

A.C. VIOLANTE, 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

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

**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



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

A.C. VIOLANTE, 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

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

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



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.

STUDIO PRELIMINARE DI FATTIBILITÀ E DIMENSIONAMENTO DI MASSIMA DI UN IMPIANTO GEOTERMICO SPERIMENTALE A BASSA ENTALPIA INTEGRATO CON POMPA DI CALORE

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

Riassunto

Questo Rapporto descrive le attività svolte durante la prima annualità del Piano Triennale di realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, riguardanti la linea di attività 1.7 denominata "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali".

Lo studio in oggetto è stato anzitutto indirizzato alla ricostruzione dell'assetto litologico-stratigrafico e idrogeologico dell'area del C.R. ENEA-Casaccia, attraverso il reperimento sistematico e la consultazione di tutti i dati di letteratura disponibili e delle stratigrafie dei sondaggi geognostici effettuati nel C.R. Casaccia. La valutazione geologica ha permesso inoltre di estrapolare il valore di conducibilità termica delle rocce presenti nell'area e di individuare il sito in cui insisterà il sistema di approvvigionamento del calore dal terreno, utilizzando sonde geotermiche verticali accoppiate a una pompa di calore (PdC) acqua-acqua. Successivamente, è stata condotta una simulazione dei carichi termici assumendo come target, per la sorgente terreno, la climatizzazione di un ufficio (con superficie di 140 m² circa, situato nell'edificio F40 del C.R. Casaccia, adiacente al campo geosonde). Tramite un software dedicato è stato possibile dimensionare le sonde inserendo i valori dei carichi di picco invernali ed estivi. Si prevede di realizzare 4 pozzi, profondi rispettivamente 35 m, 50 m, 80 m e 100 m. Il campo geosonde sarà dotato di un sistema di controllo mediante fibre ottiche impiantate direttamente all'interno dei tubi in polietilene, al fine di monitorare costantemente i valori termometrici all'interno di ogni pozzo e quindi definire il campo termico, la sua evoluzione nell'arco delle stagioni, e non ultimo l'efficienza del sistema sonde-terreno nel tempo. 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.

Parole chiave: Pompe di calore geotermiche, Sonde geotermiche verticali, Fibre ottiche, Dimensionamento impianto pilota, Usi diretti.

Abstract

This Report deals with the activities carried out during the first year 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".

First, this study was aimed at reconstructing the lithological-stratigraphic and hydrogeological structure of the area of the ENEA-Casaccia Research Centre, through the systematic retrieval and consultation of all the available literature data and the stratigraphies of the geognostic drillings carried out at the C.R. Casaccia. The geological assessment also allowed the extrapolation of the thermal conductivity value of the rocks in the area and to identify the site where the ground heat supply system will be installed, using vertical geothermal probes coupled with a water-water heat pump (HP). Subsequently, a simulation of thermal loads was conducted, assuming as the target, for the ground source, the air conditioning of an office (with a surface area of approximately 140 m², located in building F40 of C.R. Casaccia, adjacent to the geothermal probe field). Using dedicated software, it was possible to size the probes by entering the winter and summer peak load values. Four boreholes are planned: 35 m, 50 m, 80 m and 100 m deep, respectively. The geothermal probe field will be equipped with a control system using optical fibres implanted directly inside the polyethylene pipes, to constantly monitor the thermometric values inside each well and thus define the thermal field, its evolution over the seasons, and not least the efficiency of the probe-soil system over time. Finally, the value of the thermal power extracted in winter and stored in summer, the energy consumption of the HP and CO₂ and NO_x emissions were estimated.

Keywords: Ground source heat pump, Vertical closed loop, Optical fibres, Pilot plant design, Direct use.

Indice

INTRODUZIONE.....	7
1. LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI, GEOLOGICI E IDROGEOLOGICI DEL TERRITORIO IN ESAME.....	10
1.1 Successione stratigrafica da indagini pregresse.....	14
1.2 Ubicazione del campo geosonde e assetto litostratigrafico presunto.....	17
1.3 Inquadramento idrogeologico regionale.....	20
1.3.1 Circolazione idrica nel sottosuolo del C.R. ENEA-Casaccia.....	22
2. DIMENSIONAMENTO DI UN IMPIANTO GEOTERMICO A BASSA ENTALPIA INTEGRATO CON POMPA DI CALORE.....	26
2.1 Principi generali.....	26
2.2 Pompa di calore geotermica.....	30
2.3 Impatto dei sistemi geotermici closed loop.....	32
3. DIMENSIONAMENTO DELL'IMPIANTO GEOTERMICO DA REALIZZARE NEL C.R. CASACCIA.....	34
3.1 Considerazioni preliminari.....	34
3.2 Simulazione con il codice di calcolo.....	40
3.3 Costo dell'impianto e valutazione dell'investimento.....	50
4. CONCLUSIONI.....	54
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	56

INTRODUZIONE

Le fonti di energia rinnovabili (FER) – principalmente l'eolico, il solare, l'idroelettrico, l'energia geotermica, l'energia dai mari e dalle biomasse – rappresentano alternative ai combustibili fossili e contribuiscono a ridurre le emissioni di gas a effetto serra, a diversificare l'approvvigionamento energetico e a ridurre la dipendenza dai mercati del petrolio e del gas, storicamente poco affidabili come si può purtroppo vedere anche ai giorni nostri con la guerra in corso sul territorio ucraino.

Secondo la *International Energy Agency* [1] nel 2019 le rinnovabili, esclusi gli usi tradizionali delle biomasse, hanno soddisfatto soltanto l'11% (21,5 EJ) della domanda globale di calore. La produzione di calore da fonte geotermica contribuisce per lo 0,3%, di cui quasi il 60% è attribuibile alle pompe di calore accoppiate alla sorgente terreno (*Ground Source Heat Pump*, GSHP) [2].

Il settore termico gioca un ruolo importante nell'attuazione degli ambiziosi obiettivi fissati dal Green Deal europeo, che mira alla neutralità climatica entro il 2050 attraverso la decarbonizzazione del sistema energetico. A tale scopo, è importante dare priorità alla geotermia e alle altre fonti di riscaldamento rinnovabili, dal momento che l'energia termica costituisce oltre il 50% dell'energia consumata nell'Unione Europea (UE) e che il contributo delle rinnovabili si ferma al 19%. Oggi la maggior parte della domanda di energia per la climatizzazione degli edifici è soddisfatta dai combustibili fossili, specialmente nei paesi dell'Europa centrale e orientale. Proprio in questi paesi, ove sono concentrate le regioni carbonifere dell'UE, la geotermia potrebbe costituire un importante vettore per favorire la transizione energetica [3].

Il rapporto *EU coal regions: opportunities and challenges ahead* del JRC della Commissione europea evidenzia che le miniere chiuse e allagate presentano un buon potenziale per le risorse geotermiche a bassa entalpia, utilizzabile per impieghi termici come la climatizzazione [4]. Il potenziale geotermico delle miniere di carbone chiuse in Europa è stato valutato nell'ordine di diverse migliaia di megawatt termici, con una riduzione stimata delle emissioni di CO₂ – associate all'utilizzo delle miniere in luogo delle usuali tecnologie per la climatizzazione – pari a circa 5.000 tonnellate/anno. Tale prospettiva potrebbe rappresentare un'opportunità di sviluppo anche in Italia, specie in Sardegna, dove il bacino carbonifero del Sulcis è caratterizzato da interessanti temperature già a 1 km di profondità, se confrontate con le restanti aree carbonifere europee.

Per quanto riguarda la diffusione delle rinnovabili nel settore termico in Italia, il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) punta al coordinamento con gli strumenti per l'efficienza energetica; pertanto, saranno agevolati anche interventi di installazione di impianti geotermici a pompe di calore negli edifici, in sostituzione di impianti esistenti di climatizzazione invernale [5].

I sistemi per l'approvvigionamento del calore ad uso diretto, caratterizzati da una temperatura del serbatoio geotermico inferiore ai 90 °C, sono definiti a bassa entalpia. Per "uso diretto" del calore si intende una vasta gamma di applicazioni: climatizzazione degli ambienti, produzione di acqua calda sanitaria, usi termali, usi agricoli (riscaldamento delle serre, pastorizzazione di derivati dal latte, essiccazione e fermentazione di prodotti alimentari), acquacoltura e usi industriali. Tali sistemi possono essere utilizzati su gran parte del territorio italiano, in quanto è possibile sfruttare il gradiente geotermico già a partire dai 15 metri di profondità dal piano campagna. Pertanto, la risorsa geotermica a bassa entalpia può essere considerata una fonte di energia pulita, gratuita, rinnovabile e sicura nel tempo.

L'utilizzo della geotermia in abbinamento alle pompe di calore (PdC) costituisce a oggi il sistema di condizionamento più efficiente dal punto di vista energetico e più sostenibile dalla prospettiva ambientale. È da queste premesse che, nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale (Piano Triennale 2019-2021), con il Progetto "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali", WP3 "Sistemi complessi di pompe di calore integrate: Studio preliminare di applicabilità di sorgente geotermica a bassa entalpia ad un caso studio specifico", si intende realizzare presso il C.R. ENEA-Casaccia un impianto pilota che sfrutti questa fonte. La scelta di questo sito per la realizzazione dell'impianto pilota è supportata da una nutrita serie di studi pregressi che hanno evidenziato la presenza, nel sottosuolo della Casaccia, di calore a temperatura idonea per l'utilizzo geotermico.

