

A.C. VIOLANTE

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Sezione Supporto Tecnico Strategico
Centro Ricerche Casaccia, Roma

M. PROPOSITO

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Protezione e valorizzazione del territorio
e del capitale naturale
Laboratorio di Osservazioni e Misure per l'ambiente e il clima
Centro Ricerche Casaccia, Roma

G. GUIDI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Sezione Supporto Tecnico Strategico
Centro Ricerche Casaccia, Roma

R. TRINCHIERI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Divisione Produzione, Storage e Utilizzo dell'Energia
Laboratorio Ingegneria dei Processi e dei Sistemi
per la Decarbonizzazione Energetica
Centro Ricerche Casaccia, Roma

**REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO GEOTERMICO
SPERIMENTALE A BASSA ENTALPIA
PRESSO IL C.R. ENEA-CASACCIA (ROMA)**

RT/2023/23/ENEA



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

A.C. VIOLANTE

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Sezione Supporto Tecnico Strategico
Centro Ricerche Casaccia, Roma

M. PROPOSITO

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Protezione e valorizzazione del territorio
e del capitale naturale
Laboratorio di Osservazioni e Misure per l'ambiente e il clima
Centro Ricerche Casaccia, Roma

G. GUIDI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Sezione Supporto Tecnico Strategico
Centro Ricerche Casaccia, Roma

R. TRINCHIERI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Divisione Produzione, Storage e Utilizzo dell'Energia
Laboratorio Ingegneria dei Processi e dei Sistemi
per la Decarbonizzazione Energetica
Centro Ricerche Casaccia, Roma

**REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO GEOTERMICO
SPERIMENTALE A BASSA ENTALPIA
PRESSO IL C.R. ENEA-CASACCIA (ROMA)**

RT/2023/23/ENEA



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

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO GEOTERMICO SPERIMENTALE A BASSA ENTALPIA PRESSO IL C.R. ENEA-CASACCIA (ROMA)

A.C. Violante, M. Proposito, G. Guidi, R. Trinchieri,

Riassunto

Questo Rapporto descrive le attività svolte nell'ambito del Piano Triennale di realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, riguardanti la L.A. 1.7 "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali". Si pone, pertanto, in diretta continuità con il Rapporto tecnico "Studio preliminare di fattibilità e dimensionamento di massima di un impianto geotermico sperimentale a bassa entalpia integrato con pompa di calore" (RT/2023/2/ENEA).

Nel corso del primo semestre del 2021 è stato realizzato il campo geosonde con l'installazione di sonde geotermiche verticali, a circuito chiuso e configurazione a doppia U, in quattro pozzi a diversa profondità ubicati nell'area adiacente l'edificio F40, all'interno del C.R. ENEA-Casaccia. Il pozzo 1 è stato realizzato a carotaggio continuo, fino alla profondità di 100 m, per ricavare e caratterizzare i litotipi lungo la successione stratigrafica. Le sonde geotermiche sono state installate soltanto fino a 70 m di profondità a causa di sgrottamenti delle sabbie a fondo foro. Sempre nel pozzo 1 è stato condotto il Ground Response Test per definire la temperatura indisturbata del terreno, la conducibilità termica media delle rocce e la resistenza termica delle sonde. Le perforazioni degli altri tre pozzi sono state eseguite a distruzione di nucleo. Contestualmente alla messa in posa delle sonde geotermiche, nei pozzi sono state inserite le fibre ottiche di tipo Distributed Temperature Sensor per acquisire la temperatura lungo l'intero pozzo con una risoluzione termica di 0,1 °C e una risoluzione spaziale di 2 metri. Inoltre, sono state definite le caratteristiche del circuito idraulico, in termini di portata distribuita tra le sonde e di perdite di carico distribuite e concentrate. È stato infine concepito lo schema funzionale tipo e redatto il computo metrico dell'impianto.

Parole chiave: Sonde geotermiche verticali, GRT (Ground Response Test), Fibre ottiche DiTeSt, Monitoraggio temperatura.

Abstract

This Report deals with the activities carried out in the framework of the 2019-2021 Three-Year Implementation Plan for National Electricity System Research, concerning line 1.7 "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali". It is, therefore, the follow-up to the technical report "Studio preliminare di fattibilità e dimensionamento di massima di un impianto geotermico sperimentale a bassa entalpia integrato con pompa di calore" (RT/2023/2/ENEA).

During the first half of 2021, the borehole heat exchange field was realised with the installation of vertical closed-circuit geothermal probes, in a double-U configuration, in four boreholes at different depths located in the area adjacent to building F40, inside the C.R. ENEA-Casaccia. Well 1 was drilled with continuous coring to a depth of 100 m to extract and characterise the lithotypes along the stratigraphic succession. The geothermal probes were only installed up to a depth of 70 m due to the instability of the sands at the bottom of the hole. In well 1, the Ground Response Test was also performed to determine the undisturbed soil temperature, average rock thermal conductivity and thermal resistance of the probes. The drilling of the other three wells was performed at core destruction. Together with the installation of the geothermal probes, Distributed Temperature Sensor optical fibres were inserted in the wells to acquire the temperature along the entire well with a thermal resolution of 0.1 °C and a spatial resolution of 2 metres. Furthermore, the characteristics of the hydraulic circuit were defined, in terms of flow rate distributed between the probes, and distributed and concentrated pressure drops. Finally, the standard functional scheme was conceived, and the metric calculation of the system was drawn up.

Keywords: Vertical geothermal probes, GRT (Ground Response Test), DiTeSt Optical fibres, Temperature monitoring.

Indice

INTRODUZIONE	7
1. TECNICHE DI PERFORAZIONE UTILIZZATE	10
2. SONDE GEOTERMICHE VERTICALI	15
3. SONDAGGIO GEOGNOSTICO E RICOSTRUZIONE DELLA SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA	19
4. TEST DI RISPOSTA TERMICA.....	28
4.1. TEMPERATURA INDISTURBATA DEL TERRENO	34
4.2. PROVA DI FLUSSO	36
4.3. RISULTATI GRT	37
5. FIBRE OTTICHE DTS INSTALLATE NEI POZZI.....	41
6. CURVA CARATTERISTICA DEL CIRCUITO IDRAULICO.....	45
7. SISTEMA DI CONTROLLO E MONITORAGGIO DELL'IMPIANTO	51
8. CONCLUSIONI.....	55
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	56

INTRODUZIONE

Con la realizzazione dell'impianto geotermico sperimentale a bassa entalpia presso il C.R. ENEA-Casaccia (Roma) si entra nel vivo delle attività previste nel Piano Triennale di realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale – linea di attività 1.7 “Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali”.

Questa fase realizzativa rappresenta il naturale esito delle attività preliminari, indirizzate in primo luogo alla ricostruzione dell'assetto litologico-stratigrafico e idrogeologico dell'area del C.R. ENEA-Casaccia, attraverso il reperimento e la consultazione dei dati di letteratura e delle stratigrafie dei sondaggi geognostici effettuati in passato all'interno del Centro. La valutazione geologica preliminare ha reso possibile la stima del valore di conducibilità termica delle rocce nell'area e l'individuazione del sito in cui realizzare l'impianto geotermico sperimentale. Le attività condotte nel primo anno hanno riguardato anche la simulazione dei carichi termici e il dimensionamento delle sonde, considerando i carichi di picco invernali ed estivi. Infine, è stato stimato il valore della potenza termica estratta durante l'inverno e stoccata in estate, il consumo energetico della pompa di calore e le emissioni di CO₂ e NO_x. Tutte le attività preliminari sono descritte in dettaglio nel Rapporto tecnico “Studio preliminare di fattibilità e dimensionamento di massima di un impianto geotermico sperimentale a bassa entalpia integrato con pompa di calore” (RT/2023/2/ENEA).

La fase realizzativa condotta nel secondo anno ha comportato l'esecuzione di cinque pozzi, di differente lunghezza (85 m, 70 m, 50 m, 35 m), e l'installazione – in quattro di essi – di sonde geotermiche verticali. L'ubicazione dei pozzi, la loro denominazione e distanza reciproca sono riportate in Figura 1.

I pozzi 1, 2, 3 e 4 sono stati attrezzati con le sonde geotermiche verticali a circuito chiuso, in configurazione a doppia U. L'attuale pozzo 5 inizialmente doveva essere il pozzo 4: ma mentre era in corso la trivellazione, alla profondità di 30 m, per una manovra errata dell'addetto alla perforazione, si è verificata la perdita del martello a fondo foro. Poiché le operazioni di recupero del martello non sono andate a buon fine, non è stato possibile proseguire la perforazione ma anzi si è reso necessario abbandonare il pozzo. Pertanto, in questo pozzo (rinominato pozzo 5) si è deciso di non posizionare le sonde geotermiche ma soltanto il cavo della fibra ottica, fino alla profondità di 26 m, direttamente annegato nella malta cementizia di riempimento del foro. In questo modo, le misure fornite dalla fibra ottica saranno il valore reale delle temperature corrispondenti ai litotipi attraversati alle diverse profondità, costituendo, pertanto, il riferimento per gli altri quattro pozzi, nei quali si risente l'effetto del flusso all'interno delle sonde geotermiche.

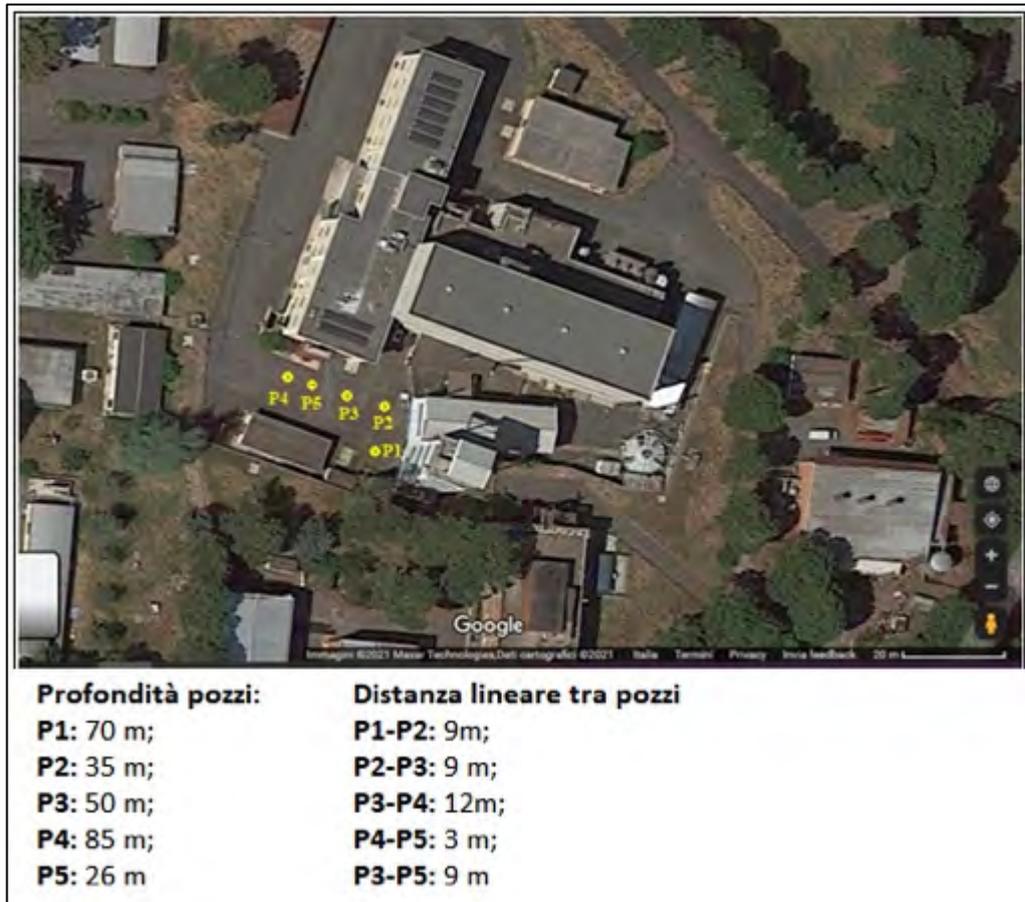


Figura 1: Ubicazione dei pozzi, loro denominazione e distanza reciproca

La perforazione del pozzo 1 è stata effettuata a carotaggio continuo fino alla profondità di 100 m, al fine di ricostruire l'assetto litostratigrafico locale. Tuttavia, le sonde geotermiche sono state inserite soltanto fino alla profondità di 70 m, per via dell'occlusione della parte più profonda del foro causata dallo sgrottamento delle sabbie. Nel pozzo 1 è stato anche effettuato il *Ground Response Test (GRT)*, della durata di 72 ore, per definire la conducibilità termica media dei terreni attraversati, la temperatura indisturbata del sottosuolo e la resistenza termica delle sonde geotermiche. Gli altri quattro pozzi sono stati effettuati a distruzione di nucleo.

