensionali secondo le seguenti equazioni:

$$r^* = r / H = 10,1 \times 10^{-4} \text{ mt} \quad (10)$$

$$d_1^* = r / H = 0,088 \text{ mt} \quad (11)$$

$$d_2^* = r / H = 0,177 \text{ mt} \quad (12)$$

Si ottengono rispettivamente le funzioni  $g_{10,1 \times 10^{-4}}$ ,  $g_{0,09}$  e  $g_{0,18}$

Si calcola quindi la g-function per la sonda centrale e di ciascuna sonda laterale:

$$g_C = g_{10,1 \times 10^{-4}} + 2g_{0,09} \quad (13)$$

$$g_L = g_{10,1 \times 10^{-4}} + g_{0,09} + g_{0,18} \quad (14)$$

Infine si ottiene la g-field:

$$g_{\text{field}} = g_{10,1 \times 10^{-4}} + 4/3 g_{0,09} + 2/3 g_{0,18} \quad (15)$$

Si riporta di seguito grafico in scala logaritmica della funzione così ottenuta.

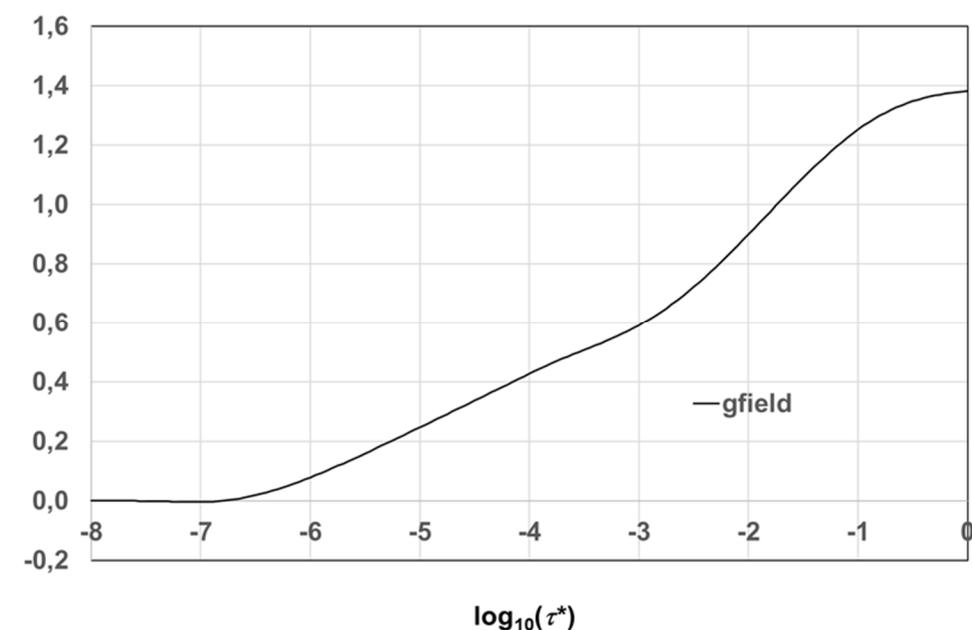


Fig. 38 : Grafico g-field

Il passaggio successivo prevede l'adimensionalizzazione dei carichi termici richiesti dall'edificio, rispetto ad un carico di riferimento, generalmente il carico di picco. Nel caso specifico il carico di riferimento  $Q_0 = 12000 \text{ W}$ , a cui corrisponde un carico di riferimento per metro di sonda installata  $q_{l0} = 44,4 \text{ W/mt}$ , sulla potenza nominale dell'impianto.

$$A_i = Q_i / Q_0 \quad (16)$$

Nella simulazione in esame i dati sono giornalieri per un totale di 1020 misurazioni, dunque il parametro "i" varia da 1 a 1020.

I fabbisogni devono quindi essere convertiti da lato edificio a lato terreno, introducendo le efficienze COP e EER.

Tali parametri sono però, come detto, dipendenti dalla temperatura in ingresso alla pompa di calore, risultato ultimo del calcolo in esame, dunque si sceglie di inizializzarli per il primo step di calcolo ai valori di targa, successivamente di calcolarli per ogni step secondo le logiche descritte nella sezione precedente, utilizzando in input il valore di temperatura calcolato allo step precedente.

Dunque risulterà:

$$\text{COP}_i = f(T_{in\ i-1}) \quad (17)$$

$$\text{EER}_i = f(T_{in\ i-1}) \quad (18)$$

Allora è possibile calcolare il carico termico giornaliero da smaltire sul terreno allo step  $i$ -esimo:

$$A_{g_i} = A_i (1 - 1/\text{COP}_i) \quad (19)$$

Ad ogni step è inoltre necessario incrementare la variabile temporale adimensionale  $\tau^*$ , nel caso in esame equivalente ad un giorno (86400 s), calcolata come segue:

$$\tau_1^* = \frac{\alpha_g}{H^2} \tau_1 \quad (20)$$

A questo punto è possibile calcolare la temperatura media adimensionalizzata.

$$\bar{T}_{field}^*(\tau^*) = \sum_{i=0}^{n-1} A_{g_i} \left[ g_{field}(\tau^* - i\tau_1^*) - g_{field}(\tau^* - (i+1)\tau_1^*) \right] \quad (21)$$

Successivamente si calcola la temperatura dimensionale del terreno:

$$T = q_{l0} \frac{T^*}{k_g} + T_g \quad (22)$$

Quindi la temperatura media del fluido interno la sonda ed infine la temperatura di ingresso alla pompa di calore, utilizzando il dato di portata corrispondente alla potenza  $i$ -esima richiesta:

(23)

$$T_{in} = T_{ave} - \frac{\dot{Q}}{2\dot{m}c_p} \quad (24)$$

#### 4.4.2 Codice di calcolo

Per la gestione del calcolo su base giornaliera è stato implementato uno script in formato .py in grado di prelevare i parametri di input, le funzioni g e i carichi giornalieri da file .xls e fornire i risultati su file .xls

Sono utilizzati le seguenti librerie:

- Pandas, per la gestione in input e output dei dati in maniera comoda ed efficiente
- Numpy, per compiere le operazioni vettoriali in maniera molto efficiente, in quanto implementata in C.

Per alcune funzioni, che sono richiamate spesso, ossia “calculate\_line\_value” e “calculate\_T\_and\_T\_in”, “g\_field\_func” si utilizza il decorator @lru\_cache, per permettere di posizionare in cache il risultato ed avere un significativo miglioramento in termini di velocità di calcolo dei risultati. Si riporta di seguito tabella dei parametri di input utilizzati per la simulazione.

<b>l</b>	<b><math>\alpha_g</math></b>	<b>Bd</b>	<b>ql</b>	<b>Kg</b>	<b>Tg</b>	<b>cp</b>	<b>Rb eff</b>	<b><math>\tau_1</math></b>	<b><math>\tau^*1</math></b>
270	0,00001	0,8	44,44444	1,98	14,95	4010,86	0,15	86400	1,18519E-05

*Tab. 8 : Parametri input script*

Si utilizzano i parametri geotermici e tecnici descritti nella sezione 3.4.2 , i parametri del terreno riportati nella sezione 3.4.3 , i restanti dati come descritti nella presente sezione. A questi si aggiungono fogli .xls contenenti la g-field e i dati di fabbisogno energetico da monitoraggio. Lo script ricalca il metodo delle g-function descritto nella sezione precedente per il calcolo della Tin giornaliero. Si riporta nelle pagine successive il corpo dello script realizzato.

```

from functools import lru_cache
from pyrsistent import l

import numpy as np
import pandas as pd
from tqdm import tqdm

@lru_cache(maxsize=None)
def calculate_line_value(T_in, m, q, ltot):
    """
    It returns the value computed using the formula  $y = m * T_{in} + q$ .
    """
    return m * T_in + q

def calculate_Ag_Q_q(A, T_in, coefficients, ltot):
    """
    It computes Ag, Q and q considering the specified coefficients.

    Parameters
    -----
    A : float
        The A value to consider for the computation.
    T_in :
        The current input.  coefficients : dict
        The dictionary that contains all the needed parameters (cop, eer, peff).

    Returns
    -----
    tuple It returns Ag, Q, q, cop and eer. Where cop is None when not needed ( $A \geq 0$ ),
        and eer is None when not needed ( $A < 0$ ).
    """
    cop_m, cop_q = coefficients["cop_m"], coefficients["cop_q"]
    eer_m, eer_q = coefficients["eer_m"], coefficients["eer_q"]
    peff = coefficients["peff"]
    if A < 0:
        cop = calculate_line_value(T_in, cop_m, cop_q, ltot)
        Ag = A * (1 - 1 / cop)
        Q = (peff) * (1 - 1 / cop)
        q = Q / ltot
        eer = None
    else:
        eer = calculate_line_value(T_in, eer_m, eer_q, ltot)
        Ag = A * (1 + 1 / eer)
        Q = (peff) * (1 + 1 / eer)
        q = Q / ltot
        cop = None

    return Ag, Q, q, cop, eer

def g_field_interpolation(df, sort_by="log10(t*)"):
    """It returns the g_field function that works on df data."""
    sorted_values = df.sort_values(by=sort_by)
    @lru_cache(maxsize=None)

```

```

def g_field_func(lookup_value):
    """It simulates the g_field function."""
    # Return the exact match if present
    if lookup_value <= 0:
        return 0
    else:
        lookup_value = np.log10(lookup_value)

        # If exact match found returns the result
        exact_match = sorted_values[sorted_values[sort_by] == lookup_value]["gfield"]
        if len(exact_match) > 0:
            return exact_match.item()

        # Find the index of the exact match or closest value
        idx = sorted_values[sort_by].searchsorted(lookup_value)

        # Index correction for the last element
        if idx == len(sorted_values):
            idx -= 1

        return sorted_values.iloc[idx]["gfield"].item()

return g_field_func

# Calculate T*_field
def calculate_T_field_star(n, t_star, Ag, g_field, t1_star):
    """It computes t_field_star for all the values from 0 to n."""
    result = 0
    for i in range(n):
        result += Ag[i] * (g_field(t_star - i*t1_star) - g_field(t_star - (i+1)*t1_star))
    return result

# Calculate T and T_in
@lru_cache(maxsize=None)
def calculate_T_and_T_in(T_field_star, q, kg, Tg, Q, m, cp, rb, ql0):
    T = (ql0 * (T_field_star / kg)) + Tg
    if m == 0:
        T_in = T
    else:
        T_in = (q * rb) + T + (Q / (2 * m * cp))

    return T, T_in

def get_results_data(file_path):
    # Load dataframes
    data = pd.read_excel(file_path, sheet_name=["DATI REALI", "DATI INPUT", "Field"])
    real_data = data["DATI REALI"]
    input_data = data["DATI INPUT"]
    field_data = data["Field"]

    # Extract vectors
    A = real_data["A_finale"]
    g_field = g_field_interpolation(field_data[["log10(t*)", "gfield"]],
    sort_by="log10(t*)")