L'obiettivo principale del progetto consiste nella realizzazione di un apparato sperimentale del tipo *Hardware in the Loop* (HiL), costituito da elementi innovativi ed equipaggiato con componentistica e logiche di gestione per applicazioni specifiche, quali per esempio lo sbrinamento della pompa di calore.

Particolare attenzione sarà rivolta alla sperimentazione su sezione di prova in scala rispetto a un'applicazione reale e i risultati saranno utilizzati ai fini della realizzazione di sistemi di accumulo innovativi dimensionati in funzione delle esigenze dell'utenza e per l'ottimizzazione del sistema. In questo contesto è previsto che l'apparato HiL sia dotato di

un sistema di captazione di energia termica dal terreno tramite l'impiego di sonde geotermiche verticali, ubicate a diversa profondità. Il numero delle sonde installate dipenderà dalle esigenze di carico termico richiesto e dalla destinazione di tale calore, se impiegato per il solo sbrinamento della PdC oppure per essere utilizzato in modo continuativo nell'arco delle stagioni da parte di un'utenza. Inoltre, un sistema di monitoraggio costituito da fibre ottiche di tipo DTS (*Distributed Temperature Sensors*), inserite contestualmente alla messa in posa delle sonde geotermiche nei quattro pozzi realizzati, permetterà di acquisire in maniera distribuita il profilo verticale della temperatura. Sarà così possibile ricostruire il campo termico su scala tridimensionale nell'intorno dell'area occupata dal campo geosonde, la sua evoluzione nell'arco delle stagioni, e non ultimo stimare l'efficienza del sistema sonde-terreno nel tempo.

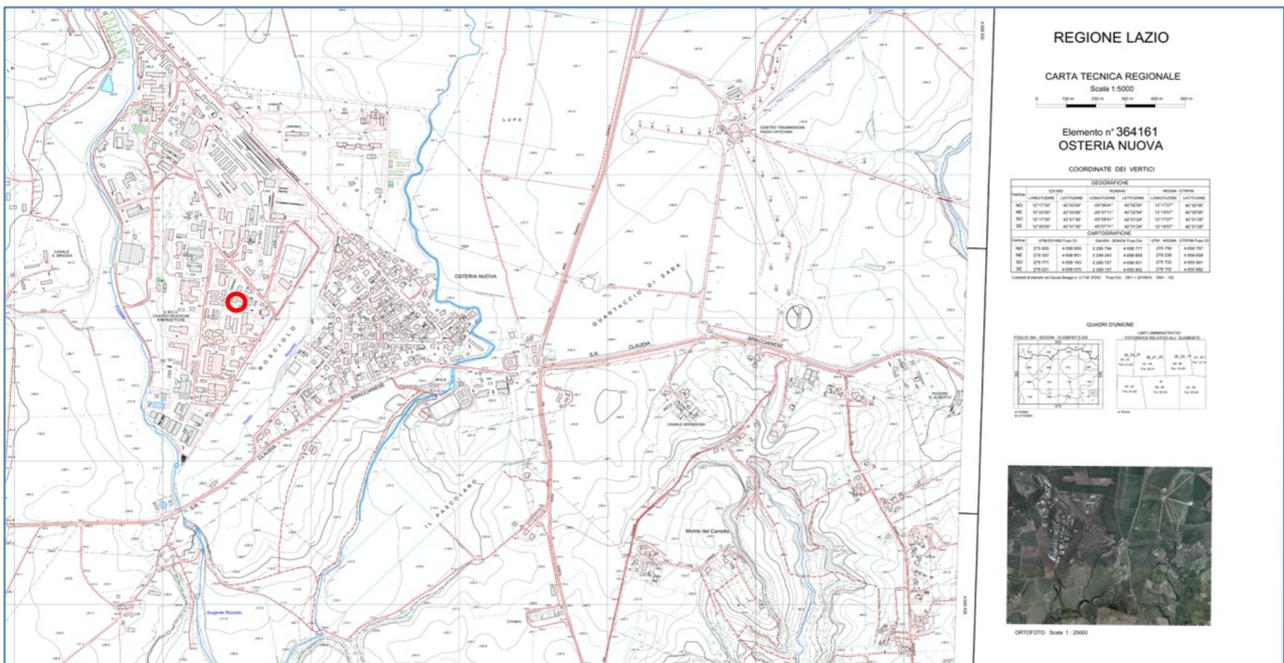


Figura 2: Foglio 364161 della Cartografia Tecnica Regionale del Lazio, in scala 1:5.000 (cerchietto rosso: ubicazione dell'area di studio)

L'area circostante il C.R. ENEA-Casaccia è caratterizzata dalla presenza di rocce vulcaniche appartenenti al Distretto Vulcanico Sabatino (DVS), attivo tra 600.000 e 40.000 anni fa ed esteso su una vasta area del Lazio centro-settentrionale [6]. I litotipi prevalenti, tufi, lave e pozzolane, sono stati emessi dall'attività eruttiva durante il Pleistocene medio, obliterando i terreni sedimentari del Pleistocene inferiore [7]. La formazione vulcanica presenta, complessivamente, una potenza di diverse centinaia di metri, con ispessimenti notevoli in corrispondenza delle paleovalli; in epoca post-vulcanica è stata interessata da processi erosivi che ne hanno ridotto lo spessore senza però consentire l'affioramento dei sottostanti terreni sedimentari (Figura 3).

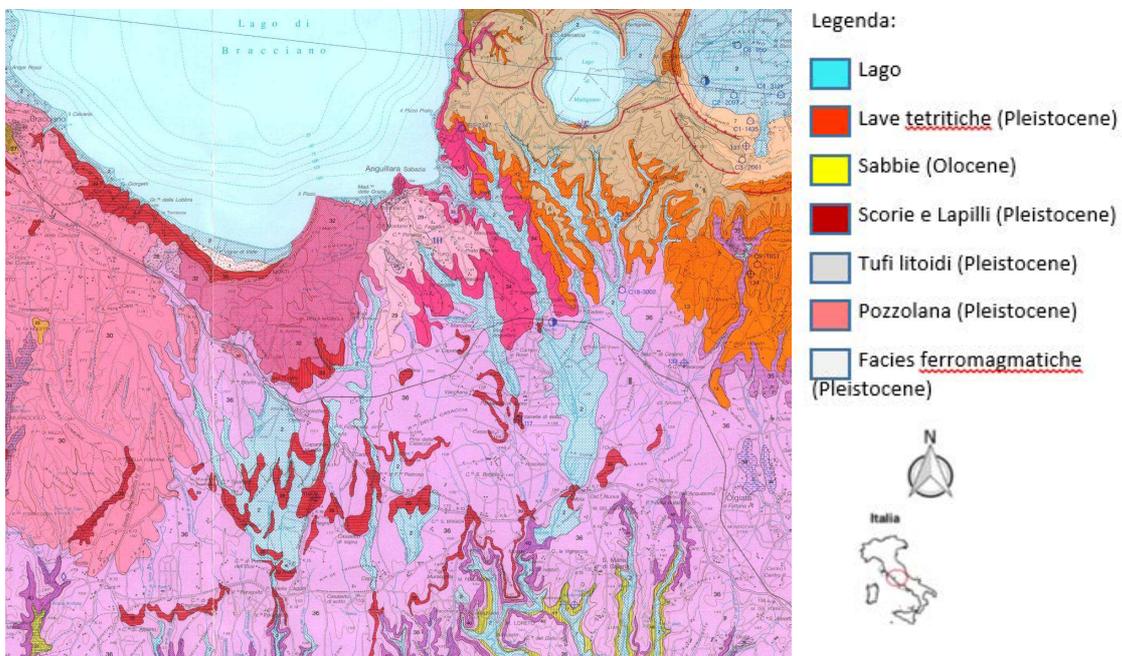


Figura 3: Stralcio della Carta geologica del complesso vulcanico dei Sabatini (in giallo l'area di interesse)

Il DVS si è sviluppato su una vasta area pianeggiante largamente occupata dai sedimenti argilloso-sabbiosi di facies marina e continentale. La morfologia del basamento prevulcanico è strettamente connessa all'evoluzione tettonica di quell'area, caratterizzata da una struttura a *Horst* e *Graben*. Tale assetto influenza direttamente i flussi idrici sotterranei determinando quote piezometriche maggiori in corrispondenza degli alti strutturali del basamento [8].

L'origine dell'attività magmatica è legata allo sviluppo della tettonica distensiva post-miocenica nel settore compreso tra la cintura orogenica degli Appennini e il margine tirrenico della penisola italiana. Il vulcanismo del DVS comprende diverse tipologie di eruzioni, di differente intensità e magnitudo, costituite prevalentemente da colate laviche, flussi piroclastici e depositi di ricaduta, i cui prodotti si ritrovano su un'area di circa 1800 km² dalla valle del Tevere, a est, fino ai monti della Tolfa e ai rilievi del complesso Tolfetano-Cerite-Manziate, a ovest [9].

Attualmente, i terreni vulcanici costituiscono la quasi totalità degli affioramenti ad eccezione delle aree depresse, dove si rinvencono i terreni alluvionali recenti. Come gran parte del comprensorio vulcanico romano anche il territorio in esame è stato abbondantemente inciso dai corsi di acqua, che confluiscono verso il bacino principale rappresentato dal torrente Arrone.