Contestualmente alla messa in posa delle sonde geotermiche, nei quattro pozzi sono state inserite le fibre ottiche di tipo *Distributed Temperature Sensor (DTS)*, per acquisire la temperatura in maniera distribuita lungo l'intero pozzo con una risoluzione termica di 0,1 °C e una risoluzione spaziale di 2 metri. Le fibre ottiche sono state alloggiare all'interno di un tubicino di plastica, fissato con fascette in modo solidale sulla parete esterna di un ramo delle sonde geotermiche verticali. In questo modo sarà possibile monitorare l'andamento del campo termico tridimensionalmente nell'intorno dell'area occupata dalle geosonde, la sua evoluzione nell'arco delle stagioni, e non ultimo l'efficienza del sistema sonde-terreno

nel tempo. Sarà interessante capire se il terreno possa essere considerato come un serbatoio termico, e se il calore stoccato durante i mesi estivi possa accumularsi per essere utilizzato durante i mesi invernali.

1. TECNICHE DI PERFORAZIONE UTILIZZATE

Per la realizzazione dei pozzi sono state implementate differenti tecniche di perforazione utilizzando però sempre lo stesso macchinario, una perforatrice cingolata Beretta T44-GT (Figura 2), le cui componenti principali sono costituite da [1]:

- una torre di perforazione, dotata di binario e catena per l'avanzamento/sollevamento della testa. In cima alla torre è montato un argano per la movimentazione delle aste;
- una testa rotante, battente, ad azionamento idraulico, cui è collegata la batteria delle aste e la punta di perforazione;
- una coppia di ganasce, per la manovra delle aste e dei rivestimenti;
- un quadro di comando.



Figura 2: Perforatrice cingolata Beretta T44-GT

L'avanzamento della perforazione avviene per disgregazione meccanica della roccia, indotta da roto-percussione e da pressione sulla punta. Quando la testa rotante avanza fino a fine corsa, le aste vengono bloccate dall'operatore tramite una coppia di ganasce (Figura 3): la testa viene svitata dall'asta, si inserisce una nuova asta, si riavvita la testa sull'asta appena aggiunta e infine si riaprono le ganasce per riprendere la perforazione.



Figura 3: Avanzamento della testa rotante a fine corsa, coppia di ganasce per il blocco delle aste

Le aste, costituite da tubi di acciaio (Figura 4), subiscono il maggiore sforzo meccanico e hanno un diametro ridotto rispetto a quello del foro. Le aste utilizzate in questo sondaggio sono lunghe tre metri con diametro di 76 mm. Il pozzo 1 è stato effettuato a carotaggio continuo, utilizzando un carotiere del diametro di 101 mm (Figura 5). La perforazione è stata effettuata a circolazione diretta di fluido con vasca di recupero (Figura 6), pompando l'acqua all'interno delle aste di perforazione. Ciò allo scopo di raffreddare la batteria di aste, sostenere le pareti del foro ed evitare il contatto tra le falde **[1]**. Terminato il sondaggio geognostico in carotaggio continuo, il foro è stato alesato in circolazione d'acqua con un tricono (Figura 7) fino al diametro di 148 mm, così da essere predisposto all'installazione delle sonde geotermiche verticali.

Per lo scavo degli altri quattro pozzi si è utilizzata la perforazione ad aria compressa con martello a fondo foro (Figura 8). La rotazione è impressa dalla testa rotante della perforatrice mentre la percussione è azionata direttamente a fondo foro dalla stessa aria utilizzata per il raffreddamento del martello e per il trasporto dei detriti in superficie. Questa tecnica non consente di recuperare i campioni di terreno integri ma soltanto in frammenti: è un carotaggio "a distruzione di nucleo".

L'aria iniettata ad alta pressione consente la risalita dei detriti e la pulizia del foro. È una metodologia di perforazione adatta per avanzare rapidamente in terreni duri e compatti (lave e tufi litoidi), utilizzando acqua e aria miscelata a schiumogeno (Foamex TX): l'aria solleva i detriti, mentre la miscela di acqua e schiuma li trasferisce rapidamente in superficie.



Figura 4: Aste di perforazione



Figura 5: Carotiere per il recupero del materiale (carote)



Figura 6: Vasca di recupero dell'acqua di circolazione



Figura 7: Tricono utilizzato per l'alesatura del foro fino al diametro di 148 mm



Figura 8: Fasi di perforazione ad aria compressa, con acqua miscelata a schiumogeno, utilizzando il martello a fondo foro (foto a destra)

2. SONDE GEOTERMICHE VERTICALI

Le sonde geotermiche utilizzate in questo lavoro hanno andamento verticale e sono composte da una coppia di tubazioni a circuito chiuso, quindi con configurazione a doppia U (ovvero due tubi di mandata e due di ritorno).

Le tubazioni sono in polietilene ad alta densità – fornite in rotoli da 100 m, con diametro esterno di 32 mm – un materiale plastico maneggevole, flessibile e resistente alla corrosione (Figura 9). Il campo di utilizzo del polietilene è compreso tra -60 °C e 70 °C. Ha ottime caratteristiche meccaniche e di stabilità a lungo termine, e presenta una ridotta scabrezza interna a cui consegue una bassa resistenza idraulica. Nello specifico, sono state utilizzate tubazioni PN16, che presentano un ottimo compromesso tra resistenza meccanica e scambio termico.



Figura 9: Sonde geotermiche in polietilene PN16. In evidenza, il piede della sonda (foto a destra)

Il raccordo a U posto al fondo della sonda geotermica, tra la tubazione di mandata e quella di ritorno, prende il nome di piede della sonda (Figura 9). Al piede della sonda viene fissata una zavorra del peso di circa 40 kg (Figura 10), necessaria per contrastare la spinta di galleggiamento laddove il foro contenga acqua. Svolge inoltre la funzione di guida del piede, riducendo il rischio di impuntamento contro le pareti del foro lungo la discesa. Nel caso in studio, per rendere più agevole l'inserimento delle tubazioni nel foro si è provveduto a riempirle d'acqua, aumentandone in tal modo il peso.



Figura 10: In senso orario: peso zavorrato fissato al piede della sonda geotermica; inserimento nel pozzo; zavorra, con l'indicazione del diametro (38 mm) e del peso (43 kg)

Il pacchetto di tubi è stato mantenuto in posizione corretta, durante la discesa nel foro, con l'utilizzo di distanziali (Figura 11). Questi sono stampi in plastica, con quattro sedi laterali per le sonde e una centrale per il tubo di iniezione della malta cementizia. Sono ad incastro, e vengono fissati durante l'inserimento delle sonde nel foro. Nel nostro caso, si è scelto di utilizzare un distanziale per ogni metro di tubazione inserita.



Figura 11: Distanziale. Le sedi in posizione esterna sono gli alloggiamenti delle sonde, il foro centrale è riservato al tubo getto

Contestualmente alle sonde geotermiche è stato inserito il tubo getto in polietilene, a perdere, per l'iniezione della malta cementizia. Quest'ultima è costituita da una miscela di cemento e bentonite al 12%, che è stata iniettata dal fondo del foro. La bentonite riduce la permeabilità della miscela, permette l'isolamento dalle acque e conferisce elevata elasticità al cemento, per una minore fessurazione durante il "tiraggio" (Figura 12).

In letteratura, la conducibilità della miscela cementizia è di 1,2 W/mK; tale valore è uguale alla conducibilità termica media dei terreni calcolata con il GRT, effettuato sul pozzo 1.



Figura 12: Cementazione del foro con malta cementizia. Il tubicino bianco, di minor diametro, che si vede in entrambe le foto, contiene la fibra ottica. Il tubo isolato dagli altri, che nella foto a sinistra è tenuto dall'operatore, è il tubo getto

In superficie, ogni coppia di sonde geotermiche provenienti da ciascun pozzo (16 tubi in totale) è stata incanalata entro moduli prefabbricati in cemento (35 x 35 cm), opportunamente disposti in trincee fino al sito prescelto per l'installazione del collettore modulare. Nelle trincee, dentro tubi corrugati di protezione, corrono anche i fasci delle fibre ottiche provenienti dai cinque pozzi fino alla sala controllo (Figura 13).

Ogni pozzo in superficie termina con un pozzetto carrabile. Per garantire l'impermeabilizzazione delle trincee si è deciso di avvolgere tubi e corrugati con geotessile, e quindi di riempire gli spazi residui con cemento. Gli ultimi centimetri, fino al livellamento con il piano stradale, sono stati asfaltati.



Figura 13: In senso orario: vista dall'alto del campo geosonde; trincee orizzontali, contenenti le sonde geotermiche e i corrugati a protezione delle fibre ottiche; locale sala controllo: sulla sinistra arrivo delle sonde geotermiche, sulla destra della porta si vede il punto di ingresso dei corrugati; particolare dei quattro fasci di tubazioni provenienti dai pozzi

3. SONDAGGIO GEOGNOSTICO E RICOSTRUZIONE DELLA SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA

La litostratigrafia locale è stata ricostruita con il sondaggio geognostico effettuato nel pozzo 1 fino alla profondità di 100 m. Il sondaggio ha attraversato la successione vulcanica sabatina, caratterizzata da alternanze di tufi, da terrosi a litoidi, e lave tefritico-fonolitiche, da fratturate (parte alta) a compatte (parte bassa). Quindi, dopo aver oltrepassato la Formazione dei tufi varicolori di Sacrofano (base della successione sabatina), la parte finale del carotaggio ha intercettato alcuni lembi della serie sedimentaria continentale appartenente al “Galeriano” (sabbie limose) prima di intestarsi nelle argille plio-pleistoceniche di origine marina. Tutte le carote provenienti dal sondaggio geognostico sono state conservate in cassette catalogatrici (Figura 14).

Il livello di falda si attesta intorno a 114 m s.l.m. (a 34 m di profondità dal p.c.), alla base delle lave tefritico-fonolitiche. La temperatura, misurata con termofreatimetro, è circa 17 °C, in buon accordo con il valore medio all’equilibrio del terreno indisturbato, registrato nello stesso pozzo 1 alla profondità di 70 m durante il GRT, pari a 17,67 °C.



Figura 14: Carote provenienti dal sondaggio geognostico conservate nelle cassette catalogatrici (0-20 m) (segue)



Figura 14: Carote provenienti dal sondaggio geognostico conservate nelle cassette catalogatrici (20-60 m) (segue)



Figura 14: Carote provenienti dal sondaggio geognostico conservate nelle cassette catalogatrici (60-95 m)

La successione litostratigrafica ricostruita con il sondaggio geognostico è descritta di seguito, partendo dai termini più antichi fino ai più recenti (Figura 15):

- **substrato prevulcanico (da 47 a 64,5 m s.l.m.; da 82,5 a 100 m)**, costituito da:
argille limose: spessore 6,5 m. Consistenti, debolmente plastiche, di colore

prevalentemente grigio-verdastro, subordinatamente marrone chiaro e avana. Tra 95,30 e 96,60 m presenza di materiale organico vegetale nerastro;

sabbie limose: spessore 11 m. Incoerenti, di colore da marrone-giallastro a grigio.