```

```

m = real_data["mH2O (l/s)"]
peff = real_data["P_eff"]*1000

# Extract parameters
Kg = input_data["Kg"].item()
Tg = input_data["Tg"].item()
cp = input_data["cp"].item()
rb = input_data["Rb_eff"].item()
ql0 = input_data["ql"].item()
ltot = input_data["l"].item()
cop_m, cop_q = input_data["COP_m"].item(), input_data["COP_q"].item()
eer_m, eer_q = input_data["EER_m"].item(), input_data["EER_q"].item()
cop_0, eer_0 = input_data["COP_0"].item(), input_data["EER_0"].item()
t1_star = input_data["t*1"].item()

results = []
T_in_prev = None
# Pre-allocate the Ag array to fill it iteratively
Ag = np.zeros(A.shape[0])

for n in tqdm(range(1, A.shape[0]), desc="Computing results for n"):
    coefficients = {
        "cop_m": cop_m, "cop_q": cop_q,
        "eer_m": eer_m, "eer_q": eer_q,
        "peff": peff[n-1]    }
    if n != 1:
        ag_val, Q, q, cop, eer = calculate_Ag_Q_q(A[n-1], T_in_prev, coefficients,
ltot)
        Ag[n-1] = ag_val
    # The first iteration
    else:
        if A[0] < 0:
            Ag[0] = A[0] * (1 - 1 / cop_0)
            Q = (peff[0]) * (1 - 1 / cop_0)
            q = Q / ltot
            cop, eer = cop_0, None
        else:
            Ag[0] = A[0] * (1 + 1 / eer_0)
            Q = (peff[0]) * (1 + 1 / eer_0)
            q = Q / ltot
            cop, eer = None, eer_0

    t_star = n * t1_star
    T_field_star = calculate_T_field_star(n, t_star, Ag[:n], g_field, t1_star)
    T, T_in = calculate_T_and_T_in(T_field_star, q, Kg, Tg, Q, m[n-1], cp, rb, ql0)
    results.append((n, T_field_star, T, T_in, cop, eer, q, Q))
    T_in_prev = T_in

return pd.DataFrame(results, columns=['n', 'T_field_star', 'T', 'T_in', "COP", "EER",
"q", "Q" ])

def save_to_excel(df: pd.DataFrame, file_name: str = "results.xlsx"):
    df.to_excel(file_name, index=None)

```

## 5 IMPIANTO MULTISORGENTE

Nel presente capitolo si analizzano i dati ricavati dal monitoraggio dell'impianto reale, lo scopo è quello di fornire una panoramica sui fabbisogni energetici dell'edificio, le temperature e la ripartizione dei carichi sulle due sorgenti ed infine prestazioni e consumi dell'assetto multisorgente.

### 5.1 Analisi dati di monitoraggio

#### 5.1.1 Fabbisogni energetici

Si rilevano durante i tre anni di funzionamento in analisi fabbisogni piuttosto costanti stagione per stagione, non vi sono infatti stati interventi sull'impianto, né sull'involucro dell'edificio.

Il dato di fabbisogno viene elaborato come somma di tutte le produzioni giornaliere, grazie alla rilevazione del dato di portata e temperature di mandata e ritorno sul circolatore di produzione.

La climatizzazione è utilizzata in modo continuativo nella stagione invernale ed estiva. Di seguito si riporta grafico ad aree dei fabbisogni energetici giornalieri e rispettive potenze termiche:

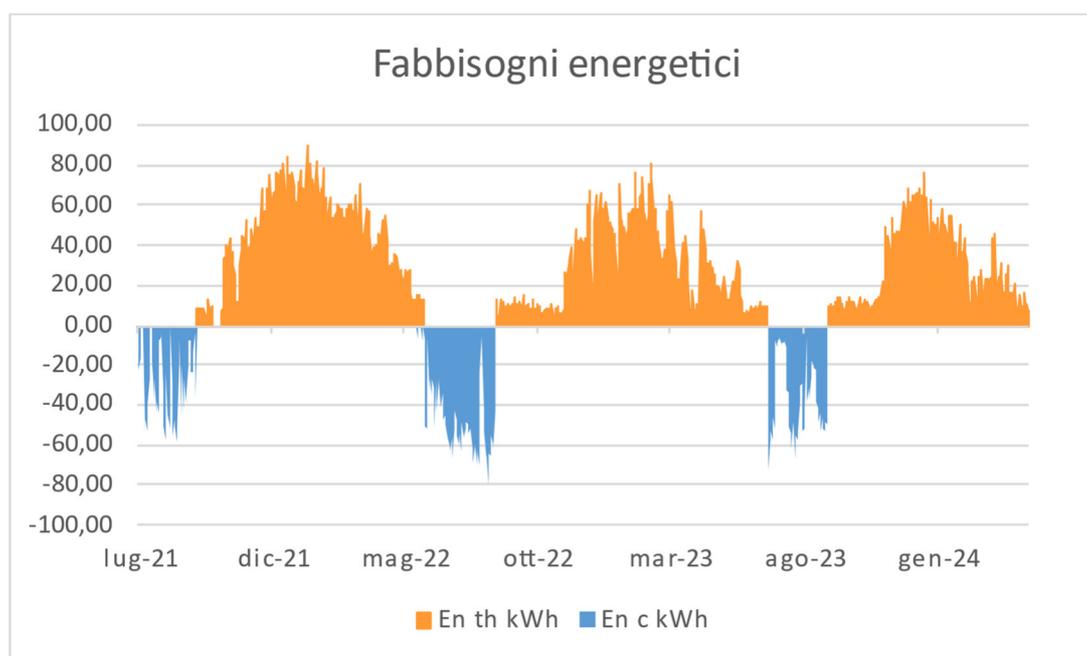
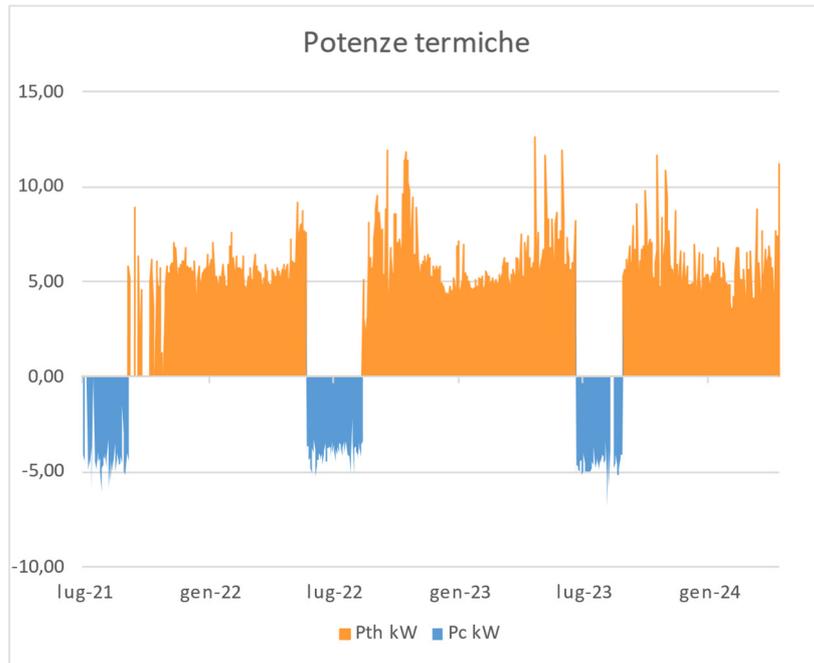


Fig. 39 : Fabbisogni energetici nel periodo di funzionamento



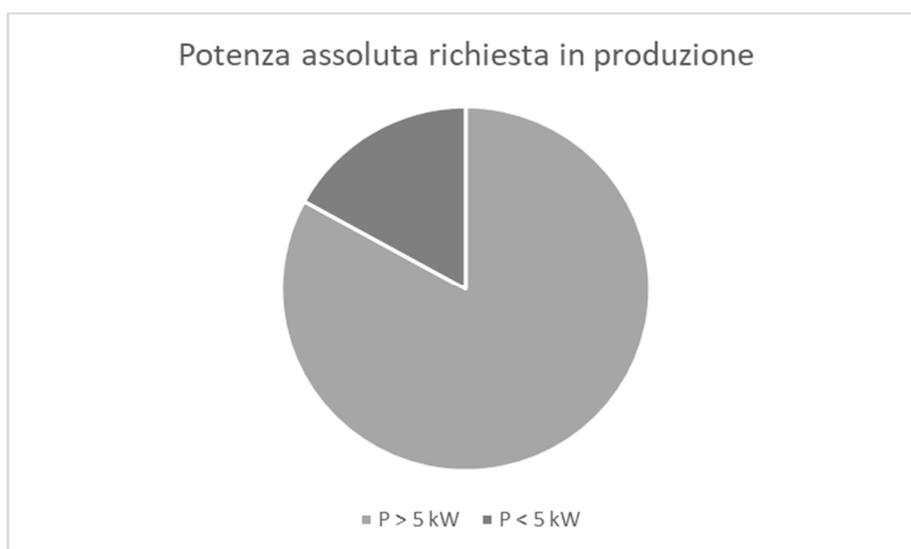
*Fig. 40 : Potenze termiche nel periodo di funzionamento*

Il dato di potenza è elaborato dalla piattaforma come media delle potenze durante le sole ore di funzionamento, questo approccio consente di valorizzare maggiormente i picchi di richiesta, che sarebbero altrimenti attenuati nel presente studio che si basa su dati giornalieri. Questo dato, utilizzato anche per la successiva simulazione in assetto geotermico per il calcolo delle efficienze, garantisce che il campo sonde ipotizzato possa sostenere il funzionamento di picco istantaneo e fornisce indirettamente un coefficiente di sicurezza sulla simulazione. La potenza massima da garantire in fase di riscaldamento,  $P_{th\ max}$  è di 12,59 kW, mentre la massima richiesta in valore assoluto in fase di raffreddamento,  $P_{c\ max}$ , di 7,47 kW. I valori sono in linea con i dati calcolati in fase di progettazione ed utilizzati in fase di dimensionamento, come riportato nella sezione 3.4.1.

Risulta evidente che l'andamento delle potenze rispetto all'andamento dei fabbisogni energetici è caratterizzato da valori assoluti piuttosto costanti, che meno ricalcano l'andamento della temperatura esterna. La pompa di calore quando è possibile si predispone infatti per lavorare nel punto di ottimo del compressore che, come si evince anche dalle schede tecniche, si trova poco al di sotto del 50% del carico utilizzando anche logiche climatiche secondo il trend di temperatura esterna prevedendo i carichi imminenti. La presenza del serbatoio inerziale che permette un accumulo energetico, favorisce ulteriormente il funzionamento in questo assetto.

Si può notare che, al netto di alcune giornate di funzionamento a pieno carico, il valore medio delle potenze richieste è notevolmente inferiore a quello di progetto, in particolare  $P_{th\ media}$  risulta 5,51 kW, mentre  $P_{c\ media}$ , di 4,36 kW.

Considerando la stima di potenzialità di scambio della sonda geotermica calcolata in fase di dimensionamento per circa 5 kW, si può calcolare, a scopo indicativo, la percentuale di funzionamento con valore assoluto di potenza richiesta inferiore a tale valore, che risulta dell' 83 % . Ciò significa che lo scambiatore ad aria, in termini di potenziale richiesto, potrebbe intervenire solamente per il 17 % delle giornate di funzionamento effettivo.



*Fig. 41 : % Potenze termiche soglia 5 kW*

Complessivamente, nel periodo in analisi, l'impianto richiede in produzione 24493 kWh per il riscaldamento e 8613 kWh per il raffrescamento, rispettivamente  $En_{th\ tot}$  e  $En_{c\ tot}$ .

### 5.1.2 Temperature di captazione

Si riporta di seguito grafico della temperatura dell'aria esterna,  $T_{ext}$ , misurata da una sonda dedicata installata all'esterno dell'edificio.