La morfologia è di tipo collinare, con rilievi caratterizzati da versanti a debole pendenza e rare forre. Le colline della zona, con quote massime di circa 180 m s.l.m., hanno direttrici N-S e E-W e, nell'area d'interesse, sono delimitate dal fosso della Casaccia ad est e dal fosso della Marinella a sud.

Prima dell'attività del DVS, l'area attualmente occupata dal C.R. ENEA-Casaccia era percorsa da una valle allungata ad andamento N-S, lievemente degradante verso sud. I primi depositi piroclastici, i tufi inferiori, cominciarono a ricoprire la valle in maniera piuttosto regolare. In seguito, la colata piroclastica del "Tufo rosso a scorie nere" [6] ha colmato le depressioni esistenti, comportando una regolarizzazione della morfologia preesistente. Al di sopra di tale assetto morfologico si depositarono i tufi superiori e, in corrispondenza della fase di tettonica distensiva, in tutti i settori del DVS – a N e a S dell'attuale lago di Bracciano – si ebbe l'emissione di colate laviche da fratture causate dal collasso vulcano-tettonico della conca del lago di Bracciano [6]. A questa fase è riconducibile la messa in posto della colata lavica, ad andamento N-S, rinvenuta in alcuni carotaggi effettuati nel C.R. ENEA-

Casaccia [10] (Figura 4). Contemporaneamente, il collasso vulcano-tettonico della conca del lago di Bracciano e dell'alto strutturale Baccano-Cesano diede luogo alla formazione di un'ampia area depressa ove si accumularono sia i depositi lacustri, sia le lave. Depositi lacustri-palustri sono stati ritrovati anche all'interno della successione stratigrafica nella parte più meridionale del C.R. ENEA-Casaccia, affacciata su Osteria Nuova, e nell'area Capanna, verso la sinistra idrografica dell'Arrone.

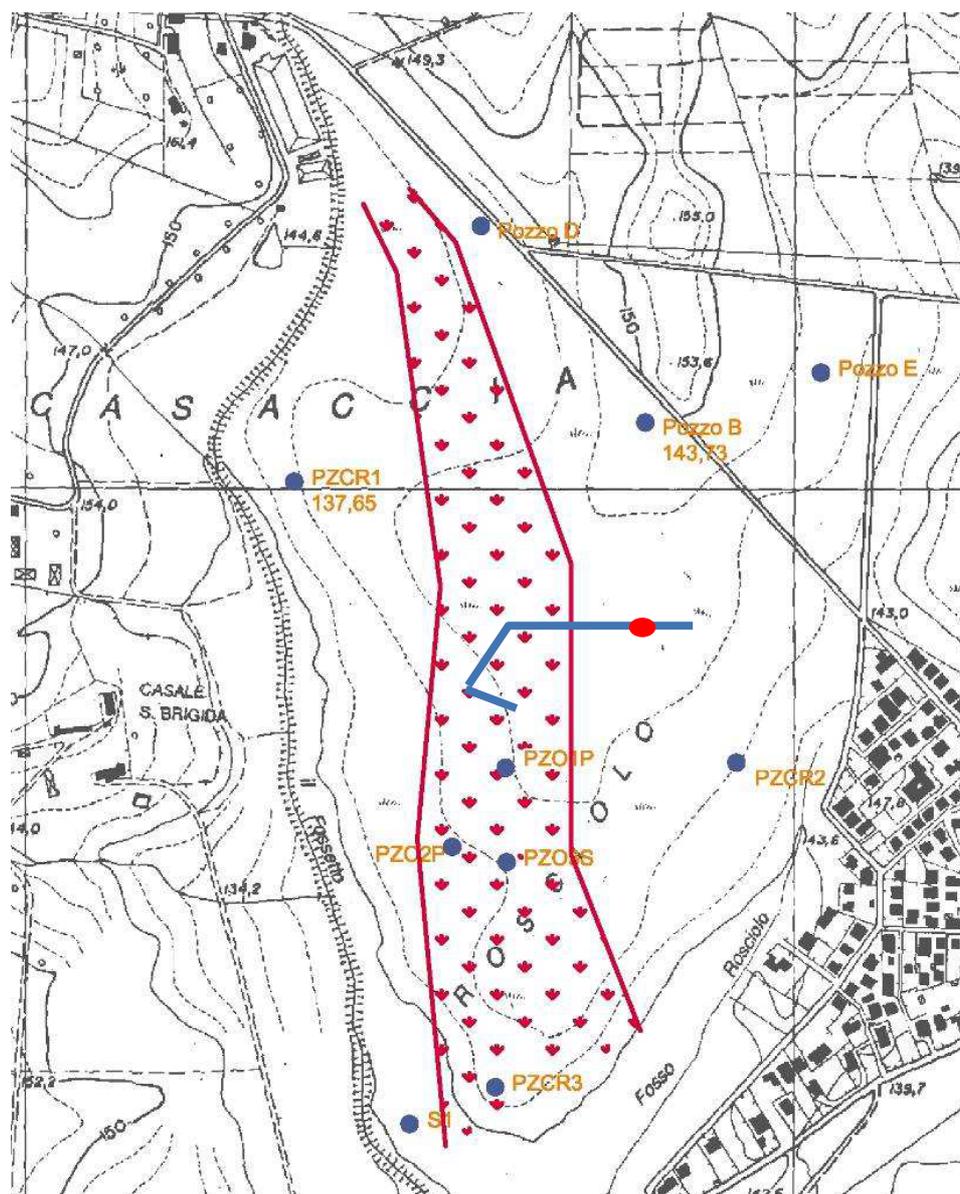


Figura 4: Al centro la colata lavica, che attraversa da N a S il sottosuolo del C.R. ENEA-Casaccia. In blu la linea di congiunzione tra i pozzi utilizzati per l'interpolazione, in rosso l'area di interesse (da [10], modificata)

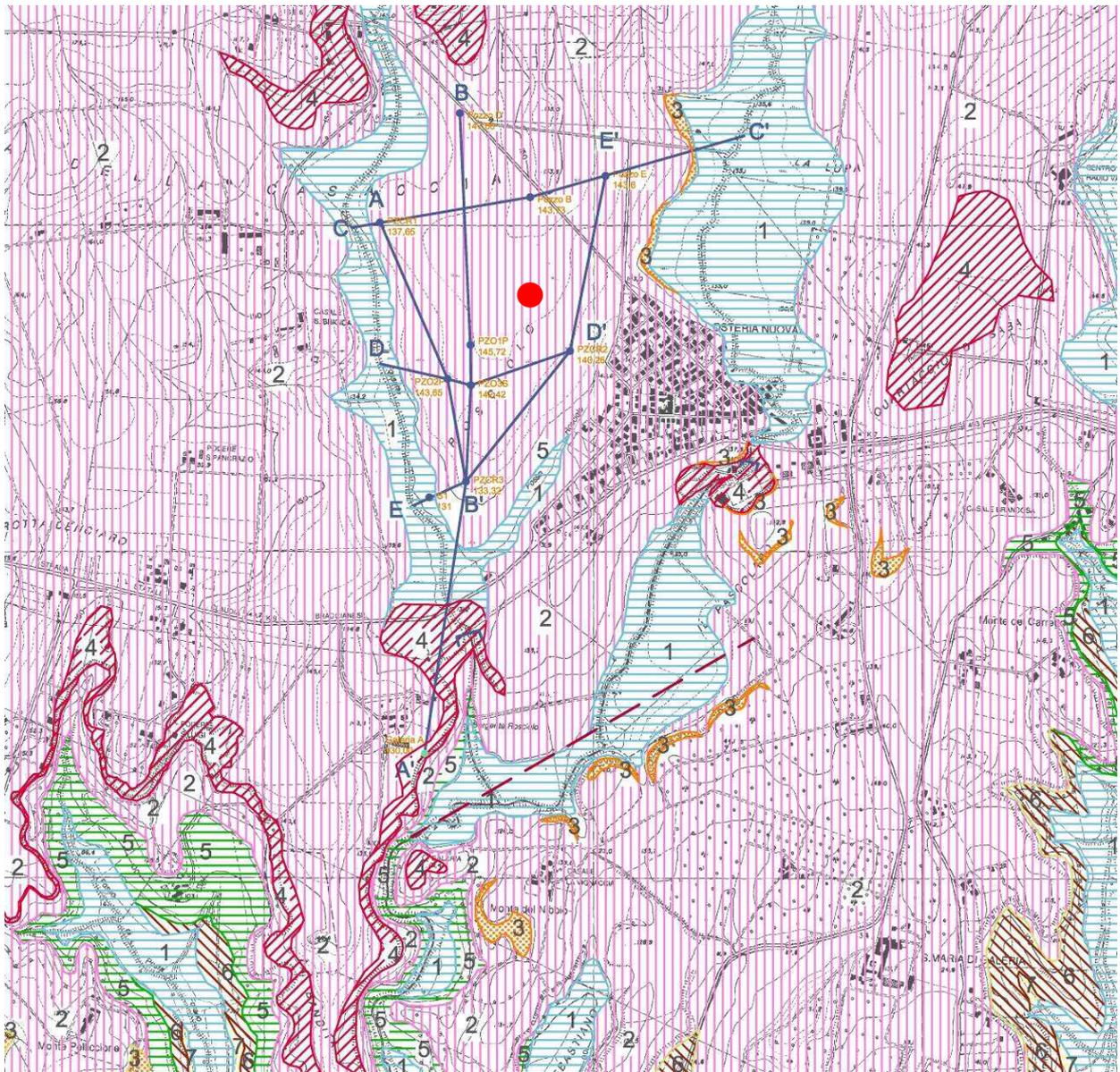
1.1 Successione stratigrafica da indagini pregresse

Per una valutazione preliminare delle caratteristiche dei terreni sottostanti il sito in esame si è fatto ricorso alla Relazione Tecnica, redatta da Sogin nel 2008, riguardante la

caratterizzazione idrogeologica e radiometrica del sito Casaccia [10]. Essendo differenti le finalità del presente lavoro, in questa sede si è deciso di riportare soltanto una sintesi della completa e puntuale ricostruzione stratigrafica che figura nella citata Relazione Tecnica Sogin, a cui si rimanda per maggiori dettagli.