Questi sedimenti sono riconducibili ad un ambiente deposizionale costiero con frequenti passaggi a facies di laguna, evolutosi tra il Pliocene superiore e il Pleistocene inferiore;

- **tufi varicolori di Sacrofano (da 64,5 a 76 m s.l.m.; da 71 a 82,5 m)**: spessore 11,5 m. Aspetto incoerente, di colore variabile da rossastro a marrone chiaro. Sono costituiti da cenere grossolana, subordinatamente fine, con diffusi lapilli e pomici gialle spesso organizzati in livelli a diversa granulometria, con spessore da centimetrico a decimetrico, livelli vulcano-clastici rimaneggiati. Diffusi i cristalli di leucite alterata in analcime e frammenti di cristalli di pirosseno. I primi metri della successione vulcanica sono caratterizzati dalla presenza di epivulcaniti, costituite da ceneri vulcaniche fini e limi argillosi con minerali vulcanici;
- **tufo rosso a scorie nere (da 76 a 92 m s.l.m.; da 55 a 71 m)**: spessore 16 m. Costituito da lapilli e pomici nere immerse in matrice cineritica grossolana, poco coerente di colore da giallo a marrone-rossastro;
- **tufo superiore (da 92 a 104 m s.l.m.; da 43 a 55 m)**: spessore 12 m. Si presenta di colore marrone scuro con lapilli e scorie, presenza di bombe vulcaniche. Nella parte alta diventa di colore rossastro, ricco di materiali femici e presenza di lapilli. Nel complesso è caratterizzato da un'alternanza di strati e lenti di natura eterogenea, costituito in prevalenza da materiale vulcanico di origine piroclastica. Presenti frequenti ed improvvisi passaggi verticali e laterali tra un litotipo e l'altro, il che conferisce una certa complessità anche dal punto di vista della circolazione delle acque sotterranee. La parte bassa di questa unità è correlabile con i "Tufi stratificati varicolori de' La Storta", mentre non è da escludere che le facies granulari stratificate talora presenti al tetto dell'unità possano essere attribuite a fasi idromagmatiche successive;
- **tufi granulari (da 104 a 110,5 m s.l.m.; da 36,5 a 43 m)**: spessore 6,5 m. Colore da grigio a verdastro argillificato, organizzato in livelli a diversa granulometria, dai lapilli alla cenere grossolana e, subordinatamente, fine. All'interno di questo litotipo sono

riconoscibili abbondanti pomici gialle e scorie nere di piccole dimensioni;

- **pozzolane (da 110,5 a 113,5 m s.l.m.; da 33,5 a 36,5 m):** spessore 3 m. Pozzolane di colore marrone scuro, da grossolane a fini con lapilli e piccoli livelli di litoidi nerastri (0,5-1 cm);
- **lave leucititiche (da 113,5 a 124,5 m s.l.m.; da 22,5 a 33,5 m)** (Figura 16): spessore 11 m. Alla base lave leucititiche di colore grigio a frattura concoide. La parte alta si presenta maggiormente fratturata, con evidenti depositi di ferro e manganese. Presenti concrezioni cristalline da circolazione di acque. Alla profondità di circa 29 m dal p.c. risulta molto più compatta e meno fratturata. Presenti piccoli livelli intermedi di piroclastiti di colore marrone a granulometria media;
- **piroclastiti (da 124,5 a 130 m s.l.m.; da 17 a 22,5 m):** spessore 5,5 m. Alla base è presente un livello litoide di pozzolane cementate di colore verdastro, con inclusi di leucite. Piroclastite granulare e di colore nerastra, con lapilli e rare bombe laviche in matrice di cenere grossolana. Alla profondità di 20 m dal p.c. aumenta la granulometria e sono presenti lapilli e blocchi litoidi con cristalli di leucite;
- **tufi terrosi (da 130 a 146,5 m s.l.m.; da 0,50 a 17 m):** spessore 16,5 m. Nella parte basale ha granulometria grossolana, colore marrone intenso con all'interno pomici giallastre e inclusioni lapidei coerenti. Frequenti scorie nere carboniose, presenza di argillificazione. Nella parte alta il tufo terroso è di colore da marrone a marrone chiaro a diversa granulometria, da mediamente grossolana passante a fine verso la base. Diffusi inclusi litici da 0,5 a 1,5 cm di diametro, presenza di leucite analcimizzata e di alterazione diffusa per argillificazione. Rari piccoli livelli cementati.

PROJECT INFORMATION		DRILLING INFORMATION	
PROGETTO	Campo Geotermico	MACCHINA	Beretta
LOCALITA'	ENEA - Centro Ricerche	METODO	Carotaggio continuo
LAVORO	125-24-2021	DIAMETRO	101 mm
GEOLOGO	Geol. A. FABRIZI	PROF. TOTALE	100 m
IMPRESA	PERFOR SRL	QUOTA	147 m s.l.m.
DATA	15-02-2021		
NOTE: Materiale in 20 cassette catalog.		■ Campione indisturbato	□ Campione rimaneggiato
		▼ Livello freatico	Pag. 1 di 3

Prof. s.l.m.	Litologia	DESCRIZIONE	Piezometro	Falda
147				0
146		(147.00 - 146.50) Asfalto e riempimento costituito da massetto in cemento.		-1
145				-2
144		(146.50 - 137.00) Tufo terroso da marrone a marrone chiaro a diversa granulometria al tetto mediamente grossolana passante a fine verso la base. Diffusi inclusi litici da 0.5 a 1.5 cm di diametro, presenza di leucite analcimizata, quindi presenza di alterazione diffusa per argillificazione. Rari piccoli livelli cementati.		-3
143				-4
142				-5
141				-6
140				-7
139				-8
138				-9
137				-10
136		(137.00 - 130.00) Tufo terroso di granulometria grossolana marrone intenso con interno pomice giallastre a granulometria grossolana con inclusi lapidei mediamente coerente, frequenti scorie nere carboniose presenza di argillificazione.		-11
135				-12
134				-13
133				-14
132				-15
131				-16
130				-17
129		(130.00 - 125.00) Piroclastite granulare nerastra, con lapilli e rare bombe laviche (18.80-19.00) in matrice di cenere grossolana alla profondità di 20.00 m aumento della granulometria e lapilli e blocchi litici con cristalli di leucite.		-18
128				-19
127				-20
126				-21
125		(125.00 - 124.50) Livello litoide di pozzolane cementate verdastre con inclusi leucitici. Probabile livello oggetto di cementazione per idrotermalismo??		-22
124				-23
123				-24
122		(124.50 - 113.50) Lave leucitiche grigie a frattura concoide, con cristalli traslucidi di leucite. La parte sommitale si presenta maggiormente fratturata con evidenti depositi di Ferro e Manganese e concrezioni di cristalli di sale per evidente circolazione di acque. Alla profondità di circa 29.00 m risulta molto più compatta e con minor fratturazione. Piccoli livelli intermedi piroclastici con granulometria media di colore marrone tra 23.50-23.70 e 25.50-25.70.		-25
121				-26
120				-27
119				-28
118				-29
117				-30
116				-31
115				-32
114				-33
113		(113.50 - 110.50)		-34

PROJECT INFORMATION		DRILLING INFORMATION	
PROGETTO	Campo Geotermico	MACCHINA	Beretta
LOCALITA'	ENEA - Centro Ricerche	METODO	Carotaggio continuo
LAVORO	125-24-2021	DIAMETRO	101 mm
GEOLOGO	Geol. A. FABRIZI	PROF. TOTALE	100 m
IMPRESA	PERFOR SRL	QUOTA	147 m s.l.m.
DATA	15-02-2021		

NOTE:
 Materiale in 20 cassette catalog.

■ Campione indisturbato □ Campione rimaneggiato
 ✕ Livello freatico

Pag. 1 di 3

Prof. s.l.m.	Litologia	DESCRIZIONE	Piezometro	Falda
112		Pozzolane di colore marrone scuro molto grossolane a fini con lapilli e piccoli livelli di 0.5-1 cm litoidi nerastri.		-35
111				-36
110		(110,50 - 104,00) Tufi granulari da grigio a verdastrì argillificati.....		-37
109				-38
108				-39
107				-40
106				-41
105				-42
104				-43
103		(104,00 - 95,20) Tufi rossastri ricchi di minerali femici e lapilli		-44
102				-45
101				-46
100				-47
99				-48
98				-49
97				-50
96				-51
95		(95,20 - 92,00) Tufi di colore marrone scuro con lapilli e scorie presenza di bombe vulcaniche.		-52
94				-53
93				-54
92		(92,00 - 76,00) Tufo rosso a scorie Nere		-55
91				-56
90				-57
89				-58
88				-59
87				-60
86				-61
85				-62
84				-63
83				-64
82				-65
81				-66
80				-67
79				-68

PROJECT INFORMATION		DRILLING INFORMATION	
PROGETTO	Campo Geotermico	MACCHINA	Beretta
LOCALITA'	ENEA - Centro Ricerche	METODO	Carotaggio continuo
LAVORO	125-24-2021	DIAMETRO	101 mm
GEOLOGO	Geol. A. FABRIZI	PROF. TOTALE	100 m
IMPRESA	PERFOR SRL	QUOTA	147 m s.l.m.
DATA	15-02-2021		
NOTE: Materiale in 20 cassette catalog.		■ Campione indisturbato	□ Campione rimaneggiato
		✎ Livello freatico	Pag. 1 di 3

Prof. s.l.m.	Litologia	DESCRIZIONE	Piezometro	Falda
78				-69
77				-70
76				-71
75		(76.00 - 64.50) Tufi Varicolori di Sacrofano grossolani, con colori variabili da rossastri a marrone chiaro. Presenza di piccole pomici giallastre.		-72
74				-73
73				-74
72				-75
71				-76
70				-77
69				-78
68				-79
67				-80
66				-81
65				-82
64		(64.50 - 53.50) Limi sabbiosi mediamente grossolani ma omogenei di colore avana-marroni con fiamme ocra. Origine continentale mediamente addensati. a 92.60 passaggio con granulometria decrescente verso le argille plio-pleistoceniche grigie di origine marina. I limi sfumano verso le argille con una sequenza quasi lineare.		-83
63				-84
62				-85
61				-86
60				-87
59				-88
58				-89
57				-90
56				-91
55				-92
54				-93
53		(53.50 - 47.00) Argille plio-pleistoceniche grigio verdastre omogenee e plastiche. livello organico vegetale nerastro tra 95.30 e 95.60		-94
52				-95
51				-96
50				-97
49				-98
48				-99
47				-100

Figura 15: Successione litostratigrafica del pozzo 1 ricostruita con il sondaggio geognostico



Figura 16: Lava leucitica tefritico-fonolitica

4. TEST DI RISPOSTA TERMICA

Il test di risposta termica GRT si effettua utilizzando una sonda geotermica ed è una prova di risposta del terreno a una sollecitazione termica, finalizzata a determinare alcune proprietà termiche del terreno, quali: a) temperatura indisturbata; b) conducibilità termica (λ); c) resistenza termica della sonda (R_b).

La prova va eseguita imponendo al sistema sonda geotermica-terreno, a mezzo di resistenze elettriche, un flusso termico controllato e costantemente misurato. La prova viene condotta su una sonda pilota che, al termine del test, sarà parte integrante del campo sonde previsto. In questo studio, la prova è stata effettuata sul pozzo 1.

Il test è stato effettuato per testare le sonde geotermiche (prova in pressione, test di flusso, misura della temperatura indisturbata del terreno). È stata utilizzata l'apparecchiatura portatile GEOgert 2.0, costituita da due moduli (Figure 17-18).

Il modulo di misura (Figura 17) comprende: a) un circuito idraulico, costituito da un circolatore e una serie di valvole di regolazione, intercettazione e sicurezza; b) un sistema di misurazione, costituito da due sonde di temperatura PT100 per il fluido, una sonda di temperatura PT100 per l'aria esterna, un misuratore di portata elettromagnetico e un trasmettitore di pressione piezoresistivo; c) un sistema di acquisizione e memorizzazione dati.



Figura 17: Strumentazione GEOgert 2.0 (modulo di misura)

Il secondo modulo (Figura 18) è specifico per l'esecuzione del GRT e comprende: a) un boiler dotato di tre resistenze elettriche (due da 3,5 kW e una da 1 kW); b) un circuito idraulico costituito da un circolatore, un vaso di espansione e una serie di valvole di intercettazione e sicurezza.



Figura 18: Vista d'insieme dei due moduli della strumentazione GEOgert 2.0

Di seguito si riporta il datasheet della macchina (Tabella 1) e le schede tecniche degli strumenti principali di misura (Tabella 2).