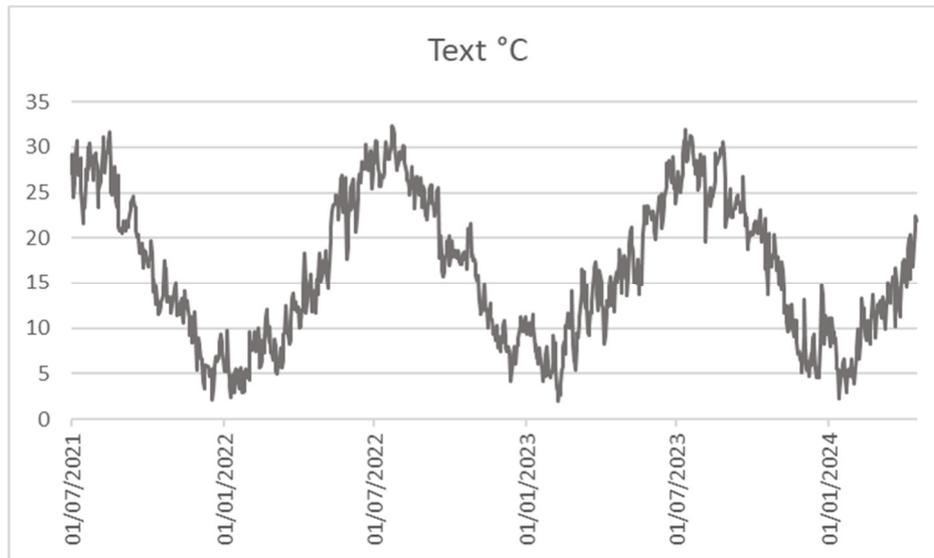
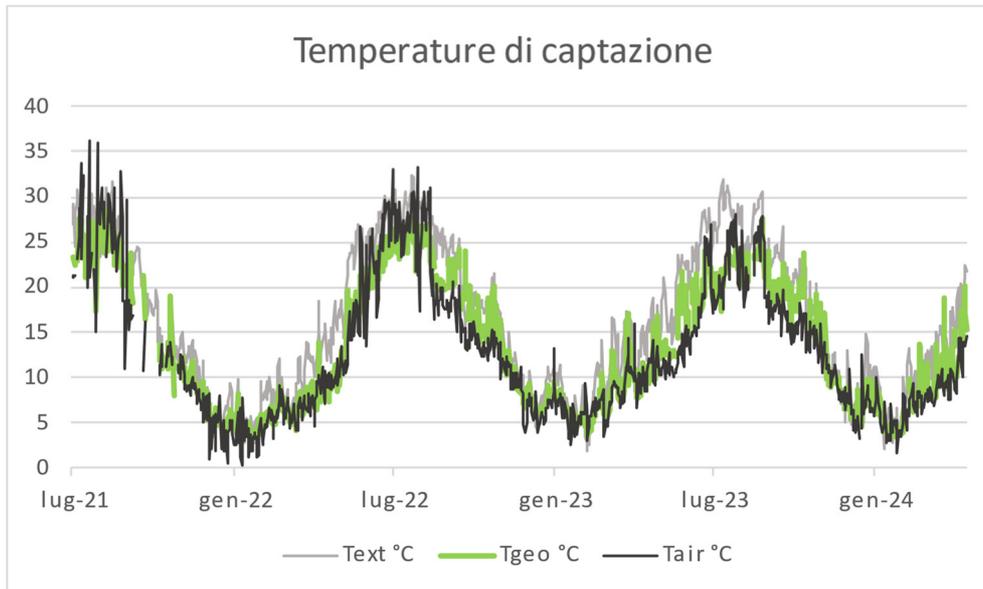


Fig. 42 : Temperatura aria esterna

Il valore medio rilevato,  $T_{ext\ media}$ , è di  $16,33^{\circ}\text{C}$ , l'andamento durante i tre anni in analisi è pressoché costante ed in linea con i dati climatici attesi per il sito. L'escursione termica massima rispetto al valore medio è di  $14,87^{\circ}\text{C}$ .

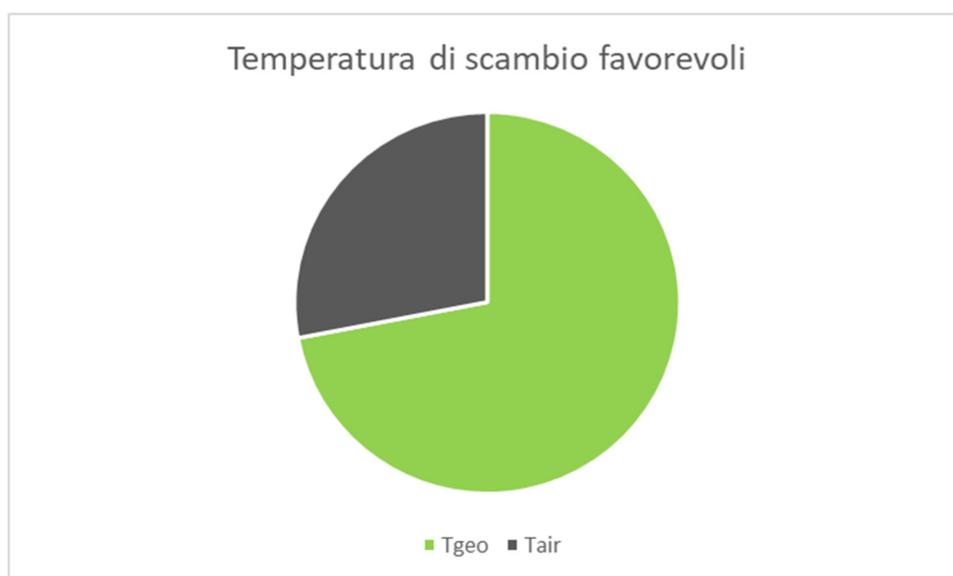
Le altre temperature misurate dal sistema di monitoraggio sono  $T_{air}$  e  $T_{geo}$ , rispettivamente la temperatura in uscita dall'unità di scambio ad aria e dalla sonda geotermica. Di seguito si riporta grafico dell'andamento delle due temperature a confronto anche con  $T_{ext}$



*Fig. 43 : Temperature di captazione*

Dal grafico risulta visibile che la  $T_{air}$ , e la  $T_{ext}$  da cui dipende direttamente, mostra un'escursione termica maggiore, in particolare nei picchi stagionali estivi ed invernali si porta a valori maggiori e minori rispettivamente di quelli di  $T_{geo}$ . In questi periodi, in cui le due risorse contribuiscono in serie nel circuito di captazione, risulta evidente come il successivo passaggio del fluido all'interno della sonda consente di mitigare la temperatura critica in uscita dall'unità ad aria. Come mostrato in Fig. 39, a tali picchi stagionali corrispondono anche i picchi di carichi termici, dunque queste variazioni in termini di temperatura vanno ad influenzare fortemente i consumi complessivi e quindi le efficienze dell'impianto. Diversa è la situazione nelle stagioni intermedie, primavera e autunno, in cui le temperature si sovrappongono, in taluni casi a favore della risorsa areotermica.

Si può calcolare, a scopo indicativo, la percentuale di misurazioni sul totale in cui la risorsa geotermica mostra temperature più favorevoli al funzionamento della pompa di calore rispetto all'unità ad aria. Sulla base della relazione tra efficienza della pompa di calore e temperatura di sorgente, si considera favorevole la temperatura maggiore durante la produzione in assetto invernale e quella minore in assetto estivo. Risulta una percentuale del 72 % a favore della risorsa geotermica.



*Fig. 44 : % Temperature captazioni favorevoli*

La risorsa aria risulta dunque favorevole per il 28 % delle giornate di funzionamento, queste si presentano come detto prevalentemente durante le stagioni intermedie a cui corrispondono carichi termici relativamente ridotti. Grazie all'assetto multisorgente è comunque possibile sfruttare a pieno la risorsa aria in queste condizioni di temperatura esterna, ottimizzando al massimo le efficienze.

### 5.1.3 Ripartizione del carico sulle sorgenti

La logica di convenienza in termini di temperature descritta nella sezione precedente è alla base della gestione delle risorse in impianti multisorgente. Come descritto nella sezione 3.5, la pompa di calore dà priorità alla risorsa favorevole, affiancando la seconda solo qualora la potenza richiesta dall'impianto eccedesse le potenzialità della prima.

Si riporta di seguito il grafico ad aree in pila delle energie scambiate con le due risorse,  $En_{geo}$  e  $En_{air}$ . Il grafico rappresenta il totale dell'energia di captazione, suddiviso sui due contributi secondo colore assegnato.

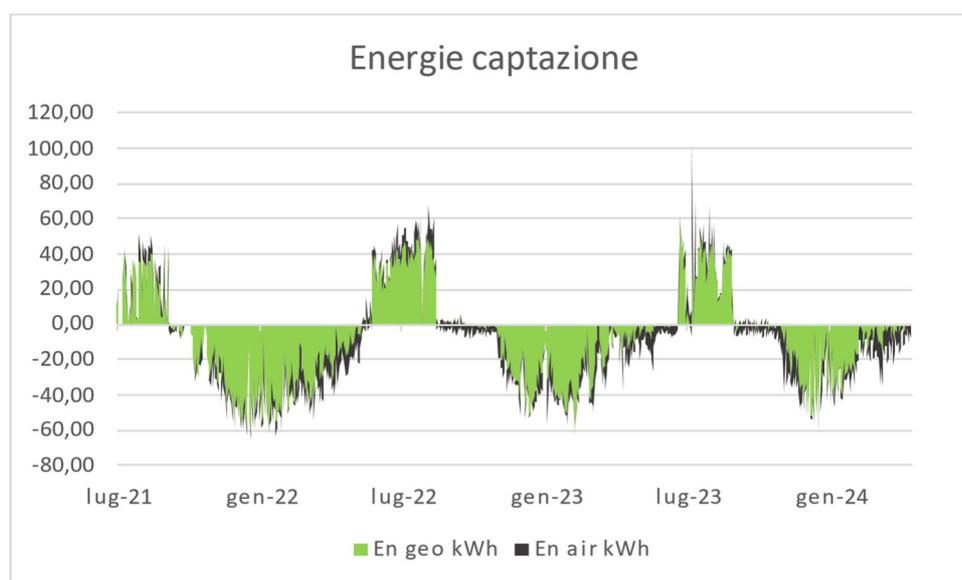


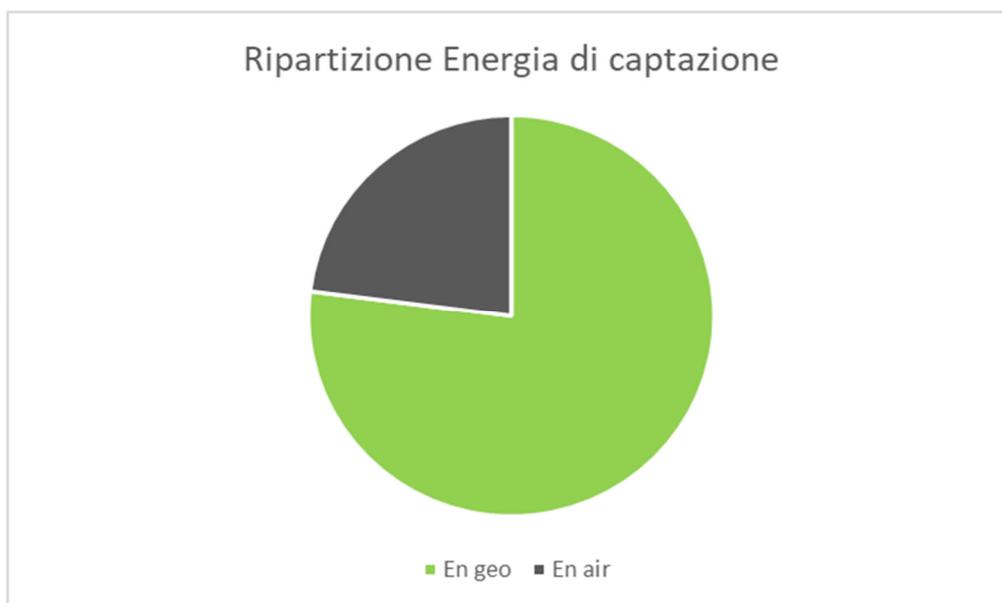
Fig. 45 : Energia di captazione multisorgente

Come previsto dalla precedente analisi delle potenze richieste e delle temperature, si riscontra nel grafico un maggiore utilizzo della risorsa geotermica durante tutto il periodo in analisi. La risorsa aerotermica contribuisce prevalentemente in due fasi:

- Picchi di potenza, in cui la sonda geotermica pur essendo la risorsa favorevole non è sufficiente a soddisfare pienamente il carico richiesto in produzione, è dunque necessario l'utilizzo dell'unità ad aria in supporto
- Stagioni intermedie, in cui la risorsa aria viene preferita a quella geotermica secondo logica di convenienza delle temperature.