Di seguito viene descritta la successione stratigrafica – a partire dai termini più antichi – dell'area riportata nella carta geologica (Figura 5):

- substrato prevulcanico: formato da un'alternanza di litotipi sabbioso-limosi incoerenti, di colore da marrone-giallastro a grigio, e di termini argilloso-limosi, costituiti prevalentemente da argille consistenti, debolmente plastiche, di colore prevalentemente grigiastro subordinatamente marrone chiaro e avana. Questi sedimenti sono riconducibili a un ambiente deposizionale costiero, con frequenti passaggi a facies di laguna, evolutosi tra il Pliocene superiore e il Pleistocene inferiore;
- tufi inferiori: alternanze e lenti di tufi incoerenti (costituiti da cenere grossolana, subordinatamente fine, con diffusi lapilli e pomice gialle spesso organizzati in livelli a diversa granulometria), livelli vulcanoclastici 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. Nella parte più alta potrebbero essere correlati con i "Tufi stratificati varicolori di Sacrofano";
- tufo rosso a scorie nere: colata piroclastica costituita da lapilli e pomice nere immerse in matrice cineritica grossolana, poco coerente di colore da giallo a marrone-rossastro; di spessore molto variabile, tende a colmare depressioni preesistenti;
- tufi superiori: affiorano nell'area del C.R. ENEA-Casaccia. Sono caratterizzati da un'alternanza di strati e lenti di materiale vulcanico di origine piroclastica, spesso rimaneggiato, messo in posto con diverse modalità di deposizione. All'interno di questa unità sono presenti colate laviche, depositi lacustri ed epivulcaniti, per cui sono spesso frequenti e 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.



LEGENDA

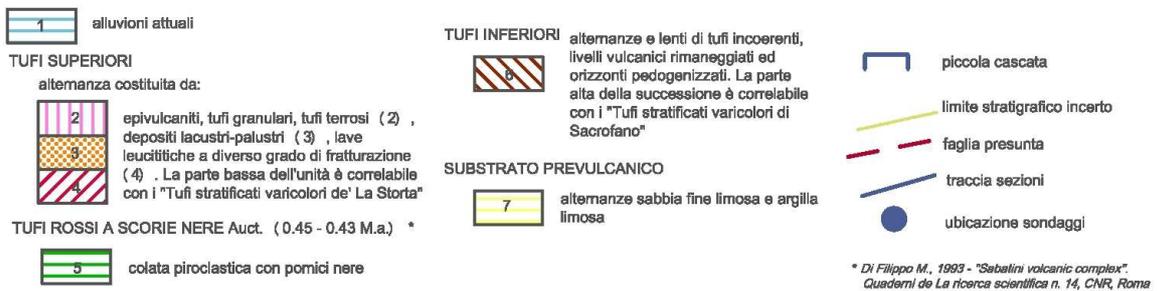


Figura 5: Carta geologica del territorio in esame, con il pallino rosso è indicata l'area di interesse, scala 1:20.000 (da [10], modificata)

1.2 Ubicazione del campo geosonde e assetto litostratigrafico presunto

Per l'ubicazione del campo geosonde sono stati presi in considerazione diversi aspetti. Innanzitutto, l'area idonea doveva essere individuata all'interno del C.R. ENEA-Casaccia per motivi sia di sicurezza, sia di facilità di accesso e controllo dell'impianto. Inoltre, un altro elemento importante era la possibilità di posizionare l'impianto geotermico in prossimità di una hall tecnologica, dove sarebbe stata collocata la pompa di calore, l'eventuale serbatoio di accumulo e gli apparati di controllo e di misura. Infine, aspetto fondamentale, il campo geosonde doveva essere realizzato entro un volume di sottosuolo con caratteristiche idonee per l'utilizzo della geotermia.

Per la ricostruzione della sequenza stratigrafica presunta nell'area del campo geosonde, preventivamente all'esecuzione dei carotaggi, si è partiti dai dati delle perforazioni descritte nella Relazione Tecnica Sogin [10]. In particolare, sono stati considerati i piezometri PZ03S, PZ02P, PZ01P e PZCR2 (Figura 4), situati a poca distanza dall'edificio F40 – provvisto di tutte le *facilities* a supporto del campo geosonde – e realizzati a carotaggio continuo, quindi con disponibilità di log stratigrafico dettagliato. I piezometri selezionati sono stati georeferenziati e inseriti in un progetto GIS sviluppato con il software open source QGIS (versione 3.4.14).

Dalla colonna stratigrafica di ogni piezometro sono stati individuati i litotipi più significativi e i corrispondenti spessori, consentendo l'estrapolazione di una sequenza stratigrafica semplificata costituita da 4 macro-classi principali. Interpolando le quote relative al tetto e al letto, per ogni piezometro, delle diverse macro-classi identificate è stato possibile desumere approssimativamente la quota di ogni interfaccia e lo spessore di ogni litotipo rappresentato dalle macro-classi nel sottosuolo del campo geosonde (Tabella 1).

La lava, ove presente, si colloca tra i tufi granulari stratificati (TGS) e i tufi granulari con cenere grossolana (TGC). In base all'andamento della colata lavica riportato nella carta geologica e alle evidenze riscontrate nei dati di pozzo interpolati, si ipotizza l'assenza delle lave nella zona prescelta per l'installazione delle sonde geotermiche verticali. Se questa ipotesi sarà confermata, i carotaggi saranno più spediti e comporteranno un minore consumo energetico. In ultimo, è stata stimata la quota della superficie piezometrica, nel sito del campo geosonde, a circa 120 m s.l.m.

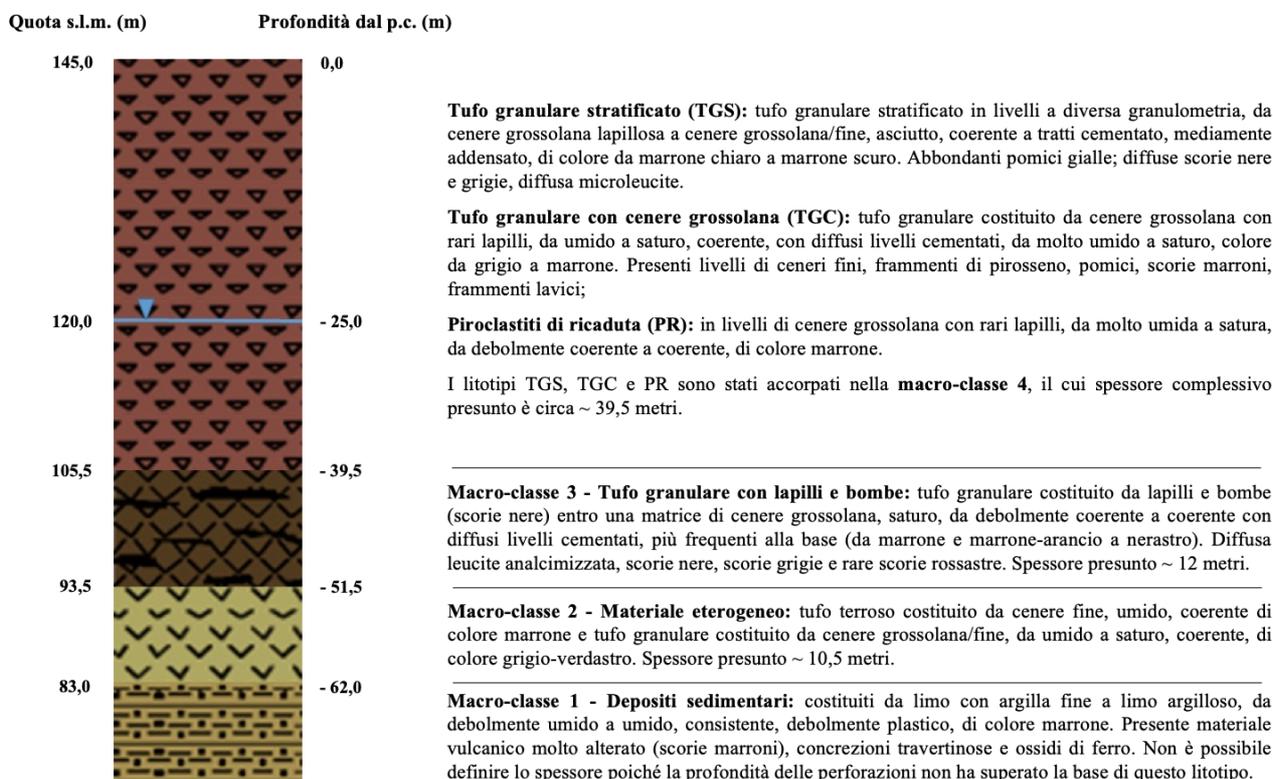


Tabella 1: Ricostruzione dell'assetto litostratigrafico e quota stimata del livello della falda

Nel secondo anno del Piano Triennale è prevista la realizzazione di una perforazione a carotaggio continuo di uno dei pozzi del campo geosonde, per ricostruire con esattezza l'assetto litostratigrafico e poter misurare direttamente la conducibilità termica del sottosuolo. Sarà così possibile ottenere il valore reale di resa termica per metro lineare di sonda installata nel terreno.