Datasheet minimale della macchina	
• Sonde:	Singola o doppia U, adattabile a sonde concentriche
• Diametri:	De25, De32, De40 e De50 mm, adattabile ad altri diametri
• Materiali:	Precaricati i dati relativi a HDPE PN16, HDPE PN10, HDPE-RC PN16; adattabile agli altri materiali
• Produttore sonda:	Indifferente
• Lunghezza sonde:	da 20 a 500 m di standard
• Massima pressione di test di tenuta:	16 bar
• Massima portata in GRT:	2300 l/h
• Potenza elettrica massima modulo GRT:	8 kW
• A/D converter:	24 bit
• Frequenza di campionamento:	da 2 secondi in su
• Precisione misura scambio termico:	1-3% a seconda della configurazione
• Procedure di misura automatizzate:	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pressione: ex SIA 384:6/2010; UNI 11467:2012; x legge Regione Lombardia ○ Flusso: UNI 11467:2012; ex SIA 384:6/2010 ○ GRT: UNI 11467:2012; ex legge Regione Lombardia
• Comunicazione tra i moduli:	wireless
• Comunicazione telefonica:	GSM con scheda SIM
• Allacciamento elettrico:	<ul style="list-style-type: none"> ○ Modulo 1: presa CEI 230 V 16A (industriale blu monofase) ○ Modulo 2: presa CEI 400 V 32A pentapolare (industriale rossa piccola 5 poli)

Tabella 1: Datasheet della macchina

Misuratore di portata elettromagnetico



Descrizione generale	Misuratore di portata elettromagnetico
Range temperatura ambiente	-40... +60°C
Range temperatura di stoccaggio	-50... +70°C
Pressione massima di esercizio	16 bar
Errore massimo di misura	± 0,2 % dal valore di misura + 1 mm/s

Sonda di temperatura



Descrizione generale	Sonda a immersione, a elevatissima precisione, per misura della temperatura
Tipo di sensore	RTD PT100 cl. 1/3 DIN
Range di temperatura	55/+110°C
Tempo di risposta (in liquido agitato)	≤ 10 sec.
Resistenza di isolamento	≥ 20MΩ
Risoluzione	< 0.01 °C

Trasmittitore di pressione



Valore di fondo scala (VFS)	25 bar, relativi
Sovrappressioni	90 bar, relativi
Precisione (% del VFS)	≤ 0,25
Calibrazione	Su punti limite secondo DIN 16086
Ripetibilità	≤ 0,15% VFS
Deriva termica	≤ 0,03%VFS/°C
Deriva annuale	≤ 0,2%VFS
Temperatura del fluido di processo	-25 ... +85 °C
Temperatura ambiente	-25 ... +85 °C
Temperatura stoccaggio	-25 ... +85 °C
Tempi di risposta (10...90%)	< 3 ms
Campo di temperatura compensato	0... +80°C
Sensore di misura	Piezoresistivo
Liquido di riempimento	Olio silconico

Tabella 2: Schede tecniche degli strumenti di misura

Il test è durato 72 ore, in accordo con le norme UNI – Geotermia 11467:2012 e SIA 384/6:2010, e ha permesso di misurare costantemente la potenza scambiata dalla sonda con il terreno. Inoltre, la prima fase di misurazione è stata condotta senza l'utilizzo delle termoresistenze, per registrare la temperatura media del terreno indisturbato e valutare l'influenza su di esso delle falde acquifere.

Misurata la potenza totale fornita al fluido termovettore attraverso le resistenze elettriche e la pompa, e note le temperature di ingresso e di uscita delle sonde, è stato possibile determinare il coefficiente di scambio termico per unità di lunghezza della sonda (W/mK).

Data la natura vulcanica dei terreni presenti nel sottosuolo, è stata stimata una capacità termica volumica pari a 2,6 MJ/(m³K).

Procedura di cantiere

La strumentazione per il test è stata posizionata in prossimità delle sonde verticali del pozzo 1. Si è provveduto a riempire il circuito con acqua e quindi sono stati connessi i tubi di raccordo della strumentazione con le due coppie di sonde geotermiche (Figura 19). Infine, è stata testata la connessione tra pc e datalogger per l'acquisizione a intervalli regolari di 17 secondi.

Per verificare il corretto funzionamento della sonda geotermica di prova è stata misurata la temperatura indisturbata del terreno ed effettuato un test di flusso. La temperatura di riferimento per il terreno è stata determinata mediante circolazione di acqua senza immissione di calore. Con la prova di tenuta idraulica è stata determinata la potenza massima della caldaia (7,5 kW_t), valore assunto simile al comportamento reale della pompa di calore. In seguito all'elaborazione dei dati, si osserva che la potenza termica realmente fornita al fluido è stata di 3,7 kW_t.

Il sistema fornisce al flusso una potenza termica costante e nota, e contemporaneamente registra le informazioni circa la temperatura del fluido stesso in ingresso e uscita dalla sonda geotermica. La macchina di prova utilizzata è dotata di tre resistenze che consentono di modulare la potenza elettrica del boiler, in modo da potersi adattare al meglio a sonde geotermiche di diversa lunghezza.



TIPO DI SONDA (4 tubi)	Opera U
PROFONDITA' [m]	70
DIAMETRO DEI TUBI [mm]	32
DIAMETRO PERFORAZIONE [mm]	180
MISCELA DI RIEMPIMENTO FORO	Cemento e Bentonite
DENSITA' GROUTING	Circa 1.500 Kg/m ³
DATA DI CEMENTAZIONE	22/02/2021

Figura 19: Apparecchiatura GE Oger 2.0 collegata alle sonde verticali del pozzo 1 e caratteristiche delle sonde

Basi teoriche

La differenza tra la temperatura in ingresso e in uscita dalla sonda dipende dallo scambio termico con il terreno, ovvero dalla conducibilità dei terreni attraversati, dal materiale di riempimento e dal materiale di cui è costituita la sonda. Viste le caratteristiche geometriche del sistema, il corpo emettitore di calore (il tubo riempito con il fluido termovettore) viene di norma assimilato a un filo di lunghezza infinita. In queste condizioni, il trasferimento di calore intorno alla sorgente avviene principalmente secondo la modalità radiale (ipotesi di sorgente termica lineare) ed è governato dall'equazione 1) [2], che riguarda l'evoluzione nel tempo della temperatura media del fluido circolante in sonda:

$$T_f(t) - T_m = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln(t) + Q \left[R_b^* + \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4a}{r_b^2}\right) - \gamma \right) \right] \quad 1)$$

Dove:

- $T_f(t)$: temperatura media del fluido in funzione del tempo t [°C];
- T_m : temperatura indisturbata del terreno [°C];
- t : tempo [s];
- Q : potenza termica lineare iniettata nella sonda [W/m];
- r_b : raggio della perforazione [m];
- a : diffusività termica del terreno [m²/s], calcolata come $\lambda / \rho \cdot C$, dove ρ è la densità [kg/m³] del suolo e C è la capacità termica massica [J/kg·K];
- γ : costante di Eulero, pari a 0,5772;

- λ : conducibilità termica del terreno [W/m·K];
- R^*_b : resistenza termica della perforazione [m·K/W].

È evidente come la temperatura del fluido dipenda linearmente dal logaritmo del tempo secondo un coefficiente angolare definito dal parametro ϕ , come da equazione 2) [4]:

$$\phi = \frac{Q}{4\pi\lambda} \quad 2)$$

Determinazione in situ delle variabili

Nell'equazione 1 tutte le grandezze sono determinabili in situ con semplici procedure, a parte le due incognite, che sono la conducibilità termica del terreno (λ) e la resistenza termica della sonda posata nel foro (R^*_b). Le altre variabili vengono determinate con la seguente procedura:

- $T_f(t)$: viene calcolata come media aritmetica istantanea tra la temperatura del fluido di ingresso e quella di uscita dalla sonda;
- T_m : viene stabilita all'inizio del test con la misura della temperatura indisturbata del terreno;
- a : è stimata sulla base di valori medi di conducibilità, densità e capacità termica riscontrabili in letteratura in base ai dati geologici del sito;
- Q : misurata tramite contatore, è l'energia elettrica consumata dalla resistenza del boiler.

Poiché l'onda termica si muove nel terreno con velocità molto bassa, sono stati esclusi i primi risultati ottenuti, in quanto imputabili al materiale di riempimento e non al terreno. Non essendo perfettamente nota la posizione delle tubazioni nel foro, si assume come tempo minimo significativo quello necessario affinché l'onda termica attraversi un percorso almeno pari al raggio del foro di perforazione. Tale tempo è espresso dalla relazione 3):

$$t > \frac{5r_b^2}{a} \quad 3)$$

Misurato l'andamento nel tempo delle temperature in ingresso e in uscita, e rappresentatolo sul piano logaritmico, è possibile determinare ϕ e p dall'equazione 4):

$$T_f(t) = \phi \ln(t) + p \quad 4)$$

Si utilizza il coefficiente ϕ per trovare il valore effettivo di conducibilità λ_{eff} tramite l'equazione 2). Il valore della conducibilità λ_{eff} consente di stimare la resistenza termica effettiva della sonda posata e cementata R_b^* , utilizzando la seguente relazione 5), ricavata dall'equazione 1):

$$R_b = \frac{1}{Q} (T_f - T_m) - \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln(t) + \ln\left(\frac{4\lambda}{r_b^2}\right) - \gamma \right) \quad 5)$$

Validità dei risultati

Il test, effettuato direttamente in situ, presenta due vantaggi fondamentali rispetto a un test condotto in laboratorio su campioni di terreno. Il primo consiste nella stima sul campo della resistenza termica della sonda; l'altro risiede nel fatto che i risultati contengono intrinsecamente l'influenza dell'acqua di falda, altrimenti impossibile da stimare. L'esistenza di una massa d'acqua nel terreno provoca, in presenza di calore, un moto convettivo che va a lambire le pareti della perforazione migliorando indubbiamente il coefficiente di scambio termico.

La velocità del flusso dell'acqua dipende principalmente dal gradiente idraulico e dalla conducibilità idraulica del suolo attraversato. La conducibilità termica calcolata con il test è quella effettiva della sonda; essa rappresenta il valore medio di conducibilità del terreno intorno al foro, includendo l'eventuale influenza delle falde acquifere, delle fratture nel sottosuolo, ecc.

La resistenza termica della sonda non dipende solo dai materiali utilizzati ma anche dalle condizioni di posa (disposizione dei tubi all'interno del foro, franamenti con conseguente aumento del diametro reale di perforazione, riempimento poroso o non completo). Pertanto, per tali ragioni si considera un fattore di sicurezza del 10% sui risultati.

4.1. Temperatura indisturbata del terreno

La misura della temperatura indisturbata del terreno viene eseguita facendo circolare il fluido termovettore all'interno della sonda senza attivare le resistenze elettriche. In tal modo l'acqua raggiunge l'equilibrio termico con i materiali circostanti portandosi circa alla stessa temperatura del terreno (Tabella 3).

Profilo di temperatura	
Durata totale della prova:	8,0 min
Tempo di campionamento:	2 s
Risultati circuito 1:	
Temperatura media discesa	17,39 °C
Temperatura media totale	17,58 °C
Risultati circuito 2:	
Temperatura media discesa	17,65 °C
Temperatura media totale	17,71 °C

Tabella 3: Misura della temperatura indisturbata nel pozzo 1

La Figura 20 mostra il profilo termico lungo la sonda costruito con i dati misurati in entrambe le coppie del pozzo 1.

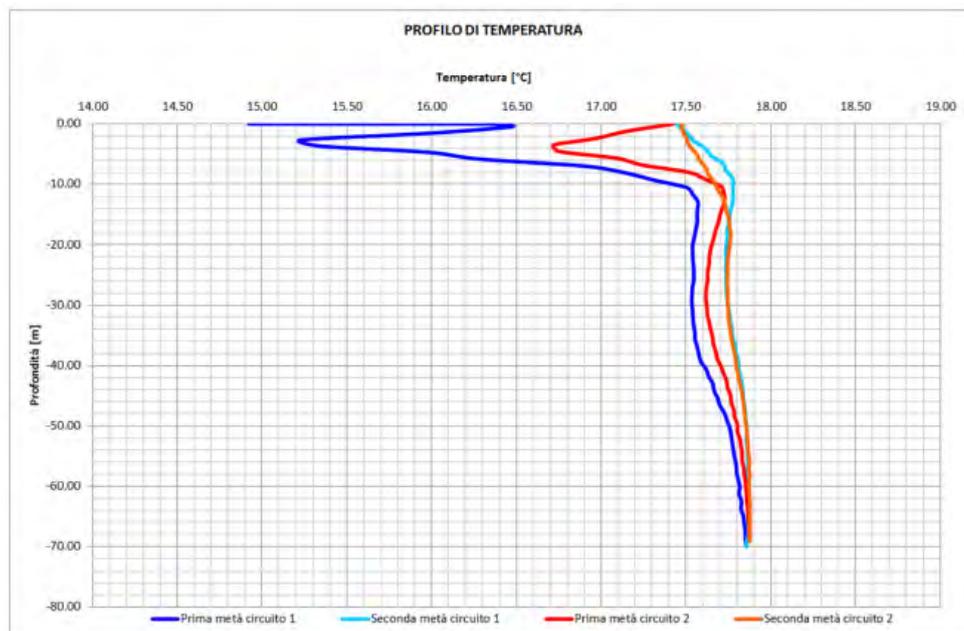


Figura 20: Profilo di temperatura nel circuito delle due sonde nel pozzo 1

Di seguito, si riporta l'andamento della temperatura indisturbata del terreno in funzione del tempo, determinata facendo circolare il fluido non riscaldato per 30 minuti nel circuito geosonde (Figura 21). La prova è durata in totale 6,7 minuti con frequenza di campionamento ogni 2 secondi.