Durante il periodo esaminato lo scambio complessivo di energia estratta per la produzione in assetto invernale risulta di 19262 kWh estratti per la produzione in assetto invernale ( $En_{geo} = -13901$  kWh,  $En_{air} = -5361$  kWh) e 10024 kWh smaltiti in produzione in assetto estivo ( $En_{geo} = 8720$  kWh,  $En_{air} = 1304$  kWh).

L'energia scambiata con le sorgenti in un bilancio annuo è dunque per circa il 50% compensata tra le due stagioni. È possibile calcolare la percentuale di energia in valore assoluto complessivamente scambiata con la sonda e con l'unità di scambio ad aria rispetto al totale. La percentuale risulta del 77% a favore della geotermia, dunque per il 23% sulla sorgente aerotermica.



*Fig. 46 : % Energia di captazione multisorgente*

### 5.1.4 Consumi ed efficienze

Grazie al contatore elettrico equipaggiato a bordo macchina, è disponibile il dato di consumo su base giornaliera per il periodo in analisi. Si riporta di seguito grafico ad aree delle energie termiche ed elettriche rilevate.

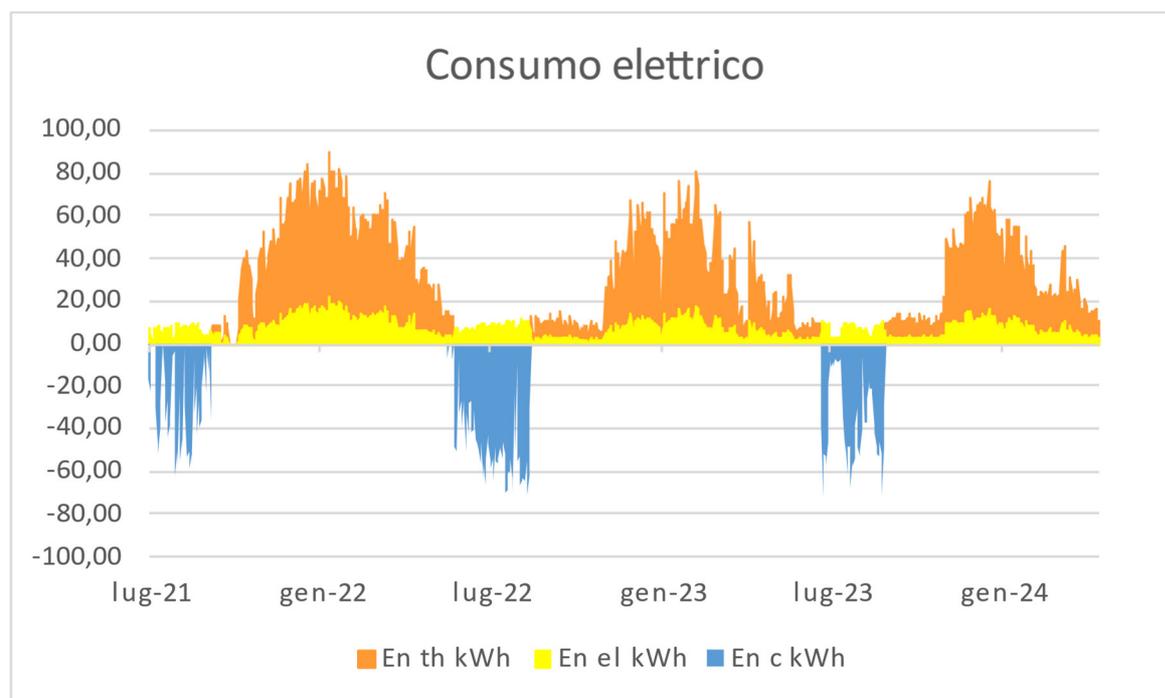


Fig. 47 : Energie elettriche e termiche multisorgente

Risulta un consumo elettrico complessivo di 6642 kWh ,  $En_{el}$  , ripartito in 5231 kWh per la produzione invernale e 1411 kWh per la produzione estiva.

Si utilizza per una stima dei costi il prezzo medio in cent€/kWh registrato da ARERA per il 2022, anno mediano della presente analisi, per utenze domestiche, considerando i seguenti costi:

- Costi di approvvigionamento dell'energia.
- Commercializzazione al dettaglio.
- Servizi di distribuzione, misura, trasporto, perequazione della trasmissione e distribuzione,
- Spesa per oneri di sistema
- Imposte che comprendono l'IVA e le accise.

Per un totale di 37,54 cent€/kWh.

Il costo medio annuo per il funzionamento dell'impianto risulta dunque di 831,14 €/anno.

Utilizzando l'equazione (2) il sistema calcola le efficienze giornaliere. Si riporta di seguito il grafico dell'andamento di COP ed EER.

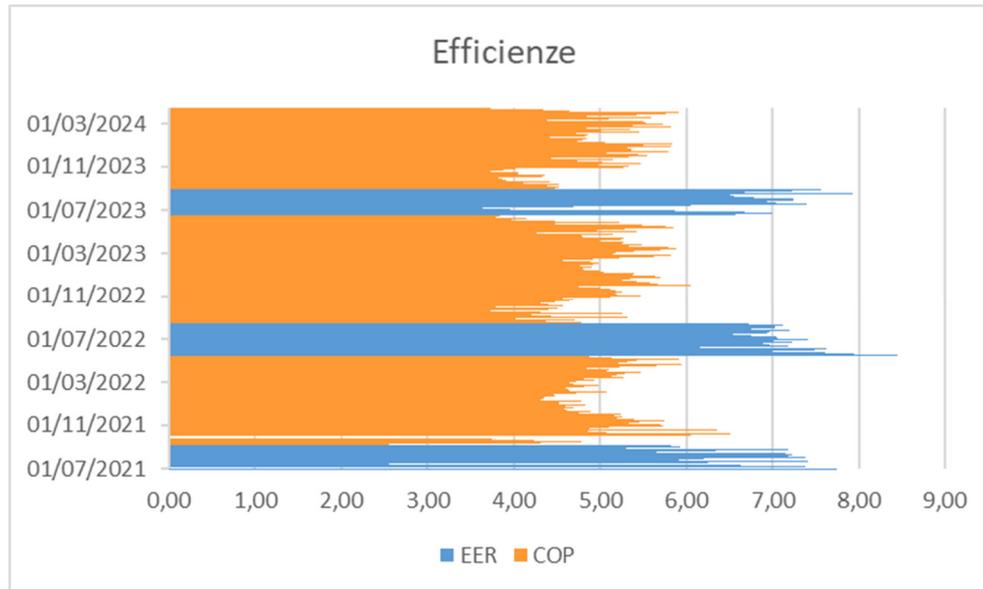


Fig. 48 : Efficienze impianto multisorgente

I rendimenti medi calcolati a partire da quelli giornalieri risultano:

$$\text{COP}_{\text{medio}} = 4,48$$

$$\text{EER}_{\text{medio}} = 5,87$$

Valutando invece gli stessi indicatori sulle energie complessive, ossia rendimenti stagionali risultano:

$$\text{sCOP} = 4,68$$

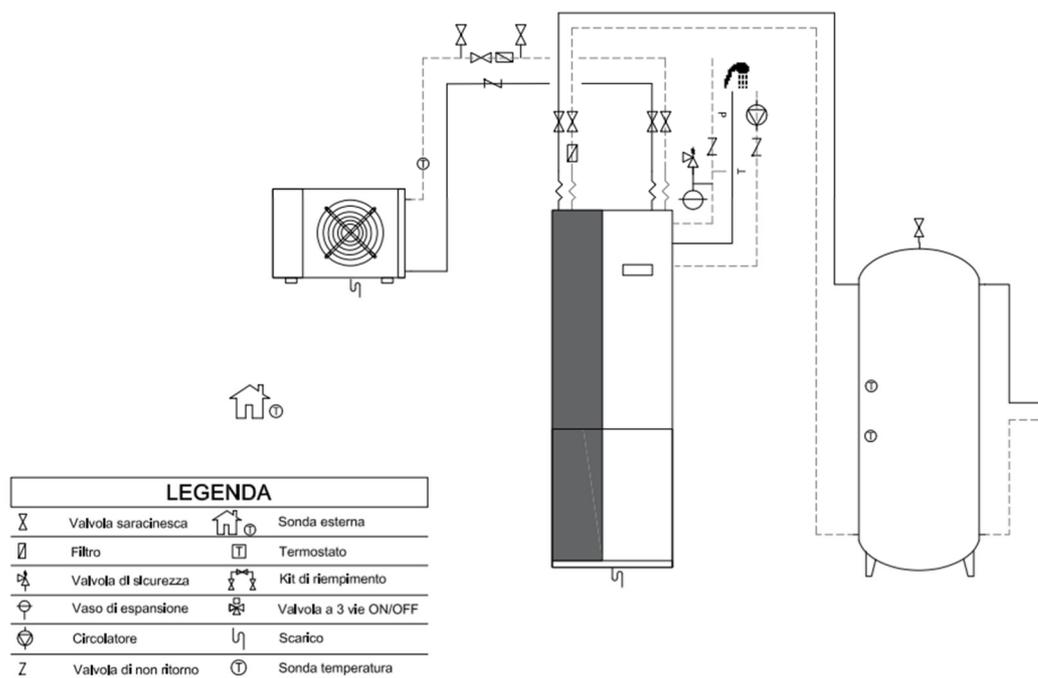
$$\text{sEER} = 6,10$$

## 6 IMPIANTO AEROTERMICO

La prima simulazione riguarda l'accoppiamento della pompa di calore idronica con la sola unità ad aria, complessivamente risulta dunque scambio air to water.

### 6.1 Schema di impianto

Di seguito si riporta lo schema di impianto nella configurazione in analisi.



*Fig. 49 : Schema impianto aria*

I singoli componenti corrispondono a quelli già descritti nel capitolo 3.3 , chiaramente ad esclusione della sonda geotermica e delle valvole di regolazione 3-vie rimosse.

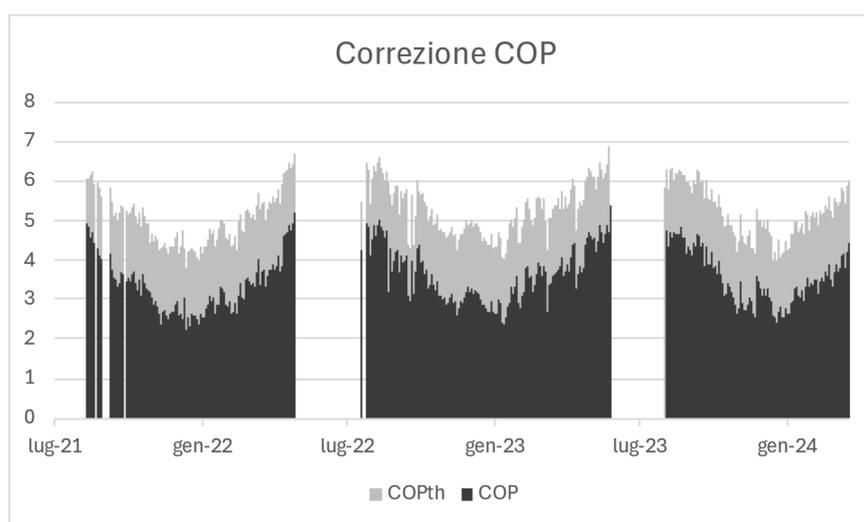
L'unità ad aria AU12, già prevista nella configurazione multisorgente, ha infatti una potenzialità di scambio di 12kW, dunque risulta sufficiente anche per l'accoppiamento esclusivo con la pompa di calore ecoGEO+ 1-9 prevista.