Per quanto riguarda la simulazione dei carichi termici si è assunta come target, per la sorgente terreno, la climatizzazione di un ufficio (con superficie di 140 m² circa, situato nell'edificio F40, adiacente al campo geosonde). Tramite il software *GeoHeatCal* è stato possibile dimensionare le sonde inserendo i valori dei carichi di picco invernali ed estivi. Per soddisfare le esigenze di carico termico richiesto dall'utenza in modo continuativo nell'arco dell'anno si prevede di realizzare 4 pozzi, di diversa profondità, attrezzati con sonde geotermiche verticali. In particolare, le perforazioni interesseranno la zona carrabile adiacente l'edificio F40 (Figure 6 e 7). La distanza tra un pozzo e il suo successivo dovrà essere di circa 8 metri e la pompa di calore, da installare all'interno della hall presente nell'edificio, sarà a circa 16 metri dal boccapozzo più prossimo. Pertanto, la superficie occupata dal campo geosonde sarà di circa 50 m². Infine, con l'intento di scongiurare potenziali incidenti è stata considerata una distanza di sicurezza dai sottoservizi presenti (reti gas e fognaria).



Figura 6: Planimetria con ubicazione dei pozzi geotermici da realizzare, adiacenti all'edificio F40, nel C.R. ENEA-Casaccia (in verde scuro la rete fognaria, in blu la rete gas, in rosso l'ubicazione dei quattro pozzi, in verde chiaro la distanza dalla pompa di calore, che sarà collocata nella hall dell'edificio F40)



Figura 7: Foto dell'area dove sarà realizzato il campo geosonde, con l'indicazione della possibile ubicazione dei pozzi

1.3 Inquadramento idrogeologico regionale

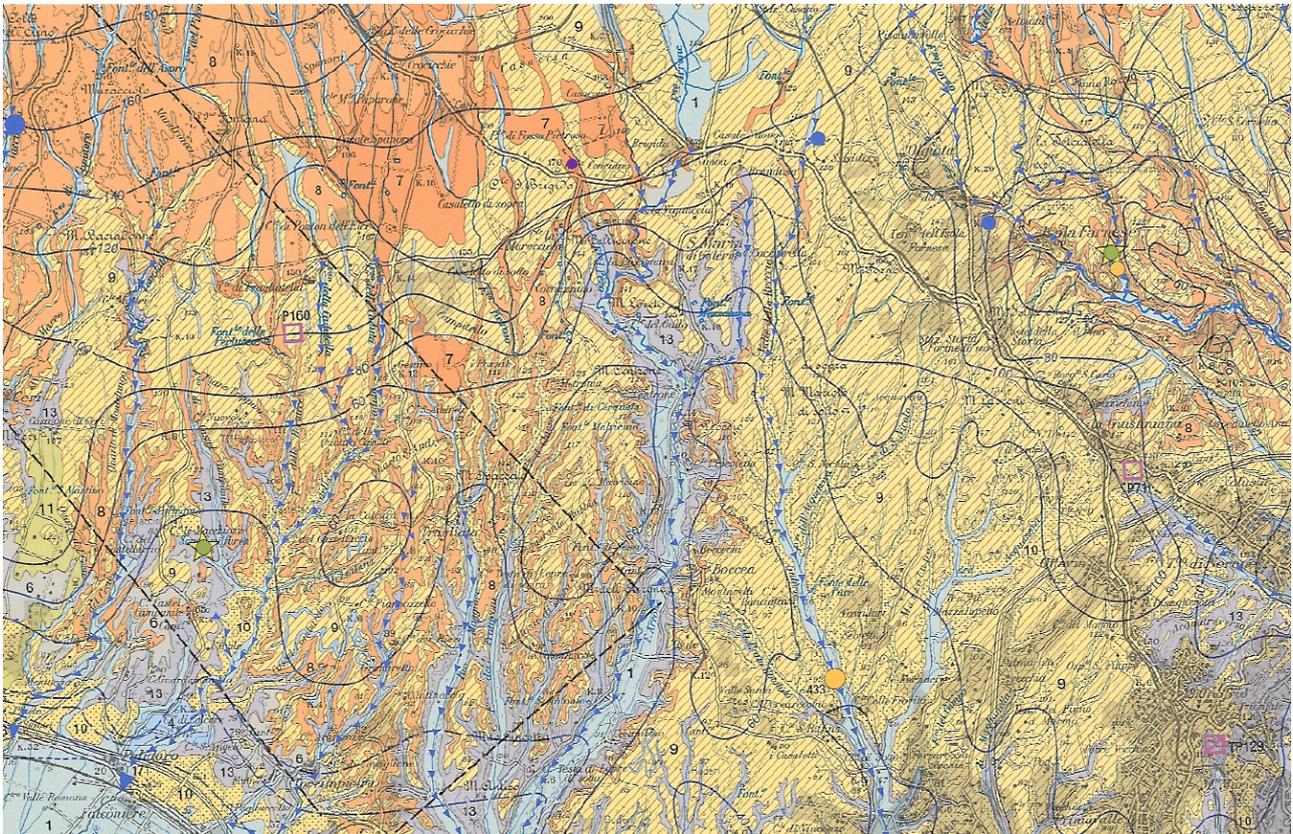
L'acquifero regionale è interamente contenuto nel sistema dei depositi vulcanici, mentre le formazioni sedimentarie costituiscono il letto impermeabile dell'acquifero sovrastante. L'immagazzinamento e la circolazione idrica nel sistema vulcanico dipendono da diversi fattori, tra cui:

- la paleomorfologia dei depositi basali, rappresentati da sedimenti marino-continentali a bassa permeabilità, che costituiscono l'aquiclude;
- l'attuale assetto morfologico dei rilievi e del reticolo idrografico, che determina l'andamento delle infiltrazioni e della percolazione delle acque sotterranee [11].

La carta idrogeologica del Territorio della Regione Lazio [12], nella legenda dei complessi idrogeologici raggruppa diverse litoformazioni nell'area di studio (Figura 8), tra cui le principali sono costituite da:

- complesso delle lave, laccoliti e coni di scorie: permeabilità mediamente alta, ma per la presenza di materiale eterogeneo (ceneri, paleosuoli) mostrano, talvolta, contrasti dei valori di permeabilità verticale;
- complesso delle pozzolane: depositi di colata piroclastica, massivi e caotici spesso litoidi. Presentano permeabilità elevata. Talvolta per la presenza di paleosuoli possono originare falde sospese;
- complesso dei tufi stratificati e delle facies freatomagmatiche: tufi stratificati e tufi terrosi. Compresi anche depositi lacustri, livelli di pomici, lapilli, brecce piroclastiche. La permeabilità nel complesso è mediamente bassa;
- complesso delle sabbie, argille, ghiaie: permeabilità generalmente bassa;
- complesso dei depositi terrigeni: comprende il flysh dell'Olocene e le argille Plio-pleistoceniche. Permeabilità bassa, costituisce l'aquiclude degli acquiferi regionali sovrastanti.

Nell'area della Casaccia, la superficie di separazione tra i depositi vulcanici e le formazioni sedimentarie sottostanti dovrebbe attestarsi tra 40 e 90 m di profondità dal piano campagna. Nel sito individuato per la realizzazione del campo geosonde tale superficie si trova presumibilmente a circa 64 m di profondità dal piano campagna.