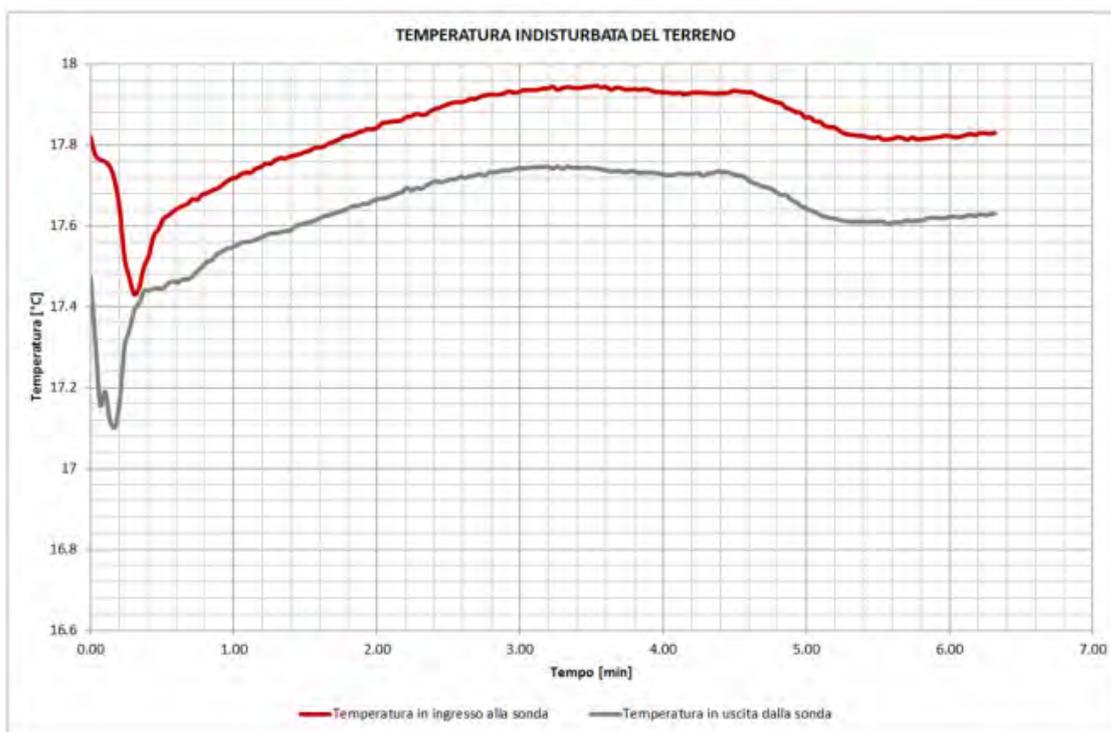


Figura 21: Andamento della temperatura indisturbata del terreno in funzione del tempo registrata all'interno della sonda

I risultati evidenziano una temperatura in ingresso pari a 17,85 °C e una temperatura in uscita di 17,67 °C.

Dall'analisi globale dei risultati, il valore che meglio rappresenta il livello termico del terreno è 17,67 °C. Questo sarà assunto come valore della temperatura indisturbata.

4.2. Prova di flusso

È una prova atta a verificare che il comportamento fluidodinamico del circuito idraulico installato corrisponda con quello valutato per via teorica. La presenza di ostruzioni o deformazioni che riducono la sezione di passaggio dei fluidi nel tubo comporta un disturbo al movimento maggiore del teorico; una profondità di posa inferiore alla dichiarata permette invece un più agevole passaggio del fluido. Attraverso la ricostruzione della curva caratteristica del circuito idraulico è possibile determinare con buona approssimazione la lunghezza reale delle tubazioni e accertare che la sezione di passaggio del fluido sia libera. A livello pratico il cuore del test, in accordo con le norme UNI 11467:2012 e SIA 384/6:2010, consiste nella misura della caduta di pressione della singola U della sonda in condizioni di flusso costante. La misura viene ripetuta per diversi gradini di portata e i dati acquisiti vengono confrontati con quelli attesi a livello teorico per il tipo di tubo in esame (con riferimento ai grafici dettagliati nella norma SIA). Se ne ricava anche una stima di lunghezza della sonda, che viene confrontata con il valore inserito dall'utente ad inizio acquisizione: se

le differenze sono eccessive, lo strumento segnala la presenza di criticità. I dati elaborati dalla prova di flusso sono riportati in Tabella 4.

Gradino di portata	200 l/h
Portata minima di prova	400 l/h
<u>Risultati circuito 1:</u>	
Durata della prova sul circuito 1	circa 4.0 Min
Numero di misure effettuate	4
Lunghezza media del circuito	74 m
Esito della Prova (norma SIA)	Corrispondenza: 100%
<u>Risultati circuito 2:</u>	
Durata della prova sul circuito 1	circa 4.0 Min
Numero di misure effettuate	4
Lunghezza media del circuito	72 m
Esito della Prova (norma SIA)	Corrispondenza: 100%

Tabella 4: Dati elaborati dalla prova di flusso

I risultati della prova indicano che la sonda geotermica di prova è stata installata correttamente e non vi sono ostruzioni o deformazioni che riducono la sezione di passaggio dei fluidi nel tubo (Figura 22). Considerando i valori di precisione strumentale, la lunghezza dichiarata della sonda geotermica di prova posata (70 m) è stata verificata. L'esito della prova ha mostrato una corrispondenza al 100% per la norma SIA.

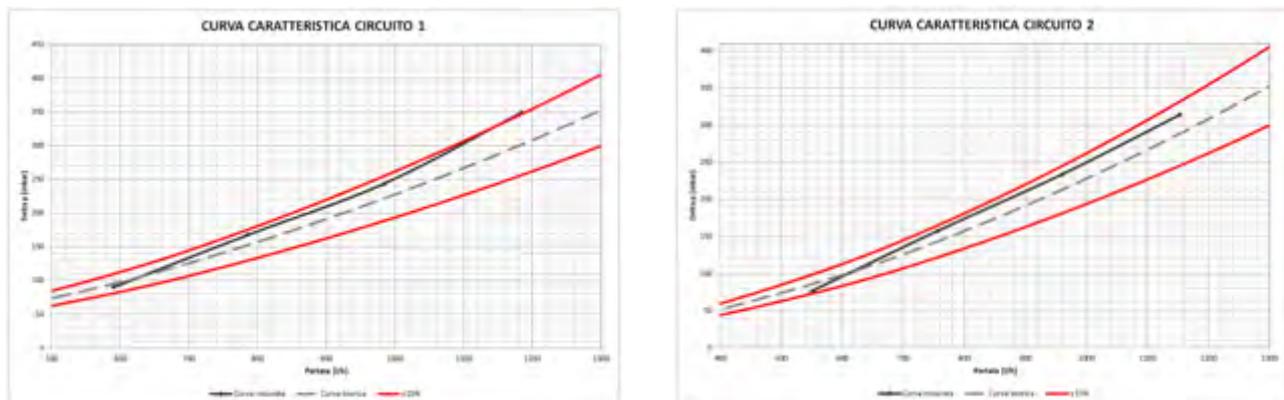


Figura 22: Curva caratteristica nei due circuiti

4.3. Risultati GRT

La prova si è svolta dal 12 al 15 aprile 2021 ed è durata 72h 06' 39". Sono stati considerati i seguenti parametri:

- Potenza elettrica impostata a quadro: 7,5 kW;
- Potenza media reale fornita: 6,7 kW;
- Potenza minima reale fornita: 5,9 kW;

- Potenza massima reale fornita: 6,9 kW;
- Tempo minimo significativo: 4,81 h;
- Portata media: 1.234 L/h.

L'andamento calcolato delle temperature del fluido nella sonda, in funzione del tempo, mostra una regolarità (Figura 23).

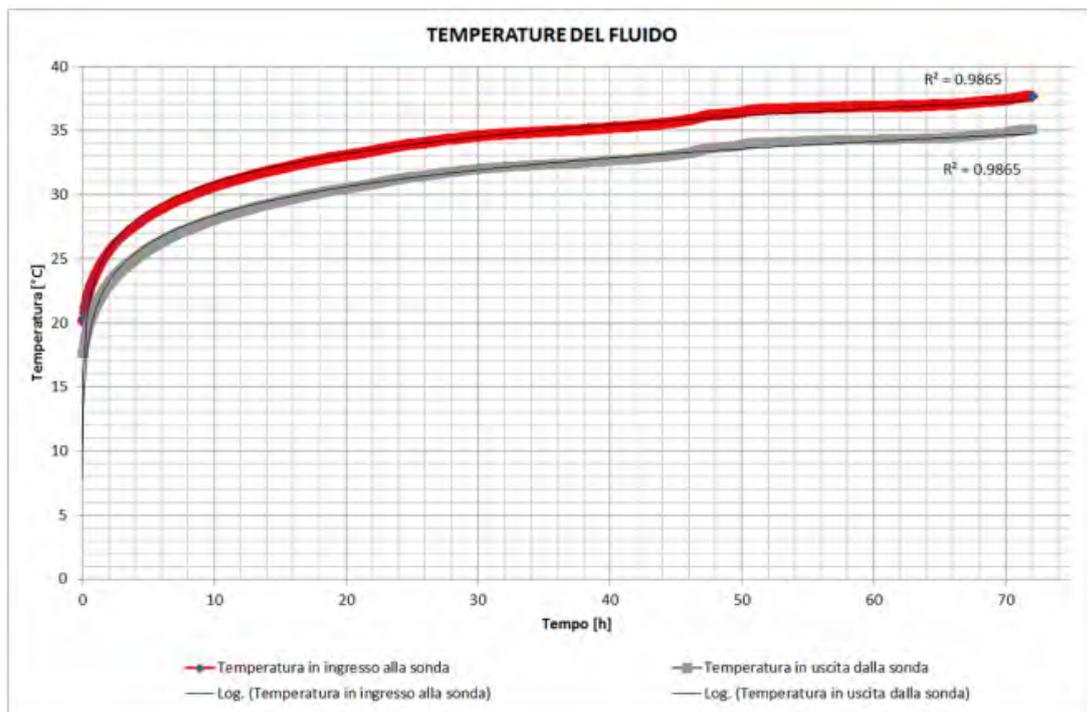


Figura 23: Andamento delle temperature del fluido nella sonda in funzione del tempo

L'andamento medio della temperatura in funzione del logaritmo del tempo, per il calcolo della conducibilità termica del terreno, è regolare. L'indice di dispersione è contenuto, come si nota dal coefficiente di determinazione ($R^2 = 0,9774$), che indica un buon grado di corrispondenza tra i valori reali e quelli stimati della linea di tendenza (Figura 24).