## 6.2 Analisi dati di simulazione

Considerando le misurazioni di  $T_{ext}$  e potenze termiche misurate da monitoraggio, si calcolano per ogni giornata di funzionamento il  $COP_{th}$  e EER simulato in configurazione aerotermica, successivamente si calcola il fattore correttivo in funzione della  $T_{ext}$  per ottenere il valore di COP, come precedentemente descritto nei capitoli 4.2 e 4.3 .

### 6.2.1 Fattore correttivo

Il fattore correttivo viene calcolato e applicato al  $COP_{th}$  per ogni giornata di funzionamento in funzione della corrispondente temperatura esterna. Il valore medio calcolato è 0,68 , dunque si applica al valore da scheda  $COP_{th}$  un decremento medio del 32% . Di seguito si riporta il grafico dell'andamento dei due valori.



*Fig. 50 : Correzione del COP*

Sebbene sia visibile una diminuzione del fattore correttivo ad inizio e a fine stagione, quando si verificano le temperature più favorevoli, tale variazione non è molto incidente in termini assoluti. Si conclude che la regressione lineare ottenuta, calcolata su un numero limitato di giornate campione, possa essere sbilanciata verso il termine noto, a discapito del coefficiente moltiplicativo della variabile temperatura, rispetto a quanto atteso. In termini assoluti, verificando anche i valori nel periodo di riferimento, sarebbe presumibile incontrare efficienze ancora più ridotte nei periodi di picco invernale ed efficienze più in linea con quelle teoriche durante le stagioni intermedie.

La relazione, se confrontata con il periodo di monitoraggio reale in assetto aerotermico, fornisce un dato significativo sull'andamento medio, dunque attendibile per il calcolo dei valori energetici totali, ma presumibilmente non correttamente ripartito in termini di prestazioni giornaliere.

### 6.2.2 Consumi ed efficienze

Si riporta di seguito il grafico dell'andamento di COP ed EER calcolati come descritto nella sezione precedente.

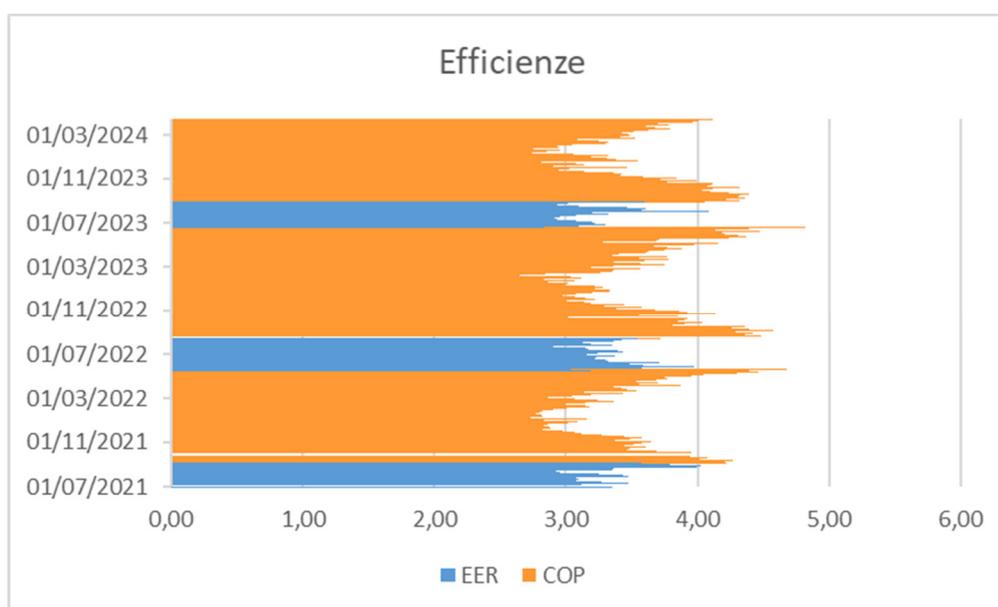


Fig. 51: Efficienze impianto aria

I rendimenti medi calcolati a partire da quelli giornalieri risultano:

$$\text{COP}_{\text{medio}} = 3,37$$

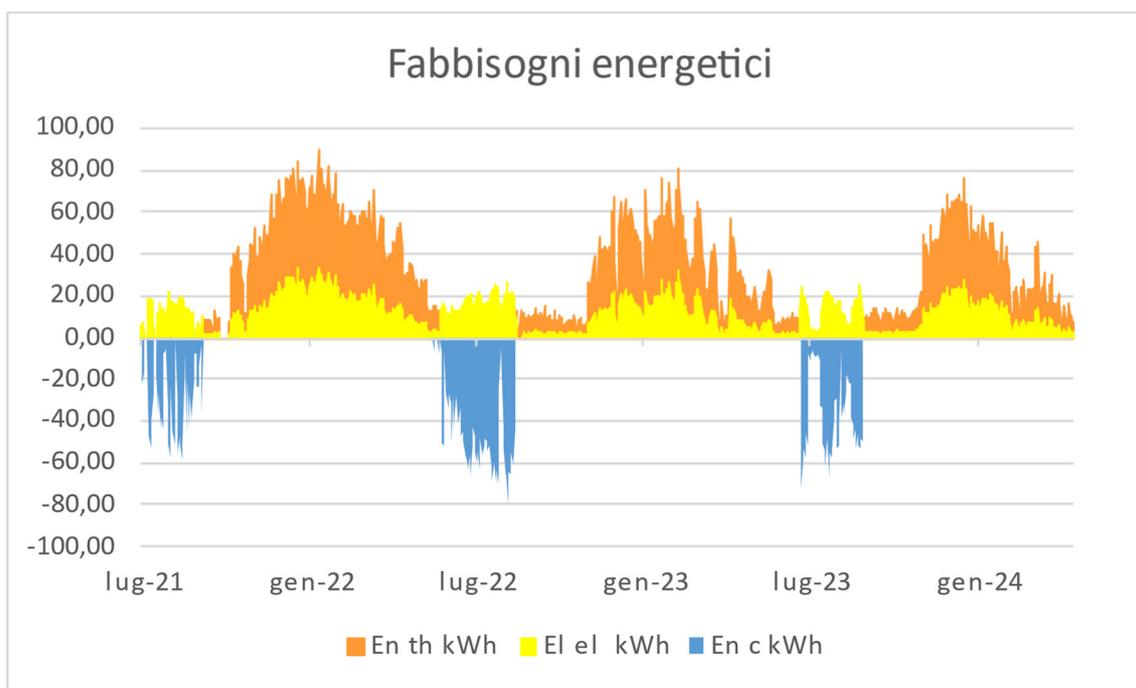
$$\text{EER}_{\text{medio}} = 3,16$$

Valutando invece gli stessi indicatori sulle energie complessive, ossia rendimenti stagionali risultano:

$$\text{sCOP} = 3,09$$

$$\text{sEER} = 3,15$$

Una volta ottenuti i valori di COP e EER e noti i fabbisogni energetici da monitoraggio è possibile calcolare utilizzando la forma inversa dell'equazione (2), il consumo di energia elettrica giornaliera. Si riporta di seguito grafico ad aree delle energie termiche ed elettriche.



*Fig. 52 : Energie elettriche e termiche aria*

Risulta un consumo elettrico complessivo di 10675 kWh ,  $En_{el}$  , ripartito in 7907 kWh per la produzione invernale e 2767 kWh per la produzione estiva.

Con riferimento al costo utilizzato nella sezione precedente di 37,54 cent€/kWh, il costo medio annuo per il funzionamento dell'impianto risulta dunque di 1245,42 €/anno.

### 6.2.3 Costi di investimento

Nella presente sezione si desidera valutare indicativamente il delta costo di investimento per la soluzione aerotermica rispetto alla soluzione di riferimento multisorgente.

Si valutano equivalenti le seguenti voci di costo:

- Progettazione dell'impianto
- Fornitura e installazione della pompa di calore ed accessori
- Fornitura ed installazione dell'unità di scambio AU12

Risultano ridotte le seguenti voci di costo:

- Fornitura e posa delle tubazioni in polietilene per i collegamenti orizzontali
- Fornitura e dosaggio glicole propilenico

Tot : - 800 €

È necessario sottrarre le seguente voci di costo:

- Pratiche autorizzative perforazioni
- Perforazione sonda geotermica 90 mt

Tot : - 7.800 €

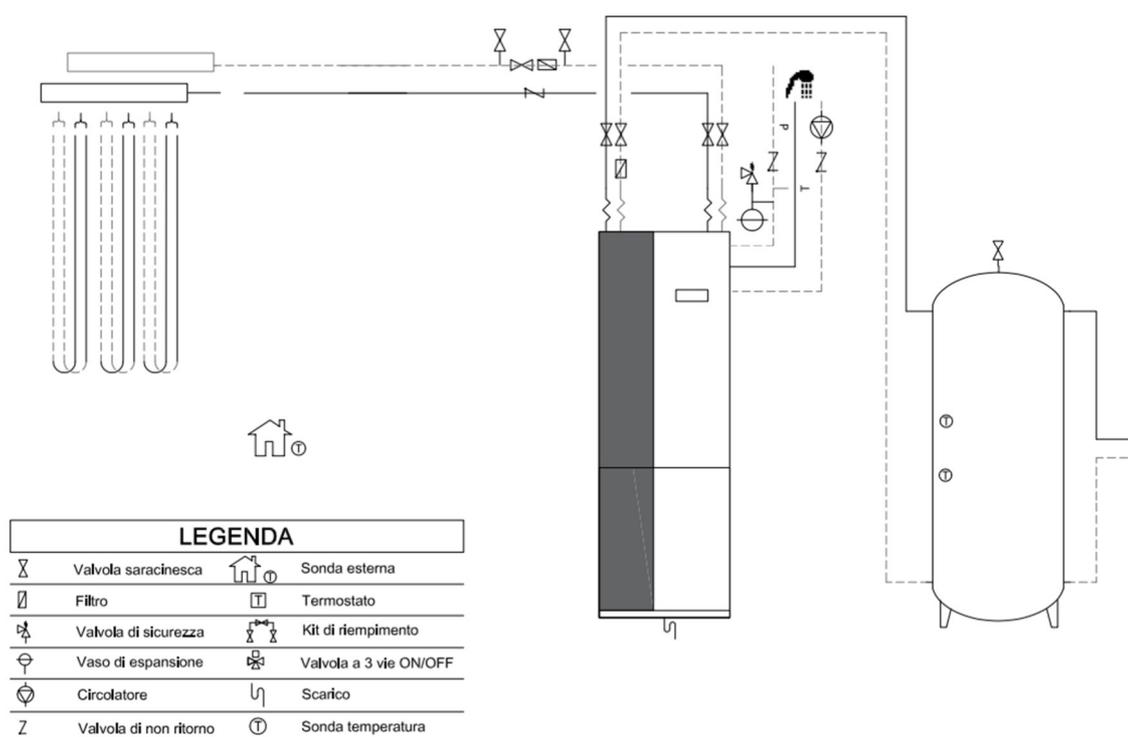
Sommando i contributi sopra citati si definisce una riduzione complessiva di € 8.600 circa.

## 7 IMPIANTO GEOTERMICO

La seconda simulazione riguarda l'accoppiamento della pompa di calore idronica con le sole sonde geotermiche.

### 7.1 Schema di impianto

Di seguito si riporta lo schema di impianto nella configurazione in analisi.



*Fig. 53 : Schema impianto geotermico*

I singoli componenti corrispondono a quelli già descritti nel capitolo 3.3 , ad esclusione dell'unità AU12 e delle valvole di regolazione 3-vie rimosse.