- 6** **COMPLESSO DEI DEPOSITI FLUVIO PALUSTRIS E LACUSTRI - potenzialità acquifera bassa**
 Depositi prevalentemente limo - argillosi in facies palustre, lacustre e salmastra con locali intercalazioni ghiaiose e/o travertinose (*PLEISTOCENE - OLOCENE*). Spessore variabile da pochi metri ad alcune decine di metri. La prevalente componente argillosa di questo complesso impedisce una circolazione idrica sotterranea significativa; la presenza di ghiaie, sabbie e travertini può dare origine a limitate falde locali. Il complesso può assumere il ruolo di acquiclud confinando la circolazione idrica sotterranea degli acquiferi carbonatici (Piana Pontina e di Cassino).
- 7** **COMPLESSO DELLE LAVI, LACCOLITI E CONI DI SCORIE - potenzialità acquifera medio alta**
 Scorie generalmente saldate, lave e laccoliti. (*PLEISTOCENE*). Spessori da qualche decina a qualche centinaio di metri. Questo complesso contiene falde di importanza locale ad elevata produttività, ma di estensione limitata.
- 8** **COMPLESSO DELLE POZZOLANE - potenzialità acquifera media**
 Depositi da colata piroclastica, genericamente massivi e caotici, prevalentemente litoidi. Nel complesso sono comprese le ignimbriti e tuffi (*PLEISTOCENE*). Spessore da pochi metri ad un migliaio di metri. Questo complesso è sede di una estesa ed articolata circolazione idrica sotterranea che alimenta la falda di base dei grandi acquiferi vulcanici regionali.
- 9** **COMPLESSO DEI TUFFI STRATIFICATI E DELLE FACIES FREATOMAGMATICHE - potenzialità acquifera bassa**
 Tuffi stratificati, tuffi terrosi, breccie piroclastiche, pomici, lapilli e blocchi lavici in matrice cineritica (*PLEISTOCENE*). I termini del complesso si presentano interdigitati tra gli altri complessi vulcanici per cui risulta difficile definirne lo spessore totale. Il complesso ha una rilevanza idrogeologica limitata anche se localmente può condizionare la circolazione idrica sotterranea, assumendo localmente il ruolo di limite di flusso e sostenendo esigue falde superficiali.
- 10** **COMPLESSO DEI DEPOSITI CLASTICI ETEROGENEI - potenzialità acquifera bassa**
 Depositi prevalentemente sabbiosi e sabbioso - argillosi a luoghi cementati in facies marina e di transizione, terrazzati lungo costa, sabbie e conglomerati fluviali di ambiente deltizio (*PLIOCENE - OLOCENE*). Spessore variabile fino a un centinaio di metri. Il complesso non presenta una circolazione idrica sotterranea significativa. Ove sono prevalenti facies conglomeratiche di elevata estensione e potenza si ha la presenza di falde di interesse locale.
- 11** **COMPLESSO DELLE CALCARENITI ORGANOGENE - potenzialità acquifera media**
 Calcareniti, calcari sabbiosi e arenarie calcaree (macco) (*PLIOCENE*). Spessori variabili fino ad alcune decine di metri. Dove l'estensione dell'affioramento consente una ricarica zenitale significativa, ospitano falde di interesse locale.
- 12a** **12b** **COMPLESSO DEI CONGLOMERATI - potenzialità idrica da medio bassa a medio alta**
 Conglomerati poligenici che assumono potenzialità idriche differenti in funzione del loro spessore e della natura della matrice e/o cemento. Sono stati distinti due sottocomplessi:
12a - conglomerati a potenzialità idrica medio bassa
 Breccie calcaree cementate, calcareniti, calciruditi con livelli argillosi, conglomerati poligenici a cemento argilloso (*MIOCENE - PLIOCENE*), puddinghe a cemento sabbioso (conglomerati di Santopadre) (*PLEISTOCENE INF.*). Spessore variabile da qualche decina ad oltre un centinaio di metri. La ridotta estensione degli affioramenti, associata all'abbondante matrice argilloso - sabbiosa di questo complesso, impediscono l'attivazione di una circolazione idrica sotterranea significativa. Solo dove poggiano su un substrato a bassa permeabilità possono contenere falde esigue.
12b - conglomerati a potenzialità idrica medio alta
 Conglomerati generalmente cementati con spessore variabile da qualche decina a diverse centinaia di metri (*PLIOCENE - PLEISTOCENE*). Nelle zone di Rieti e di Formia questo complesso è sede di falde produttive.
- 13** **COMPLESSO DELLE ARGILLE - potenzialità acquifera bassissima**
 Argille con locali intercalazioni marnose, sabbiose e ghiaiose (*PLIOCENE - PLEISTOCENE*), argille con gessi (*MIOCENE*); spessore variabile da decine a centinaia di metri. La prevalente matrice argillosa di questo complesso definisce i limiti di circolazione idrica sotterranea sostenendo gli acquiferi superficiali e confinando quelli profondi. Laddove affiorano i termini ghiaioso-sabbiosi è presente una circolazione idrica di importanza locale (Bacino del Farfa).

Figura 8: Straccio della legenda dei complessi idrogeologici della carta idrogeologica del Territorio della Regione Lazio; 1:100.000 [12]

1.3.1 Circolazione idrica nel sottosuolo del C.R. ENEA-Casaccia

Come accennato in precedenza, le formazioni prevulcaniche (sedimenti prevalentemente marini e marino-continentali) rappresentano il sostegno del sistema acquifero regionale, che è utilizzato per l'approvvigionamento idrico sia potabile, sia agricolo-industriale. La falda di base dell'acquifero regionale, con spessori nell'ordine di 100-150 m, è contenuta nelle formazioni vulcaniche.

Esistono inoltre circolazioni più superficiali di tipo locale, dovute a contrasti di permeabilità verticale e alimentate dalle precipitazioni meteoriche, con carattere temporaneo o perenne in relazione alla capacità di immagazzinamento dei terreni interessati. Si tratta di falde acquifere di modesta capacità, ma che localmente possono dare un notevole contributo.

Le ultime fasi dell'attività vulcanica hanno dato luogo ad estese mineralizzazioni dei prodotti vulcanici da parte di fluidi idrotermali originatisi in profondità. Nell'area pericalderica del Lago di Bracciano sono stati stimati a 1 km di profondità valori di temperatura tra 100 e 200 °C [13]. In particolare, il C.R. ENEA-Casaccia rientra nella isoterma di 200 °C (Figura 9).

Gli elementi guida per la schematizzazione della circolazione idrica profonda sono costituiti da:

- la presenza dell'orlo della caldera a poca distanza dal C.R. ENEA-Casaccia in direzione nord-ovest, dove la piezometrica raggiunge i 170 m s.l.m.;
- il livello del lago di Bracciano a 163 m s.l.m.;
- l'incisione del F. Arrone, emissario del Lago di Bracciano, che da quota 130 m arriva a 100 m alla confluenza con il fosso Fossetto a sud.

Questi elementi determinano, in corrispondenza del C.R. ENEA-Casaccia, un livello della piezometrica a quote da 135 a 115 m s.l.m. e profondità della falda da qualche metro a circa 30 m in relazione alla topografia del sito. La consultazione dei dati di bibliografia e la misurazione dei livelli statici della falda nella campagna condotta tra il 2007 e il 2008 ha consentito di ricostruire l'andamento di dettaglio della piezometrica nell'area del C.R. ENEA-Casaccia (Figura 10). La direzione del flusso è principalmente NW-SE, nella parte settentrionale del Centro, e N-S nella zona più a valle.

Negli anni '60-'70 il livello statico della falda nell'area del C.R. ENEA-Casaccia oscillava tra quota 127 e 134 m s.l.m. [14,15]. Più recentemente, tra il 2007 e il 2008, dal monitoraggio della rete dei piezometri ubicati nel Centro sono stati misurati livelli statici compresi tra quota 117 e 130 m s.l.m.

Nel settembre 2019 sono state effettuate nuove misurazioni del livello statico nei piezometri PZ03s, PZ02p, PZ01p e PZCR2, per stimare, tramite interpolazione lineare, la profondità relativa del livello di falda nel sito individuato per la realizzazione del campo geosonde. I risultati ottenuti (Tabella 2) sono perfettamente in linea con quanto riscontrato negli anni 2007-2008, con quote del livello statico comprese tra 117,9 e 123,9 m s.l.m. Come conseguenza, considerando che il sito prescelto si trova a una quota topografica di circa 145 m, la soggiacenza presunta della falda potrebbe essere all'incirca pari a 25 m.