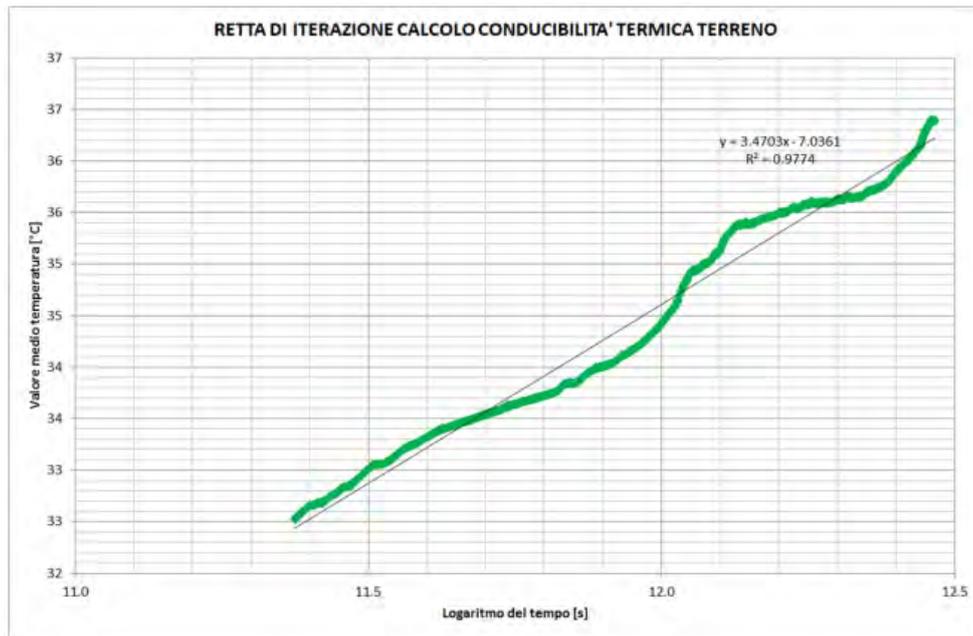


Figura 24: Retta di iterazione per il calcolo della conducibilità termica del terreno

Per quanto riguarda il calcolo della conducibilità termica del terreno, a parte il primo tratto caratterizzato da oscillazioni iniziali, nella seconda parte della prova l'andamento termico tende a stabilizzarsi intorno al valore di 1,21 W/m·K (Figura 25).

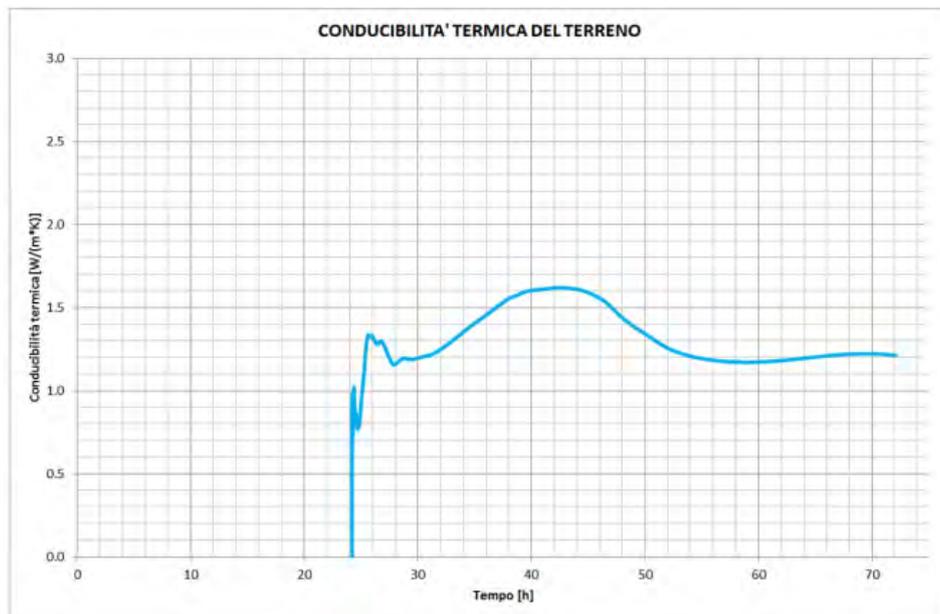


Figura 25: Andamento della conducibilità termica del terreno

È stato calcolato il valore della resistenza termica della sonda (R^*_b) pari a 0,1204 m·K/W, con un minimo di 0,1151 m·K/W e un massimo di 0,1268 m·K/W (Figura 26). Il valore della resistenza termica della sonda posata dipende da fattori legati alla realizzazione della perforazione, al suo diametro finale e al materiale che circonda la sonda stessa (cemento e

bentonite). Tale valore è relativamente basso, tipico delle sonde geotermiche realizzate con la malta utilizzata in questo lavoro, testimoniando la buona messa in opera della sonda geotermica e l'assenza di eccessivi sgrottamenti e irregolarità del diametro della perforazione eseguita.



Figura 26: Andamento della resistenza termica della sonda nel pozzo 1

5. FIBRE OTTICHE DTS INSTALLATE NEI POZZI

L'utilizzo delle fibre ottiche come sensori e sistemi di misura costituisce una tecnologia in forte sviluppo, grazie alla loro versatilità. Le fibre ottiche, infatti, possono misurare grandezze diverse a seconda di come vengono trattate.

Le fibre ottiche applicate al caso studio permettono di conoscere il profilo termico verticale del sottosuolo. Il sistema DTS, il più adatto per ottenere questo tipo di informazione, acquisisce per effetto Raman. I valori di temperatura vengono rilevati in modo distribuito lungo tutta la fibra, con una risoluzione spaziale fino a 1 m e una risoluzione termica di 0,1 °C.

Nello specifico, la fibra installata è la DiTeSt *Ordinary Temperature Sensing Cable*, prodotta dalla Smartec SA (Figura 27). Queste fibre hanno una guaina esterna in poliammide e l'anima in acciaio 316 L. All'interno di ogni cavo si trovano quattro fibre ottiche utilizzabili per le misure, ognuna di 9 µm. Il range di temperatura operativa di questo modello è compreso tra -40 e 85 °C. Il tubo centrale è sigillato ermeticamente e contiene quattro fibre insensibili alla piegatura, con un rivestimento in acrilato a doppio strato per aumentare le prestazioni di micropiegatura. Inoltre, offre elevata resistenza alla trazione e allo schiacciamento, impermeabilità laterale, resistenza chimica e all'abrasione ed eccellente protezione dai roditori.



Figura 27: Fibra ottica DiTeSt *Ordinary Temperature Sensing Cable* (Smartec SA)

Nelle tabelle seguenti (Tabelle 5-7) sono riportati i range di temperatura, i dati tecnici e le caratteristiche delle fibre installate.

Temperature range	
Operating temperature:	-40 °C to +85 °C
Storage temperature:	-40 °C to +85 °C
Installation temperature:	-10 °C to +50 °C
Short-term temperature (max 1 h):	-50°C to +150°C

Tabella 5: Range di temperatura della fibra ottica DiTeSt *Ordinary Temperature Sensing Cable* (Smartec SA)

Technical Data	
Outer diameter:	3.8 mm
Weight:	26 kg/km
Max crush resistance:	800 N/cm
Max tensile strength:	1300 N (installation)
Max tensile strength:	900 N (operation)
Min bending radius:	80 mm (with tensile)
Min bending radius:	60 mm (without tensile)
Hydrostatic pressure:	300 bar

Tabella 6: Dati tecnici della fibra ottica DiTeSt *Ordinary Temperature Sensing Cable* (Smartec SA)

Fiber Types	
Fiber support:	SMF 9 / 125 µm ITU-T G.652.D compliant
Fiber attenuation (cabled @ 20 °C):	≤ 0.36 dB @ 1310 nm ≤ 0.25 dB @ 1550 nm
Number of fiber:	4

Tabella 7: Caratteristiche della fibra ottica DiTeSt *Ordinary Temperature Sensing Cable* (Smartec SA)

Come accennato in precedenza, le fibre ottiche sono state inserite in ogni pozzo del campo geosonde all'interno di un tubicino, contestualmente alla messa in posa delle sonde geotermiche. Il tubicino è stato reso solidale a una sonda geotermica mediante una fascetta (Figura 28).



Figura 28: Assemblaggio del tubicino contenente la fibra ottica alle sonde geotermiche

Le fibre ottiche installate reagiscono alle variazioni di temperatura del sottosuolo, permettendo di acquisire i dati in maniera distribuita ogni due metri sulla verticale e rendendo così possibile la profilazione termica del sottosuolo alle diverse profondità. Oltre al cavo di fibra presente nei quattro pozzi, ne è stato impiantato un altro all'interno di un quinto pozzo, direttamente immerso nella malta cementizia, fino alla profondità di 26 m (pozzo 5, cfr introduzione). Il dato di temperatura rilevato in tale pozzo sarà riferito ai litotipi attraversati in funzione della profondità, e non risentirà degli scambi di calore tra sonda geotermica e terreno. Pertanto, questi dati saranno considerati di riferimento per stimare i delta di temperatura alle stesse profondità tra le due configurazioni.

Le fibre in superficie si raccordano nelle trincee orizzontali, insieme alle sonde geotermiche, e terminano nel patch panel posto all'interno della sala controllo (Figura 29). Dal patch panel partono i 5 cavi di fibre ottiche che arrivano alla centralina di acquisizione DiTemp Light. La centralina legge, interpreta e memorizza i dati misurati dai sensori di temperatura consentendo di effettuare calibrazioni periodiche. L'interfaccia utente permette di configurare il sistema, effettuare misure di temperatura, cambiare il range di misura, creare zone, impostare intervalli di acquisizione, avviare misure automatiche e memorizzare i dati provenienti dalle fibre ottiche in formato ASCII.

Lo scopo ultimo è il monitoraggio tridimensionale del campo termico nell'intorno dell'area occupata dalle sonde geotermiche, della sua evoluzione nell'arco delle stagioni, e non ultimo dell'efficienza del sistema sonde-terreno nel tempo. Sarà interessante capire se il terreno

possa essere considerato come un serbatoio termico, e se il calore stoccato durante i mesi estivi possa accumularsi per essere utilizzato durante i mesi invernali.

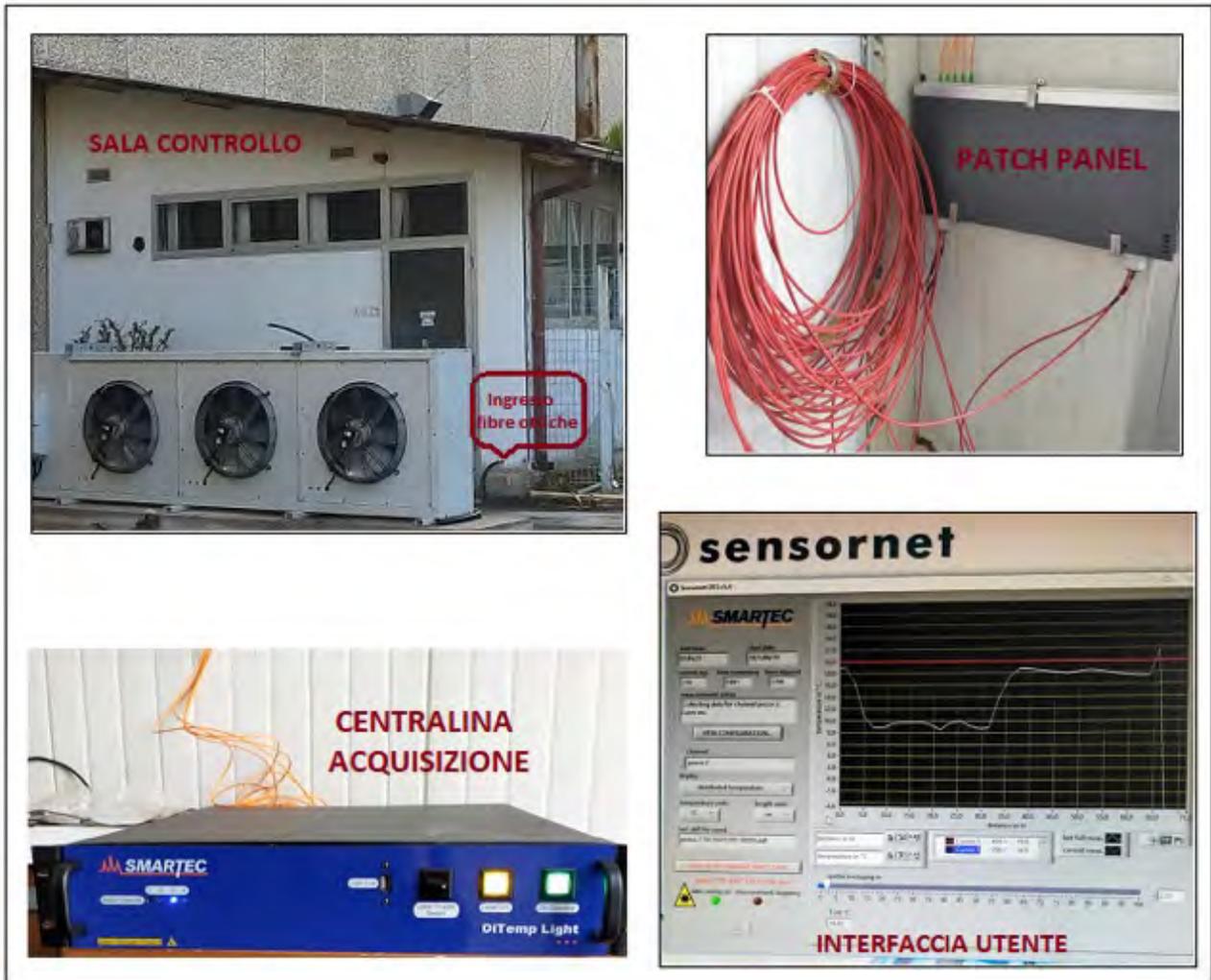


Figura 29: Sala controllo, patch panel, centralina di acquisizione DiTemp Light (Smartec) e interfaccia utente

6. CURVA CARATTERISTICA DEL CIRCUITO IDRAULICO

Il circuito idraulico è una rete di tubazioni in cui scorre un fluido in ricircolo. Il circuito è definito quindi dalle caratteristiche geometriche, dai materiali di costruzione delle tubazioni e dalle proprietà fisiche del fluido. Poiché il circuito è chiuso, per instaurare un moto è necessario l'ausilio di pompe o circolatori che contrastino le perdite di carico per attrito. I punti di derivazione o di confluenza prendono il nome di nodi, e le tratte di tubo comprese tra un nodo e un altro sono definiti rami.