Avendo però previsto in questo caso il sistema di captazione composto da tre sonde geotermiche, è necessario prevedere un collettore dedicato, che viene normalmente installato all'interno della centrale termica.

## 7.2 Analisi dati di simulazione

Per la presente simulazione, come descritto nel capitolo 4.4, è necessario in primo luogo procedere al calcolo della temperatura di captazione. Tale valore viene poi utilizzato in input per il calcolo di COP ed EER giornalieri.

### 7.2.1 Temperatura di captazione

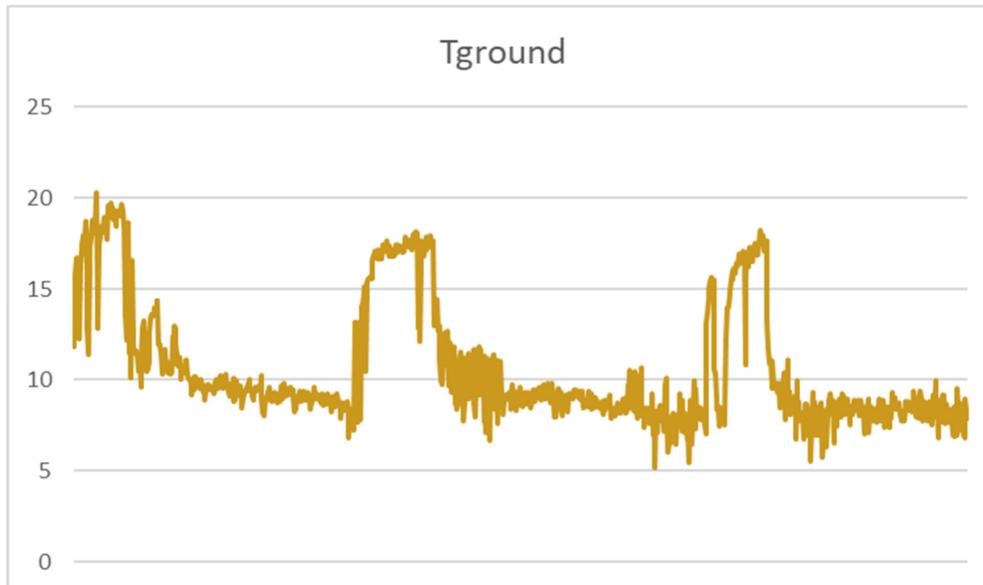
Si mostra di seguito grafico dell'andamento della temperatura di captazione come risultato del codice di calcolo riportato nella sezione 4.4.2



*Fig. 54 : Andamento temperatura captazione geotermica*

Risulta un andamento caratterizzato da brusche variazioni che ricalcano il profilo delle potenze utilizzate in input come previsto dal metodo. I massimi e minimi raggiunti sono accettabili in termini tecnici e garantiscono complessivamente alte prestazioni.

La temperatura del terreno a contatto con la sonda risulta meno influenzata dalle variazioni giornaliere in termini di potenze richieste, mostrando oscillazioni minori e più gradualità.



*Fig. 55 : Andamento temperatura terreno geotermica*

L'andamento, per entrambe le temperature, risulta piuttosto costante nei tre anni di simulazione, grazie anche al parziale bilanciamento tra l'energia estratta complessivamente durante le stagioni invernali, di 19.572 kWh, e l'energia smaltita nel terreno complessivamente durante le stagioni estive, di 10.069 kWh.

### 7.2.2 Consumi ed efficienze

Si riporta di seguito il grafico dell'andamento di COP ed EER calcolati come descritto nelle sezioni precedenti.

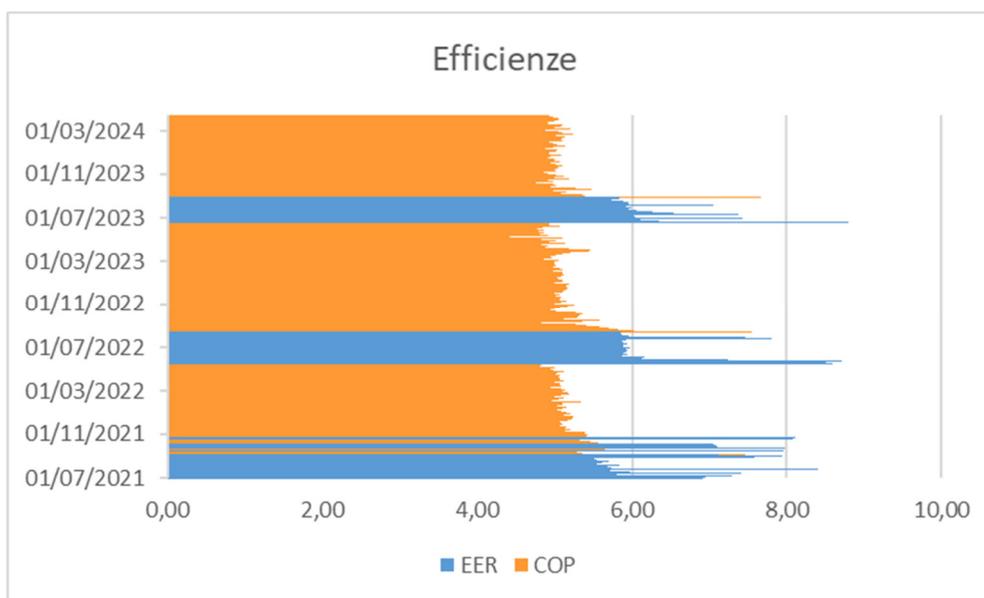


Fig. 56: Efficienze impianto geotermico

I rendimenti medi calcolati a partire da quelli giornalieri risultano:

$$\text{COP}_{\text{medio}} = 4,98$$

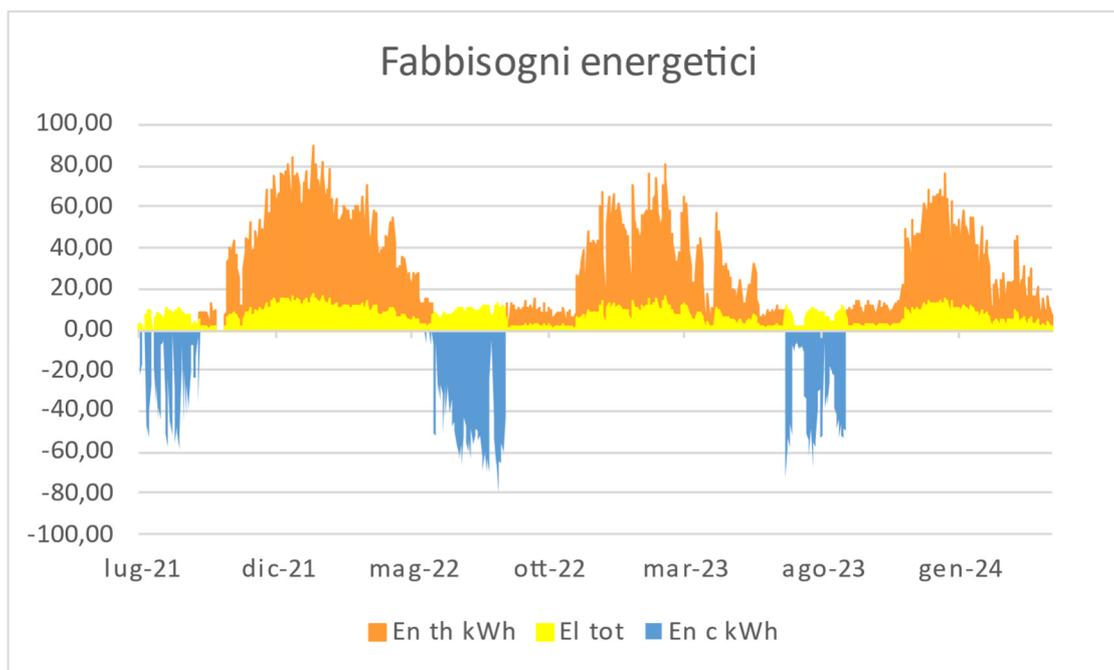
$$\text{EER}_{\text{medio}} = 6,13$$

Valutando invece gli stessi indicatori sulle energie complessive, ossia rendimenti stagionali risultano:

$$\text{sCOP} = 4,97$$

$$\text{sEER} = 5,92$$

Una volta ottenuti i valori di COP e EER e noti i fabbisogni energetici da monitoraggio è possibile calcolare utilizzando la forma inversa dell'equazione (2), il consumo di energia elettrica giornaliera. Si riporta di seguito grafico ad aree delle energie termiche ed elettriche.



*Fig. 57 : Energie elettriche e termiche geotermiche*

Risulta un consumo elettrico complessivo di 6377 kWh ,  $En_{el}$  , ripartito in 4921 kWh per la produzione invernale e 1456 kWh per la produzione estiva.

Con riferimento al costo utilizzato nelle sezioni precedenti di 37,54 cent€/kWh, il costo medio annuo per il funzionamento dell'impianto risulta dunque di 793,72 €/anno.

### 7.2.3 Costi di investimento

Nella presente sezione si desidera valutare indicativamente il delta costo di investimento per la soluzione geotermica rispetto alla soluzione di riferimento multisorgente.

Si valutano equivalenti le seguenti voci di costo:

- Progettazione dell'impianto
- Pratiche autorizzative perforazioni
- Fornitura e installazione della pompa di calore ed accessori

Risultano da aumentare le seguenti voci di costo:

- Fornitura e posa delle tubazioni in polietilene per i collegamenti orizzontali
- Fornitura e dosaggio glicole propilenico
- Perforazioni sonde geotermiche 3 x 90 mt

Tot : 16500 €

È necessario sottrarre le seguente voci di costo:

- Fornitura e installazione unità AU12

Tot : - 4750 €

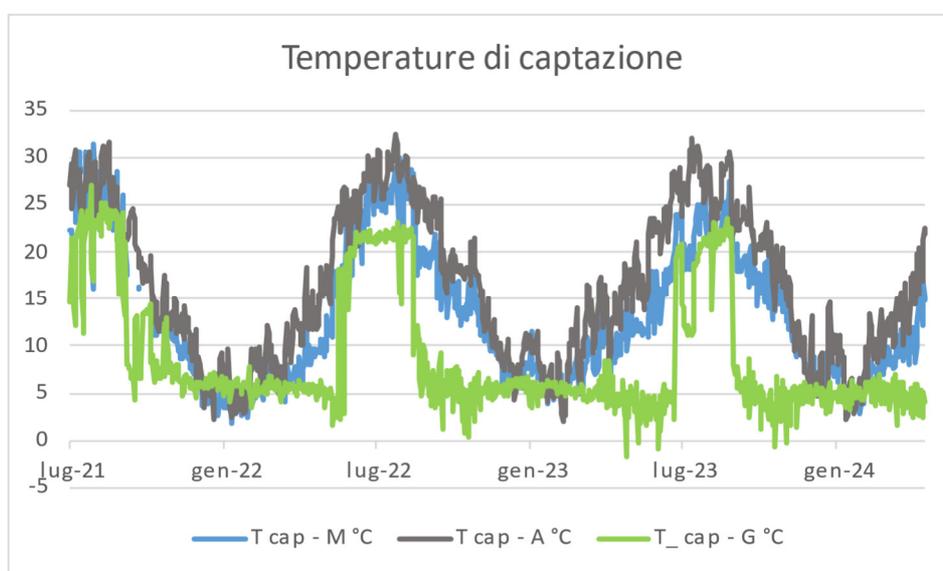
Sommando i contributi sopra citati si definisce un aumento complessivo di € 11.750 circa.

## 8 CONFRONTO

Nel presente capitolo si confrontano i risultati ottenuti per i tre casi in esame, analizzando il tema delle temperature di captazione, delle efficienze e dei costi.