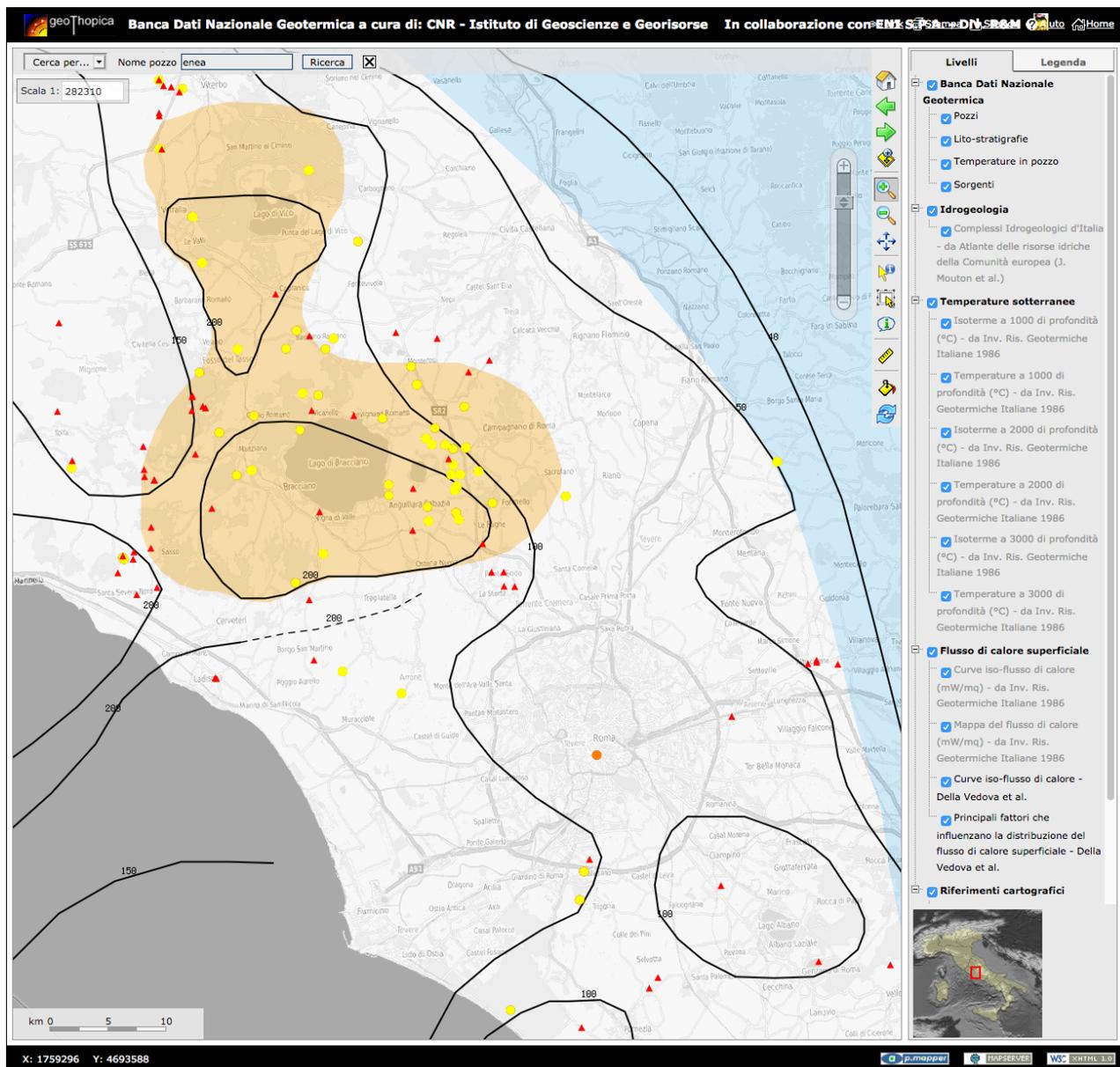


Figura 9: Andamento delle isoterme a 1000 m di profondità dal piano campagna [13]

	PZ03s	PZ02p	PZ01p	PZCR2
Quota boccapozzo (m s.l.m.)	142,45	143,80	145,67	140,26
Soggiacenza (m)	24,51	25,77	21,81	20,23
Quota livello di falda (m s.l.m.)	117,94	118,03	123,86	120,03

Tabella 2: Misurazioni effettuate il 10/09/2019 nei piezometri Sogin più prossimi al sito individuato per la realizzazione del campo geosonde

2. DIMENSIONAMENTO DI UN IMPIANTO GEOTERMICO A BASSA ENTALPIA INTEGRATO CON POMPA DI CALORE

2.1 Principi generali

Dimensionare un campo geosonde è un'operazione complessa, in quanto condizionerà il funzionamento dell'impianto per tutta la sua vita utile (circa 100 anni). Per esempio, il sottodimensionamento dello scambiatore può portare a una riduzione della resa della macchina, con un progressivo depauperamento termico del sottosuolo; d'altra parte, un sovradimensionamento comporta un maggior dispendio economico, giacché la pompa di calore (PdC) consuma più energia elettrica. In particolare, il dimensionamento delle sonde geotermiche verticali è funzione di una serie di parametri, non tutti sempre agevoli da determinare a priori.

I fattori necessari per il dimensionamento possono essere innanzitutto divisi in due gruppi [16]: quelli relativi al sottosuolo e quelli legati all'impianto (Tabella 3).

Fattori relativi al sottosuolo	Fattori legati all'impianto
Litologia	Temperature di lavoro all'evaporatore/condensatore della PdC
Conducibilità termica	Fabbisogno termico dell'edificio
Capacità termica	Potenze di picco in condizioni di progetto
Diffusività	Ore di funzionamento degli impianti
Eventuale presenza di falde acquifere	Giorni di funzionamento in regime invernale/estivo
Materiale di cementazione del perforo	Potenza termica/elettrica effettiva della PdC
Fluido termovettore	Coefficiente di prestazione della PdC (COP)
Temperatura del terreno indisturbato	

Tabella 3: Fattori necessari per il dimensionamento di un campo geosonde (da [16], modificato)

Due altri parametri da considerare sono la scelta della geometria della sonda e la configurazione. Per impianti al di sotto dei 30 kW è possibile risalire al valore della potenza specifica di estrazione (W/m), al variare delle caratteristiche del terreno, tramite la tabella

relativa alla normativa tedesca di riferimento VDI 4640 (Tabella 4) [17].

Roccia	Conducibilità termica media λ (W/mK)	Resa (W/m)
Linee guida generali		
Sottosuoli sterili, sedimenti secchi ($\lambda < 1,5$ W/mK)		20
Normali sottosuoli rocciosi ($\lambda = 1,5 - 3,0$ W/mK)		50
Rocce consolidate altamente conduttive ($\lambda > 3,0$ W/mK)		70
Rocce eruttive		
Graniti	3,5	80 - 90
Granodioriti	2,5	60 - 70
Gabbri	1,8	40 - 50
Basalti	1,7	40 - 50
Porfidi	1,9	40 - 50
Ossidiane	1,3	30 - 40
Pomici	0,4	20 - 30
Rocce sedimentarie		
Calcari	2,8	60 - 70
Arenarie	2,2	50 - 60
Travertini	2,4	50 - 60
Gesso	2,5	50 - 60
Ghiaia asciutta	0,4	20 - 40
Ghiaia bagnata	1,6 ⁽¹⁾	40 - 50
Sabbia asciutta	0,5	30 - 50
Sabbia bagnata	2,3	50 - 60
Limi e argille asciutti	0,6	30 - 50
Limi e argille bagnate	1,8	40 - 50
Rocce metamorfiche		
Gneiss	2,9	60 - 70
Marmo	2,2	50 - 60
Ardesia	2,4	50 - 60
Altri materiali		
Bentonite	0,7	
Cemento	1,6	
(1) la conducibilità termica della ghiaia satura dipende fortemente dalle caratteristiche della falda		

Tabella 4: Conducibilità termica media e resa termica dei principali tipi di suoli e rocce, e di alcuni materiali [da 17, modificata]

Questi parametri dipendono essenzialmente dalla tipologia del terreno, dalla conducibilità termica, dal grado di fratturazione, dal valore di permeabilità e dalla presenza o no della falda acquifera (Tabella 5) [17].

Roccia	densità ρ 10^3 kg m^{-3}	conduttività termica λ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	calore specifico volumetrico S_{VC} $\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$
Rocce magmatiche			
basalto	2,6 ÷ 3,2	1,3 ÷ 2,3 (1,7)	2,3 ÷ 2,6
diorite	2,9 ÷ 3,0	2,0 ÷ 2,9 (2,6)	2,9
gabbro	2,8 ÷ 3,1	1,7 ÷ 2,5 (1,9)	2,6
granito	2,4 ÷ 3,0	2,1 ÷ 4,1 (3,4)	2,1 ÷ 3,0
peridotite	3,0	3,8 ÷ 5,3 (4,0)	2,7
riolite	≈ 2,6	3,1 ÷ 3,4 (3,3)	2,1
Rocce metamorfiche			
gneiss	2,4 ÷ 2,7	1,9 ÷ 4,0 (2,9)	1,8 ÷ 2,4
marmo	2,5 ÷ 2,8	1,3 ÷ 3,1 (2,1)	2,0
metaquarzite	≈ 2,7	≈ 5,8 (5,8)	2,1
micascisto	≈ 2,6	1,5 ÷ 3,1 (2,0)	2,2
argilloscisto	2,7	1,5 ÷ 2,6 (2,1)	2,2 ÷ 2,5
Rocce sedimentarie			
calcere	2,6 ÷ 2,7	2,5 ÷ 4,0 (2,8)	2,1 ÷ 2,4
marna	2,5 ÷ 2,6	1,5 ÷ 3,5 (2,1)	2,2 ÷ 2,3
quarzite	≈ 2,7	3,6 ÷ 6,6 (6,0)	2,1 ÷ 2,2
alite	2,1 ÷ 2,2	5,3 ÷ 6,4 (5,4)	1,2
arenaria	2,2 ÷ 2,7	1,3 ÷ 5,1 (2,3)	1,6 ÷ 2,8
antracite	–	0,3 ÷ 0,6 (0,3)	1,3 ÷ 1,8
siltite	2,5 ÷ 2,6	1,1 ÷ 3,5 (2,2)	2,1 ÷ 2,4
Terreni non consolidati			
ghiaia (asciutta)	2,7 ÷ 2,8	0,4 ÷ 0,5 (0,4)	1,4 ÷ 1,6
ghiaia (satura d'acqua)	≈ 2,7	≈ 1,8 (1,8)	≈ 2,4
morena	–	1,0 ÷ 2,5 (2,0)	1,5 ÷ 2,5
sabbia (asciutta)	2,6 ÷ 2,7	0,3 ÷ 0,8 (0,4)	1,3 ÷ 1,6
sabbia (satura d'acqua)	2,6 ÷ 2,7	1,7 ÷ 5,0 (2,4)	2,2 ÷ 2,9
argilla (asciutta)	–	0,4 ÷ 1,0 (0,5)	1,5 ÷ 1,6
argilla (satura d'acqua)	–	0,9 ÷ 2,3 (1,7)	1,6 ÷ 3,4
torba	–	0,2 ÷ 0,7 (0,4)	0,5 ÷ 3,8
Altre sostanze			
bentonite	–	0,5 ÷ 0,8 (0,6)	≈ 3,9
calcestruzzo	≈ 2,0	0,9 ÷ 2,0 (1,6)	≈ 1,8
ghiaccio (a –10°C)	0,919	2,32	1,87
plastica (PE)	–	0,39	–
aria (0 ÷ 20°C, secca)	0,0012	0,02	0,0012
acciaio	7,8	60	3,12
acqua (+10°C)	0,999	0,59	4,15

Tabella 5: Esempi di conduttività termica (tra parentesi i valori tipici) e calore specifico volumetrico di alcuni terreni, rocce e altre sostanze a 20 °C [17]

Per installazioni di grande potenza (> 30 kW) sono necessari calcoli specifici, che richiedono l'utilizzo di metodi analitici e/o numerici [18].