La caratterizzazione del circuito dal punto di vista idraulico consiste nel definire il comportamento di ciascun tratto di tubo, in particolare come variano le perdite di carico in ciascun tratto di tubo in funzione della portata.

Ciascuna pompa ha una propria curva caratteristica di funzionamento che, come per il circuito, rappresenta la variazione della prevalenza (H) impressa al fluido con la portata (Q). Normalmente, il punto di funzionamento ottimale viene individuato graficamente (Figura 30): esso rappresenta l'intersezione tra la curva caratteristica del circuito e quella della pompa.

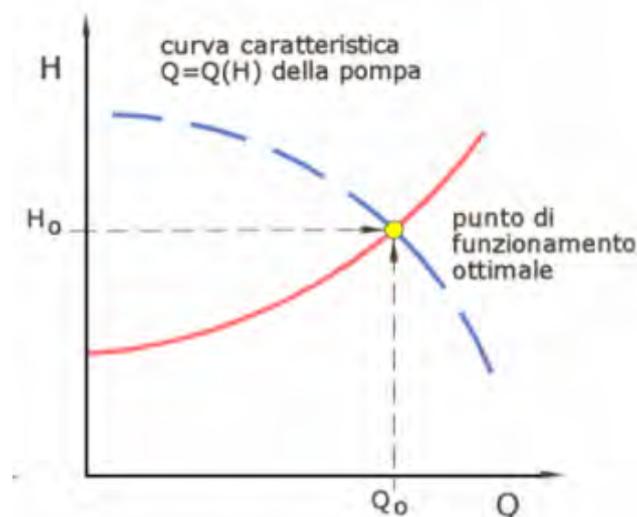


Figura 30: Determinazione grafica del punto di funzionamento ottimale

In presenza di un sistema ramificato di tubature è necessario imporre le seguenti condizioni di equilibrio, analoghe ai principi di Kirchhoff in elettrotecnica [3]:

- equazione di continuità al nodo: la somma delle portate in ingresso e in uscita da ciascun nodo deve essere nulla;
- equazione di equilibrio delle maglie: la somma delle perdite di carico di ciascuna maglia (ogni possibile tragitto chiuso) deve essere nulla.

Riguardo alle perdite di carico, queste rappresentano le perdite di pressione causate dagli

attriti che si oppongono al moto di un fluido. È possibile avere:

- attrito tra il fluido e la superficie della parete della tubazione. Si tratta di una perdita di carico continua, in quanto si manifesta lungo i tratti lineari dei condotti. Si definiscono perdite di carico distribuite;
- attrito legato all'interazione tra le particelle fluide per cambi repentini di direzione. Sono eventi localizzati ai punti della tubatura con geometria irregolare (curve, valvole, filtri, derivazioni, nodi). Si parla di perdite di carico concentrate.

Le perdite di carico totali sono date dalla somma delle perdite di carico concentrate e di quelle distribuite (Figura 31).

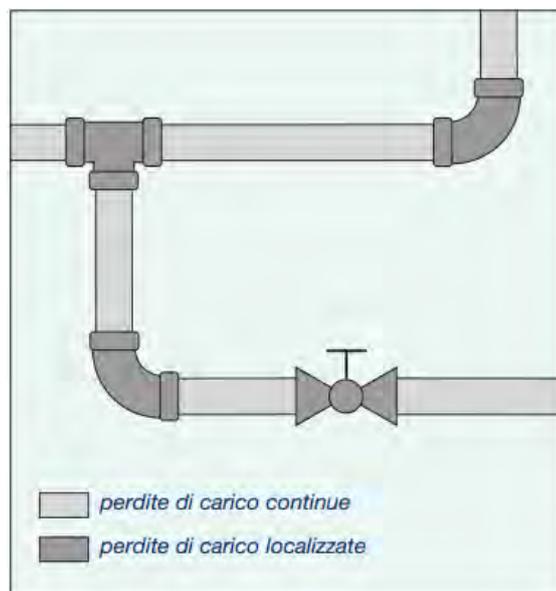


Figura 31: Schematizzazione delle perdite di carico continue e localizzate (da [5])

Determinazione della curva caratteristica del circuito: caso studio

Come già detto, le perforazioni hanno interessato la zona carrabile adiacente l'edificio F40. La distanza reciproca tra pozzo 1 e pozzo 2, e tra pozzo 2 e pozzo 3, è di 9 metri, e di 12 m tra pozzo 3 e pozzo 4. Il tratto dal punto di intersezione (pozzo 2) dei quattro pozzi, disposti a L, al collettore è di 13 m; e di ulteriori 5 m il percorso dal collettore alla pompa di calore/chiller (Figura 32).

Le due coppie (andata e ritorno) di ogni pozzo corrono parallelamente nelle canaline di raccordo fino alla postazione del collettore, che ospita i 16 tubi consentendo di monitorare ciascuna coppia di ogni pozzo.

Per il calcolo delle perdite di carico distribuite sono stati considerati i seguenti tratti:

- Tratto sonde - intersezione (pozzo 2);

- Tratto intersezione (pozzo 2) - collettore;
- Tratto collettore - chiller.

La portata del fluido inviato dalla pompa al circuito sonde è stata determinata come segue:

$$Q = \frac{W}{A_t \cdot c_s \cdot \varphi}$$

dove:

- W è la potenza termica di scambio fra terreno e sonda [W];
- A_t è la differenza di temperatura della soluzione fra ingresso e uscita nella sonda in estate e viceversa in inverno [°C];
- c_s è il calore specifico del fluido [J/kg·°C];
- φ è la densità del fluido [kg/m³].



Figura 32: Ubicazione pozzi geotermici, collettore e chiller e relative distanze reciproche

Dai valori riportati in Tabella 8, riferiti a una potenza richiesta di 13 kW, assunta una variazione di temperatura all'evaporatore pari a 3 °C, e considerando una miscela di acqua e glicole etilenico al 20% in peso, si determina una portata del fluido pari a 4 m³/h. Dato che la configurazione delle sonde (d_e 32 mm e d_i 26 mm) è a doppia U, la portata deve essere assunta pari alla metà, ossia 2 m³/h (0,555 l/s).

Potenza	[W]	13.000	
Δt evaporatore	[°C]	3	
Calore specifico c	[J/kg °C]	3820	GLICOLE
Densità fluido a 0 °C	[kg/m ³]	1035	ETILENICO

Tabella 8: Valori considerati per il calcolo della portata del fluido

La velocità (m/s) del flusso si determina come segue:

$$Q = 0,785 \cdot d^2 \cdot v$$

Per determinare il fattore di attrito λ , considerando il flusso turbolento, si applica la seguente formula:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \qquad Re = \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

Per ogni tratto considerato (Tabella 9 e 10), sono state determinate le perdite di carico distribuite come segue:

$$\Delta h = \lambda \cdot \varphi \left(\frac{L_{tubi}}{d} \right) \cdot \frac{v^2}{2}$$

Per il calcolo della portata nei quattro pozzi è stata considerata la lunghezza totale dei tubi (solo una coppia andata e ritorno), sia in foro che nel tratto orizzontale. Inoltre, la portata che arriva al punto di intersezione (pozzo 2), pari a 2 m³/h, è stata distribuita tra i quattro pozzi, tenendo conto della diversa profondità a cui sono state inserite le sonde geotermiche e le distanze orizzontali tra gli stessi. Chiaramente, questa simulazione di portata è stata fatta considerando i quattro pozzi contemporaneamente in esercizio.

Tratto collettore - Chiller	
lunghezza tubi totale (m)	5
diametro tubi (m)	0,026
portata (m ³ /h)	2
v (m/s)	1,05
λ	0,024
$\Delta h_{distribuite}$ (kPa)	2,66048

Tratto pozzo intersezione 2 - Collettore	
lunghezza tubi totale (m)	13
diametro tubi (m)	0,026
portata (m ³ /h)	2
v (m/s)	1,05
λ	0,024
$\Delta h_{distribuite}$ (kPa)	6,91725

Tabella 9: Alcuni parametri d'interesse nel tratto collettore - Chiller e pozzo intersezione 2 - Collettore

Tratto Pozzo 1 - Pozzo intersezione 2	
lunghezza tubi totale (m)	149
diametro tubi (m)	0,026
ρ (kg/m ³)	1035
μ (pa*s)	0,001
portata (m ³ /h)	0,43206
v (m/s)	0,22617
λ	0,035776
$\Delta h_{distribuite}$ (kPa)	5,42727

Tratto Pozzo 2 - Pozzo intersezione 2	
lunghezza tubi totale (m)	70
diametro tubi (m)	0,026
ρ (kg/m ³)	1035
μ (pa*s)	0,001
portata (m ³ /h)	0,66531
v (m/s)	0,34826
λ	0,032116
$\Delta h_{distribuite}$ (kPa)	5,42727

Tratto Pozzo 3 - Pozzo intersezione 2	
lunghezza tubi totale (m)	105
diametro tubi (m)	0,026
ρ (kg/m ³)	1035
μ (pa*s)	0,001
portata (m ³ /h)	0,52771
v (m/s)	0,27623
λ	0,034032
$\Delta h_{distribuite}$ (kPa)	5,42727

Tratto Pozzo 4 - Pozzo intersezione 2	
lunghezza tubi totale (m)	191
diametro tubi (m)	0,026
ρ (kg/m ³)	1035
μ (pa*s)	0,001
portata (m ³ /h)	0,37490
v (m/s)	0,19624
λ	0,037389
$\Delta h_{distribuite}$ (kPa)	5,28903

Tabella 10: Perdite di carico distribuite nei tratti pozzi (1-2-3-4) - pozzo intersezione 2

Le perdite di carico distribuite da ognuno dei quattro pozzi fino al chiller sono pari a 69,5 kPa (7,1 Hm).

Per il calcolo delle perdite di carico concentrate si ricorre alla seguente formula:

$$\Delta h_{concentrate} = \lambda \frac{L_e}{d} * \frac{v^2}{2}$$

da cui:

$$L_e = \frac{\xi}{\lambda} d$$

Poiché il rapporto $\frac{\xi}{\lambda}$ varia poco, si può ritenere indipendente dalla velocità del fluido. Le perdite di carico concentrate tra il collettore e il chiller sono nulle, in quanto non è presente alcun tipo di restrizione. Nel tratto tra il pozzo intersezione 2 e il collettore sono presenti 16 curve a 90°, ma determinano un valore nullo in termini di perdite di carico concentrate. Le perdite di carico concentrate per i quattro pozzi sono pari a 0, presentano solo 4 gomiti a 90° in corrispondenza di ogni pozzo. Pertanto, nel calcolo totale si considerano solo le perdite di carico imputabili al chiller. Nel caso specifico, per una macchina da 15 kW, dai

manuali delle case costruttrici è stato assunto un valore di perdita di carico concentrata pari a 23 kPa.