### 8.1 Temperature di captazione

A parità di fabbisogni energetici, il dato di temperatura del circuito di captazione risulta il parametro determinante per l'efficienza di funzionamento dell'impianto. Si riporta di seguito grafico dell'andamento di tali temperature per i tre casi in esame.

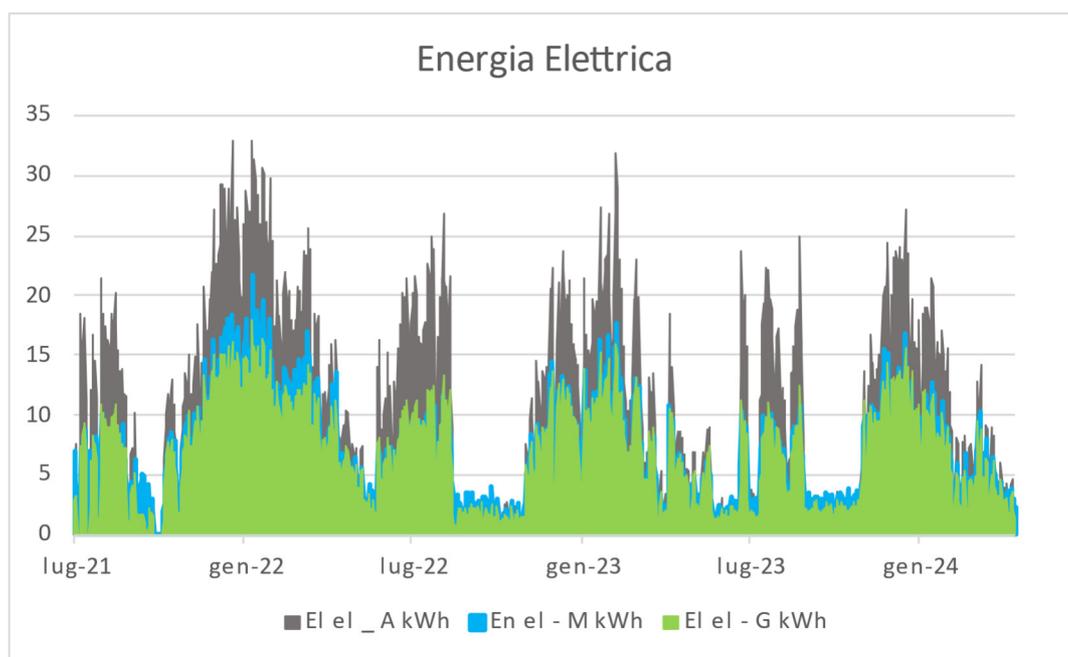


*Fig. 57 : Confronto temperature di captazione*

L'aria esterna risulta una risorsa favorevole limitatamente durante le stagioni intermedie, mostrandosi però sconveniente durante i picchi stagionali nei quali anche i carichi energetici sono massimi. La temperatura sul circuito geotermico ha un comportamento complementare, risultando generalmente non favorevole durante le stagioni intermedie ma garantendo efficienza nei periodi di massimo carico, in particolare in assetto estivo garantisce con continuità temperature ottimali per lo scambio. L'andamento della temperatura complessiva di captazione multisorgente rappresenta un buon compromesso tra le due soluzioni.

## 8.2 Consumi ed efficienze

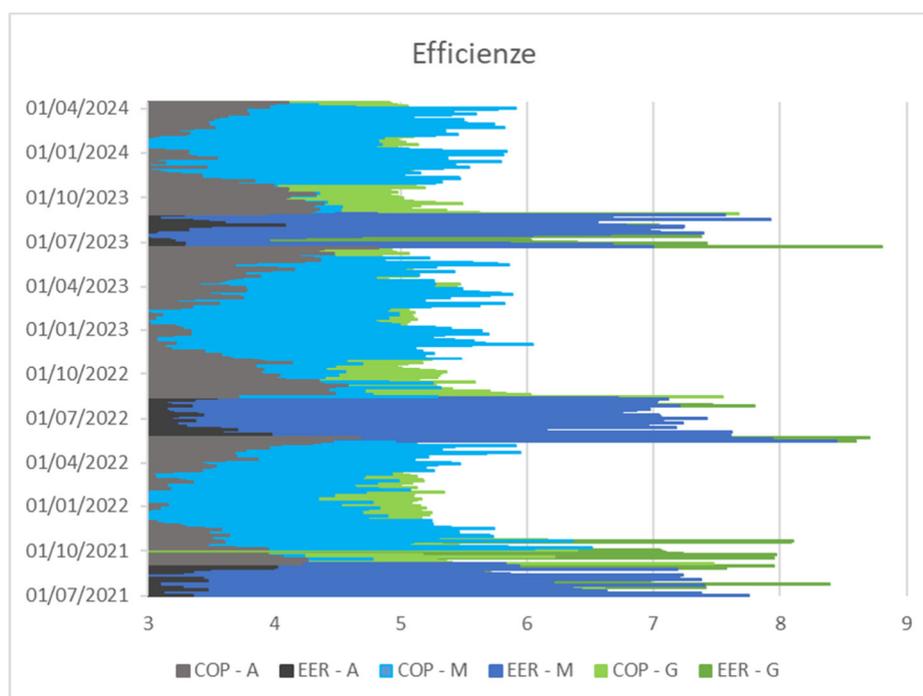
Di seguito si riporta il grafico complessivo delle elettriche necessarie per la produzione termica nei tre casi e corrispondenti valori di efficienza.



*Fig. 58 : Confronto energie elettriche*

Il grafico dei consumi elettrici è in linea con le considerazioni fatte in precedenza sulle temperature di captazione. L'assetto aerotermico richiede in generale un maggiore consumo per la produzione estiva ed invernale. L'impianto multisorgente mostra dati di consumo sovrapponibili a quelli dell'impianto geotermico, che supera solo nelle giornate di funzionamento invernale in cui è necessario il supporto dell'unità ad aria, in linea con quanto descritto nella sezione 5.1.3 .

A scopo di riepilogo si riporta in ultimo il grafico complessivo delle efficienze, ad ulteriore conferma delle considerazioni precedenti.



*Fig. 59 : Confronto efficienze*

Si riporta inoltre tabella riepilogativa delle efficienze medie calcolate per le tre configurazioni:

	Multisorgente		Aerotermico		Geotermico	
	Medio	Stagionale	Medio	Stagionale	Medio	Stagionale
<b>COP</b>	4,48	4,68	3,37	3,09	4,98	4,97
<b>EER</b>	5,87	6,1	3,16	3,15	6,13	5,92

*Tab . 9 : Riepilogo efficienze*

Si evince per l'impianto multisorgente che a discapito della ripartizione della potenza di picco inferiore al 50% sulla geotermia, le efficienze dell'impianto risultano notevolmente più vicine a quelle di impianto geotermico, rispetto all'aerotermico. Nel confronto estivo in particolare, gli andamenti del multisorgente sono sostanzialmente sovrapponibili a quelli geotermici. Le potenze estive infatti, come visto precedentemente, consentono alla sonda di coprire quasi interamente il funzionamento. L'unità ad aria interviene quindi solo in logica di convenienza e non in logica di supporto, portando ad un sEER perfino superiore, seppur di pochi decimi, a quello geotermico.

### 8.3 Costi di investimento e di esercizio

Come da riportato nelle rispettive sezioni, si è individuato il costo annuo per il funzionamento di ciascun impianto e il delta di costo d'investimento delle due soluzioni simulate rispetto alla soluzione multisorgente. Si riporta di seguito l'andamento di tali costi per la vita utile dell'impianto, corrispondente a quella della pompa di calore dichiarata di 20 anni. Si specifica che all'anno zero si considera un costo dell'investimento nullo per l'impianto multisorgente in quanto base di riferimento. È infatti di particolare interesse valutare l'eventuale ammortamento delle differenze sul capitale richiesto dalle tre tecnologie.

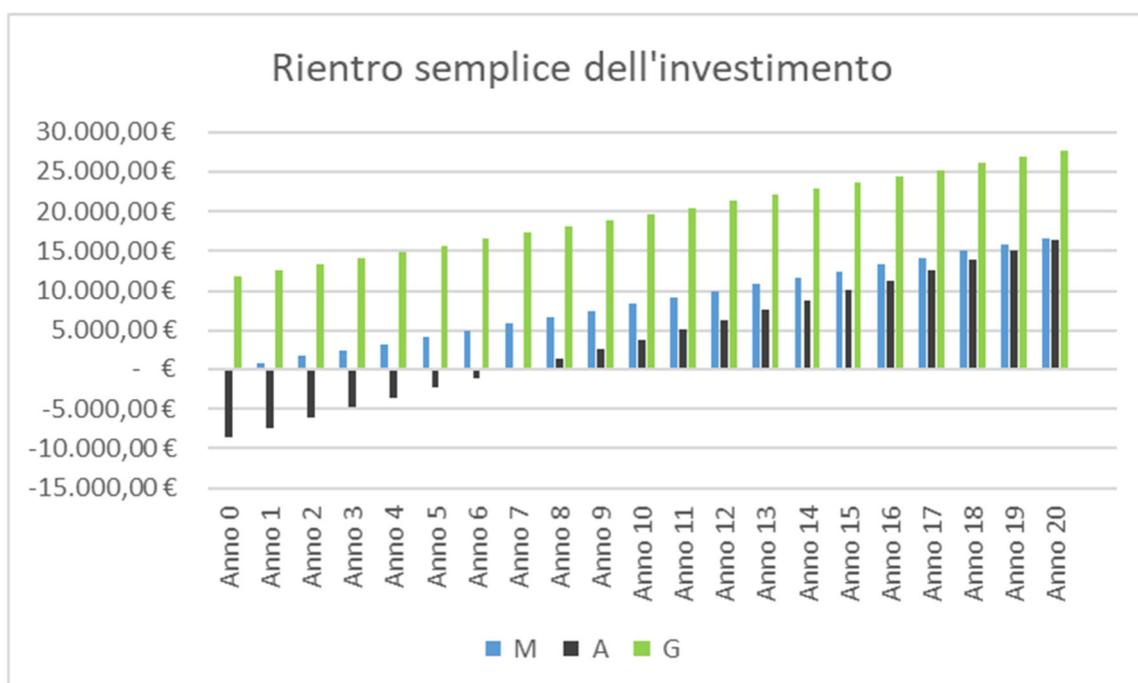


Fig. 60 : Confronto costi

Le configurazioni aerotermica e multisorgente risultano sostanzialmente equivalenti al termine della vita utile dell'impianto, dunque il delta di costo viene ripagato dai minori consumi elettrici. Per quanto riguarda la configurazione geotermica tale rientro non si verifica, non risulta dunque conveniente economicamente per le piccole potenze tipiche del residenziale monofamiliare o bifamiliare dimensionare il campo sonde sulla potenza di picco, se ubicate in zone climatiche non avverse alla risorsa aria.

Si riportano di seguito alcune considerazioni aggiuntive sul tema costi, fondamentali per un'analisi completa delle tre configurazioni:

### 1) Incentivi:

Le variazioni sul costo di investimento delle tre soluzioni non prevedono l'eventuale contributo di incentivi dedicati. In particolare, in caso di realizzazione dell'impianto contestualmente alla sostituzione di un generatore di tipo tradizionale, è possibile accedere a diversi incentivi, come l'EcoBonus 65% con cui è possibile recuperare fino al 65% dell'importo sotto forma di credito fiscale nei 10 anni successivi alla realizzazione, o l'incentivo Conto Termico 2.0 che garantisce un incentivo sotto forma di bonifico cui importo varia a seconda delle caratteristiche tecniche della pompa di calore, generalmente copre circa il 30% dell'importo complessivo. La riduzione dell'investimento iniziale grazie al supporto di incentivi può modificare l'esito del rientro per le configurazioni analizzate, favorendo la soluzione multisorgente e quella geotermica.