Pertanto, le perdite di carico totali ($\Delta h_{\text{distribuite}} + \Delta h_{\text{concentrate}}$), sommate al valore della prevalenza della pompa sono uguali a 92,5 kPa, ossia 9,4 Hm.

7. SISTEMA DI CONTROLLO E MONITORAGGIO DELL'IMPIANTO

L'impianto geotermico descritto in questo lavoro è stato concepito per scopi di ricerca scientifica al fine di caratterizzare l'evoluzione stagionale del campo termico. Durante la prima annualità, sono stati determinati i carichi di picco e i parametri legati alla pompa di calore per un'utenza di tipo ufficio di superficie pari a 140 m², ubicato nel comune di Roma (GG 1415), considerando 10 ore giornaliere di funzionamento dell'impianto (Tabella 11). Affinché il campo termico non subisca variazioni di temperatura, è necessario che la temperatura in uscita della pompa di calore sia mantenuta costante, circa 1 °C in inverno e circa 30 °C in estate per non apportare variazioni influenti che potrebbero compromettere la produttività nel tempo del campo termico.

	Riscaldamento	Raffrescamento
Carico di Picco richiesto (kW)	13.45	13.69
Potenza termica /frigorifera PdC (kW)	14.81	15.15
COP/EER	3.75	5.37
T ingresso PdC (°C)	5	23.6
T uscita PdC (°C)	1.04	30.04
Potenza Termica prelevata/riversata dal/al terreno (kW)	9.86	16.24
Fabbisogno energetico (kWh/a)	9522.6	6516.4
Fabbisogno Elettrico PdC (kWh/a)	2539.4	1213.5
h funzionamento	708	476

Tabella 11: Carichi termici e parametri legati alla pompa di calore

Lo schema funzionale dell'impianto è mostrato in Figura 33, mentre la Tabella 12 riporta l'elenco di tutti i materiali necessari. Le componenti di chiusura dell'impianto previste sono:

- due collettori (uno di mandata e uno di ritorno) a 8 diramazioni ciascuno, ognuno dei quali provvisto di sensori di pressione. Su ogni ramo di raccordo con le sonde geotermiche dovranno essere presenti sensori di temperatura di tipo PT100. Sul collettore di mandata, su ogni tubo, dovranno essere collocati i sensori di portata; viceversa, ai tubi in uscita dal collettore vanno installati dei regolatori di portata al fine di monitorare la stessa all'interno delle sonde geotermiche;
- un serbatoio di accumulo da 500 L, dotato di resistenze elettriche a immersione da

13 kW e di sensori per il monitoraggio della temperatura sia internamente che esternamente al serbatoio. È necessario, durante l'estate, riscaldare l'acqua prima dell'invio al circuito sonde, in quanto è previsto un salto termico di circa 7 °C, tra ingresso e uscita dal circuito;

- un chiller di potenza nominale frigorifera pari a 13 kW, dotato di elettropompa di circolazione da 2000 L/h (2 m³/h) e 100 kPa;
- un vaso di espansione PN5 bar da 24 L.

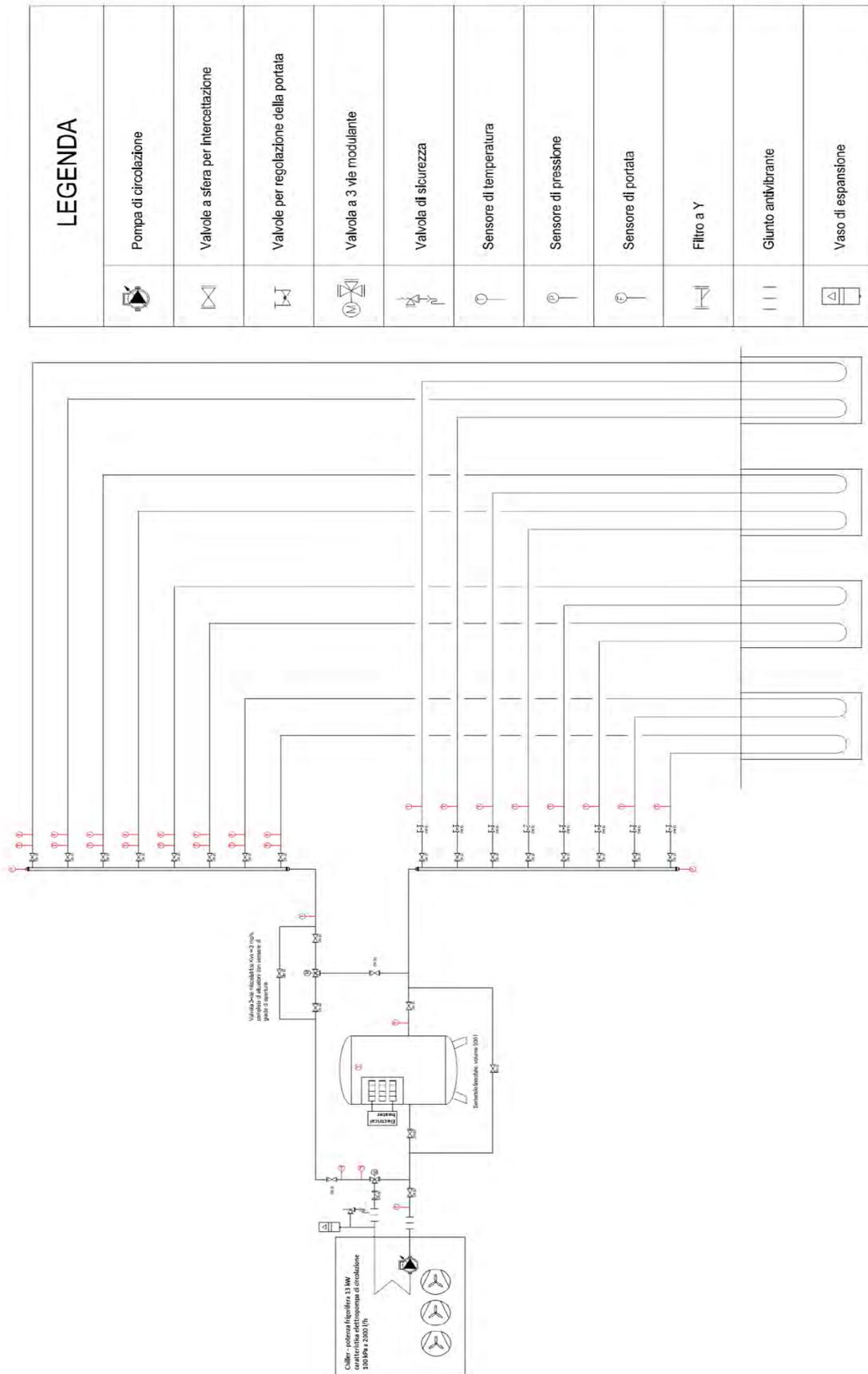


Figura 33: Schema funzionale dell'impianto

Descrizione	u.m.	q.tà
Chiller potenza nominale (EN 14511:2018) raffreddamento 13 kW	num	1
Serbatoio inerziale, volume 500 l	num	1
Collettore DN 65, ingresso di testa DN32, 8 diramazioni, connessione per manometro	num	2
Gruppo di carico acqua completo di filtro e riduttore di pressione	num	1
valvola di taratura Kvs = 4 mc/h	num	8
valvola a sfera DN 25	num	16
valvola a sfera DN 32	num	8
Filtro a Y DN 32	num	1
Giunti antivibranti DN 32	num	2
Valvola 3-vie miscelatrice Kvs = 3 mc/h, completa di attuatore con sensore di grado di apertura	num	2
Valvola di sicurezza DN15 PN 5 bar	num	1
Vaso di espansione PN 5 bar, 24 litri	num	1
Sensore di temperatura	num	21
Manometro, fondoscala 10 bar	num	2
Termometro	num	1
Sensore di portata, fondoscala 1000 l/h	num	8
Sensore di portata, fondoscala 3000 l/h	num	1
Resistenze elettriche ad immersione per serbatoi da 6 kW ciascuno, tipo GK 6,0 KW 1" ½ Ener Green, tensione alimentazione 230V	num	2
Resistenze elettriche ad immersione per serbatoi da 2,8 kW ciascuno, tipo GK 6,0 KW 1" ¼ Ener Green, tensione alimentazione 230V	num	1

Tabella 12: Elenco dei materiali necessari per l'impianto

8. CONCLUSIONI

Il campo geosonde è stato realizzato nel 2021, con l'installazione di sonde geotermiche a circuito chiuso e configurazione a doppia U in quattro fori (85, 70, 50 e 35 m) ad andamento verticale. I pozzi sono stati scavati nella zona adiacente l'edificio F40, presso il C.R. ENEA-Casaccia (RM). La stratigrafia locale è stata ricostruita grazie al sondaggio geognostico effettuato nel pozzo 1 fino alla profondità di 100 m. Il sondaggio ha attraversato la successione vulcanica sabatina, la serie sedimentaria continentale del "Galeriano" (sabbie limose) fino a intestarsi nella parte alta delle argille plio-pleistoceniche marine.

Nel pozzo 1 è stato condotto il test di risposta termica per definire la temperatura indisturbata, la conducibilità termica del terreno e la resistenza termica della sonda. La capacità termica volumica stimata per l'area in esame è $2,6 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, valore tipico per le litologie piroclastiche. La temperatura media del sottosuolo è $17,67 \text{ }^\circ\text{C}$: la zona in esame è caratterizzata da un alto termico per la prossimità di apparati vulcanici spenti. La conducibilità termica calcolata del terreno è $1,21 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. La resistività termica della sonda, indice della qualità dell'accoppiamento terreno-malta, è $0,1204 \text{ m} \cdot \text{K}/\text{W}$. Questo dato dipende da fattori legati alla realizzazione della perforazione, dal suo diametro finale (180 mm) e dal materiale che circonda la sonda stessa (cemento e bentonite); tale valore è relativamente basso, testimoniando la buona messa in opera della sonda geotermica e l'assenza di eccessivi sgrottamenti e irregolarità del diametro della perforazione eseguita.

Le perforazioni degli altri tre pozzi sono state eseguite a distruzione di nucleo. Un quarto foro, abbandonato dopo 30 m di perforazione, è stato utilizzato per ospitare un cavo di fibra ottica fino alla profondità di 26 m (pozzo 5), direttamente annegato nella malta cementizia di riempimento. Le temperature misurate nel pozzo 5 costituiranno il riferimento per gli altri quattro pozzi, nei quali si risente del flusso all'interno delle sonde geotermiche.

All'interno dei quattro pozzi le fibre ottiche di tipo DTS permetteranno di acquisire in maniera distribuita la temperatura nel pozzo con una risoluzione di temperatura fino a $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ e una risoluzione spaziale di due metri, al fine di monitorare il campo termico tridimensionalmente nell'intorno dell'area occupata dalle geosonde, la sua evoluzione nell'arco delle stagioni e l'efficienza del sistema sonde-terreno nel tempo.

In ultimo, sono stati determinati i parametri idraulici in termini di portata complessiva richiesta dall'impianto e di portata distribuita tra le sonde dei quattro pozzi, nonché le perdite di carico distribuite totali e concentrate, assumendo un andamento parallelo delle sonde fino al collettore.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Delmastro R, Noce G (2011). Manuale di geotermia a sonde verticali: Biblioteca Tecnica Hoepli, 516 pp., ISBN 978-88-203-4539-6
- [2] Claesson J, Eskilson P (1987). Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes”, Tesi di dottorato, Department of Mathematical Physics. University of Lund, Sweden
- [3] Basta S, Minchio F (2007). Geotermia e pompe di calore - Guida pratica agli impianti di climatizzazione. Ed. S. Basta, Verona
- [4] Eklöf C, Gehlin S (1996). TED - a mobile equipment for thermal response test. MSc-thesis 1996:198E, LuTH, 62 pp.
- [5] Caleffi. Idraulica. Le perdite di carico negli impianti. Il dimensionamento dei miscelatori, n. 28. Giugno 2005

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
dicembre 2023