### 2) Costo dell'energia elettrica:

Un parametro fondamentale per l'analisi dell'investimento è il costo dell'energia elettrica per l'utente domestico. Tale costo subisce continue variazioni che influenzano notevolmente i bilanci economici, soprattutto sul lungo periodo. Eventuali aumenti del costo dell'energia favoriscono le soluzioni multisorgente e geotermica. In generale minori consumi si traducono in maggiore stabilità e indipendenza dalle fluttuazioni dei costi energetici per il proprietario dell'impianto.

### 3) Vita utile delle sonde geotermiche:

In questa trattazione si considera la vita utile dell'impianto facendo riferimento alla pompa di calore, mentre le sonde geotermiche godono in realtà di una vita utile molto maggiore, nell'ordine degli 80 anni. Ciò significa che, quando occorre la necessità di sostituire i componenti di centrale, compresa la pompa di calore e l'unità di scambio ad aria, le sonde geotermiche mantengono la loro funzionalità. Per un impianto in configurazione aerotermica è invece necessario sostenere per intero il costo dell'impianto al momento del rinnovo.

È quindi necessario nelle valutazioni economiche tenere conto del valore residuo del campo sonde per impianti geotermici o multisorgente una volta terminata la vita utile dell'impianto.

#### 4) Aumento delle temperature esterne:

La previsione di aumento delle temperature esterne nei prossimi anni, porta sempre maggiore attenzione sui carichi termici estivi per il raffrescamento. Come mostrato dai grafici nelle sezioni precedenti le configurazioni geotermica e multisorgente garantiscono efficienze decisamente maggiori rispetto all'aria in questo regime di funzionamento.

In un'ottica di aumento di tali carichi si ridurrebbero dunque ulteriormente i tempi di rientro.

#### 5) Criticità in termini di taglia del caso studio:

Il tempo di rientro del maggior investimento da sostenere in assetto multisorgente è compensato dalle migliori prestazioni, dunque minori consumi energetici di esercizio. Il rapporto tra queste due grandezze è quindi un parametro fondamentale per la valutazione economica dell'investimento. L'investimento iniziale, indicato con la sigla CAPEX, è determinato principalmente dalla taglia della pompa di calore, dell'unità di scambio ad aria e del numero di perforazioni necessarie, ha dunque un andamento ben definito in funzione della potenza nominale dell'impianto. In particolare, le pompe di calore e le unità ad aria presentano generalmente un prezzo €/kW decrescente al crescere della potenza, l'andamento sarà caratterizzato da gradini determinati dalle taglie esistenti sul mercato. Il costo per la realizzazione del campo sonde è costituito da una quota rilevante di costi fissi, (ad esempio studi preliminari, pratiche autorizzative, accantieramento dell'area, trasporto in loco della macchina perforatrice), presenta dunque anch'esso un prezzo €/kW decrescente al crescere della potenza. Per quanto riguarda invece i costi di esercizio, OPEX, ipotizzando un profilo standard di ore di funzionamento e relativi carichi in impianti residenziali, i consumi risulteranno direttamente proporzionali alla potenza. Anche i costi di manutenzione sono indicativamente proporzionali alla potenza installata.

Di seguito si riporta grafico in pila dell'andamento delle due grandezze in relazione alla potenza corrispondente:

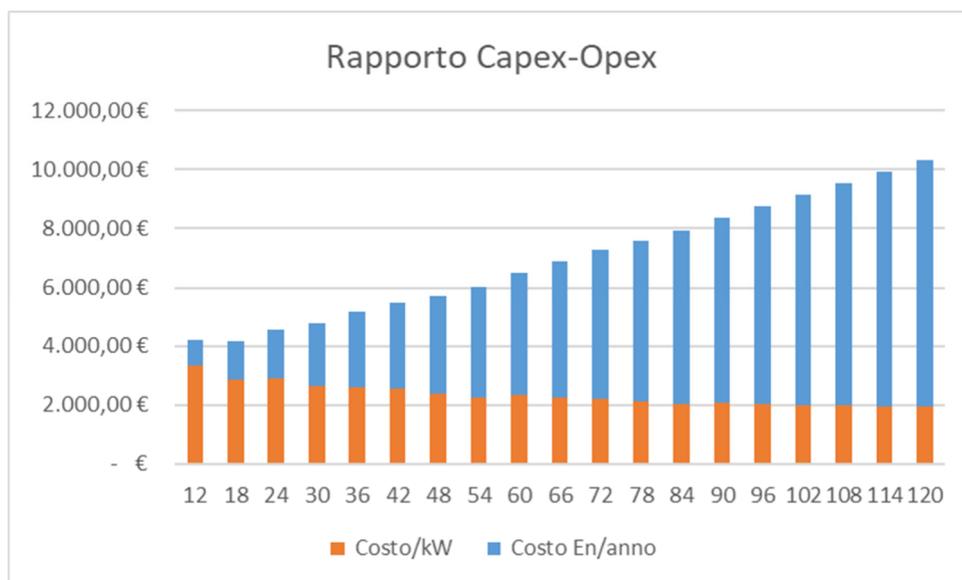


Fig. 61 : Confronto costi

Il caso studiato, di potenza nominale 12kW, così come eventuali impianti di taglie minori, risultano dunque i più penalizzati in termini di rapporto CAPEX/OPEX, ma, nonostante ciò, si verifica il rientro dell'investimento. Al crescere della potenza nominale installata il rapporto CAPEX/OPEX decresce e diminuisce notevolmente di conseguenza il tempo di rientro, fino a pochi anni, ad esempio per impianti condominiali centralizzati di taglia elevata.

## 9 LIMITI E SVILUPPI FUTURI

Come descritto nella sezione 6.2.1, il maggiore limite della presente trattazione è costituito dalla valutazione del fattore correttivo da applicare al COP in assetto aerotermico per tener conto degli sbrinamenti. Il campione di misure reali utilizzato per la valutazione di tale fattore non è sufficientemente ampio, limitandosi ad una sola stagione di riscaldamento con registrazione parziale dei dati. Per future simulazioni in questo assetto è necessario provvedere ad un'analisi approfondita dei valori orari di temperatura e umidità esterna, per calcolare con maggiore precisione il numero di cicli di sbrinamenti e relativo impatto sulle efficienze. In alternativa è possibile procedere al monitoraggio per periodo sufficientemente esteso di un impianto aerotermico equivalente ed installato in sito con caratteristiche climatiche sovrapponibili, per una valutazione empirica ed attendibile dello scostamento tra valori reali e teorici.

La presente analisi potrebbe inoltre essere estesa a condizioni operative differenti:

- Analisi di casi studio per diverse zone climatiche
- Analisi di casi studio per diverse temperature di mandata
- Analisi di casi studio per diverse potenze nominali
- Analisi di casi studio per diverse proporzioni geotermia/aerotermia

Sarebbe quindi possibile costruire uno strumento di dimensionamento allo scopo di individuare il punto di ottimo nella ripartizione delle risorse per nuovi impianti, sulla base delle specifiche caratteristiche del sito.

Un'ulteriore interessante analisi sarebbe quella di un confronto tra la configurazione multisorgente studiata nella presente trattazione ed una configurazione che presenta le due risorse in parallelo, dunque con due pompe di calore di potenza dimezzata ciascuna a cui è dedicata la singola risorsa geotermica o aerotermica. Si potrebbero valutare eventuali ottimizzazioni ed influenze positive dell'utilizzo delle due sorgenti in combinazione a servizio di una singola pompa di calore, rispetto alla semplice somma dei due contributi.

Infine, sarebbe possibile ripetere le simulazioni svolte su base oraria, per valutare eventuali differenze sui risultati determinate da un maggior dettaglio del profilo dei carichi.

## 10 CONCLUSIONI

La presente trattazione consente un'approfondita analisi del funzionamento di un impianto multisorgente nella configurazione dual-sources aria/geotermia. Si verificano per un periodo di tre anni le prestazioni, i consumi e le condizioni operative di funzionamento utilizzando un database di dati reali giornalieri. Si sviluppano quindi le simulazioni di impianti equivalenti in configurazione aerotermica e geotermica, calcolando i parametri necessari ad un confronto sulle prestazioni complessive delle diverse tecnologie. Si verifica la bontà dell'assetto multisorgente come valida ed efficiente alternativa ad un impianto geotermico puro, garantendo una maggiore accessibilità in termini di investimento iniziale, aspetto fondamentale per il mercato della climatizzazione residenziale.

Le efficienze dell'impianto multisorgente sono paragonabile a quelle di impianto a sonde, grazie all'ottimizzazione delle risorse che permette di sfruttare a pieno la risorsa aria nelle condizioni di funzionamento favorevole e in condizioni sfavorevoli limitare il suo contributo al supporto per le richieste di picco in produzione. Dimensionare l'unità ad aria sulla potenza nominale rappresenta inoltre un efficace sistema di backup, fondamentale per alcune applicazioni.

In conclusione, l'alternativa multisorgente rappresenta la migliore soluzione per il caso studio in esame, considerando le prestazioni complessive, il rientro del maggior investimento economico rispetto alla soluzione ad aria fornendo un bilancio a lungo termine equivalente, valorizzando la possibilità di sfruttare le sonde sul lungo periodo ben oltre la vita utile dell'impianto e garantendo maggiore autonomia rispetto alla materia prima energetica.

L'analisi offre spunti per ulteriori sviluppi in termini di maggior dettaglio e precisione relativamente alle simulazioni svolte, diversificazione delle condizioni operative e caratteristiche degli impianti, ed infine la costruzione di uno strumento di dimensionamento dedicato all'individuazione della ripartizione ottimale delle risorse per la progettazione di nuovi impianti.

## RIFERIMENTI

- International Energy Agency (IEA). 2019 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector 2019.
- Pattivinia Jeffrey, 2023, An introduction Heat Pumps
- M. Caleffi e F. Guidetti, “Idraulica 33”, Le pompe di calore, 2007
- A. Mohammed, W. Chi-Chuan “Review of defrosting methods”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 73 (2017) 53–74
- CTI. (2012, 11). UNI 11466 Heat pump geothermal systems - Design and sizing requirements. Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- Carta Geologica d'Italia: Progetto CARG - Regione Emilia-Romagna
- Capuano N., Martelli G. Note Illustrative alla Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000 Foglio 279
- <https://datacatalog.regione.emilia-romagna.it/catalogCTA/dataset/gradi-giorno-riscaldamento-raffrescamento>
- <https://it.climate-data.org/europa/italia/emilia-romagna/imola-14270>
- Signorelli S. (2004). Geoscientific investigation for the use of shallow low-enthalpy systems. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich: 91-96
- Yavuzturk C., Splitter J.D. (2003). Field validation of a short time step model for vertical ground-loop heat exchanger. ASHRAE Transactions 109: 1-12
- ASHRAE. (2007). GEOTHERMAL ENERGY. In R. a. American Society of Heating
- ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications (p. 32.1-32.30). Atlanta, Georgia, USA.
- <https://www.graphreader.com/>
- Deerman J.D., Kavanaugh S.P. (1991). Simulation of vertical U-tube ground coupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution. ASHRAE Transactions 97: 287-295
- Eklöf C., Gehlin S. (1996). TED-A mobile equipment for thermal response test. MSc-thesis 198E, Lulea University of Technology, Sweden: 62
- Eskilson P., Claesson J. (1988). Simulation model for thermally interaction heat extraction borehole. Numerical Heat Transfer 13: 149-165
- Gehlin S. (2002). Thermal response test-Method development and evaluation. PhD Thesis, Lulea University of Technology, Sweden: 215
- [arera.it/rapporti-e-relazioni/monitoraggio-retail/monitoraggio-retail-offerte-e-prezzi](http://arera.it/rapporti-e-relazioni/monitoraggio-retail/monitoraggio-retail-offerte-e-prezzi)