Al crescere dei carichi termici aumenta, ovviamente, anche la profondità e il numero dei fori. Le scelte impiantistiche dipendono dal tipo di scambiatore nelle sonde, dalla miscela per cementare il foro, dal fluido termovettore, dalla disposizione delle sonde in sito e dal collegamento orizzontale alla PdC.

Il *Ground Response Test* (GRT) permette di acquisire direttamente le proprietà termiche del sottosuolo e la resistenza termica della sonda geotermica. La prova consiste nell'installazione di una sonda geotermica nel terreno da indagare, collegata a un impianto calibrato, che misura in continuo le temperature di ingresso e di uscita del fluido termovettore. Il test fornisce informazioni sulla temperatura media indisturbata del terreno, sulle caratteristiche termofisiche e sulla stratigrafia del terreno stesso.

Inoltre, in fase di progettazione bisogna valutare anche la conducibilità del materiale di riempimento del foro, il cortocircuito termico, la resistenza termica associata al materiale che costituisce lo scambiatore, le caratteristiche del moto e le proprietà del fluido termovettore. Pertanto, definita la resa termica del pozzo nonché il calore estratto per metro lineare di sonda installata, si potranno determinare i metri effettivi di sonda da installare in base alla richiesta termica dell'utenza.

È importante ridurre al minimo la resistenza termica del foro (R_b). Diverse sono le strade a cui si ricorre per ottimizzare la resistenza termica, per esempio fornendo al fluido una velocità adeguata a produrre condizioni di moto turbolento, o assicurando una opportuna distanza tra il tubo di mandata e quello di ritorno all'interno del foro per limitare il fenomeno della cortocircuitazione termica.

A fronte delle considerazioni esposte, il numero di sonde e la profondità di installazione dipendono essenzialmente dalla richiesta termica dell'utenza. Bisogna definire il carico di picco richiesto per il riscaldamento, ovvero la quantità di calore necessaria per soddisfare il fabbisogno termico giornaliero nella condizione più critica dell'anno; quest'ultimo dipenderà dall'ubicazione e dalla latitudine dell'utenza.

Nel caso del raffrescamento, naturalmente, la temperatura del terreno e del fluido vettore aumenta con il tempo per via dello stoccaggio nel sottosuolo del calore prelevato dall'ambiente interno (lato utenza). Bisogna che il sistema raggiunga l'equilibrio, senza che la temperatura nel terreno o nel fluido vettore aumenti eccessivamente. In ultima analisi

valgono ancora le prescrizioni contenute nella normativa di riferimento VDI, ovvero che la temperatura di ritorno del fluido termovettore in condizioni di carico base (media settimanale) non si discosti più di 11 °C rispetto alla temperatura indisturbata del terreno e in condizioni di picco non superi i 17 °C. In molti sistemi, il calore stoccato nel sottosuolo in estate può essere estratto durante l'inverno. Pertanto, il calore non è considerato un rifiuto ma un bene che viene immagazzinato nel sottosuolo per poterlo estrarre nuovamente, magari in un inverno più rigido. Questa condizione costituisce una fonte geotermica di riscaldamento e di raffrescamento sostenibile che utilizza i sistemi UTES (*Underground Thermal Energy Storage*) [16].

2.2 Pompa di calore geotermica

Le pompe di calore (PdC) sono macchine termiche che, compiendo lavoro, trasferiscono calore da un corpo a temperatura più bassa (terreno o acqua) a un altro a temperatura maggiore (utenza). La PdC è una macchina termodinamica a ciclo inverso che lavora tra due livelli termici, uno interfacciato con la sorgente fredda e uno ad alta temperatura, il serbatoio caldo. Il sottosuolo costituisce la sorgente termica per l'estrazione durante l'inverno e un serbatoio per il suo stoccaggio durante l'estate. Il dimensionamento di un sistema di scambio geotermico è un processo critico e complesso da cui dipende l'efficienza, la durabilità e la sostenibilità economica dell'intero sistema di climatizzazione. Gli impianti geotermici a bassa entalpia accoppiati a una PdC sono molto versatili, dal momento che possono essere realizzati in ogni tipologia di sottosuolo e in qualsiasi regione d'Italia [19].

La scelta dell'impianto più opportuno è vincolata ad alcuni fattori-chiave, da considerare preliminarmente, ovvero:

- l'assetto geologico e idrogeologico del sottosuolo;
- la superficie areale disponibile;
- le sorgenti potenziali di calore nelle vicinanze;
- i carichi termici estivi ed invernali.

Nella fase progettuale, dopo aver individuato la sorgente più adatta si passa al dimensionamento, stabilendo i parametri chiave più idonei per ottenere una prestazione ottimale al minimo costo (Figura 11) [20].

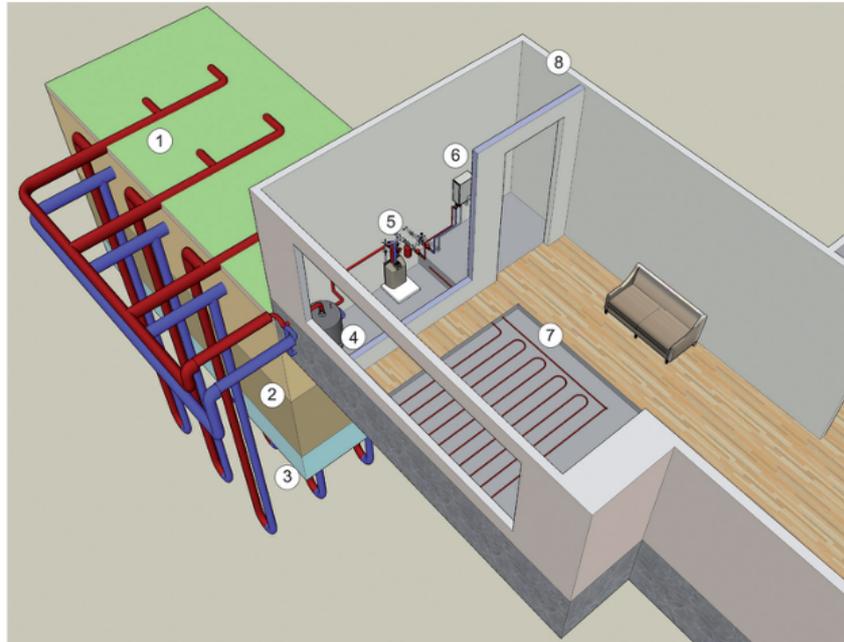


Figura 11. Principali componenti dell'impianto geotermico: 1) campo sonde con circuitazione in parallelo; 2) sottosuolo, con diverse proprietà termofisiche; 3) falda acquifera; 4) accumulatore acqua calda sanitaria; 5) pompa di calore; 6) boiler in integrazione; 7) pannelli radianti a pavimento; 8) involucro edilizio [20]

Particolare attenzione va indirizzata al fluido termovettore, che scorre all'interno delle sonde permettendo all'impianto di estrarre/cedere calore dal/al sottosuolo, alla PdC più idonea al raggiungimento della temperatura interna richiesta e al sistema di distribuzione del calore all'interno dell'edificio.

Utilizzando acqua pura come fluido termovettore, l'evaporazione all'interno della PdC non avviene se il fluido in ingresso ha una temperatura inferiore a 5-6 °C. In questi casi si aggiunge un anticongelante, che permette al liquido di evaporare anche a temperature più basse e di assorbire sufficiente calore dal terreno per far fronte ai carichi invernali richiesti. Rispetto agli impianti di riscaldamento convenzionali (PdC aria-aria), le PdC acqua-acqua offrono il vantaggio di sfruttare una risorsa termica (terreno o acqua) caratterizzata da una temperatura che resta costante per tutta la stagione, ottenendo in tal modo un notevole risparmio in termini di consumi energetici.

Il funzionamento di una PdC, in regime invernale ed estivo, è schematizzato in Figura 12. I principali componenti di una PdC sono:

- 1) I due scambiatori di calore: evaporatore lato sorgente fredda (terreno, in inverno) e condensatore, che cede calore all'ambiente da riscaldare (in inverno);
- 2) il compressore, che porta il fluido dalla bassa all'alta pressione comportando un consumo elettrico;

3) la valvola di laminazione, che permette di invertire il processo.

In estate, le componenti sono le stesse ma si inverte il ciclo rispetto al regime invernale: il calore in eccesso nell'ambiente fa evaporare il fluido refrigerante nell'evaporatore (lato utenza) e successivamente viene trasferito tramite il condensatore (lato terreno) nel sottosuolo [20].

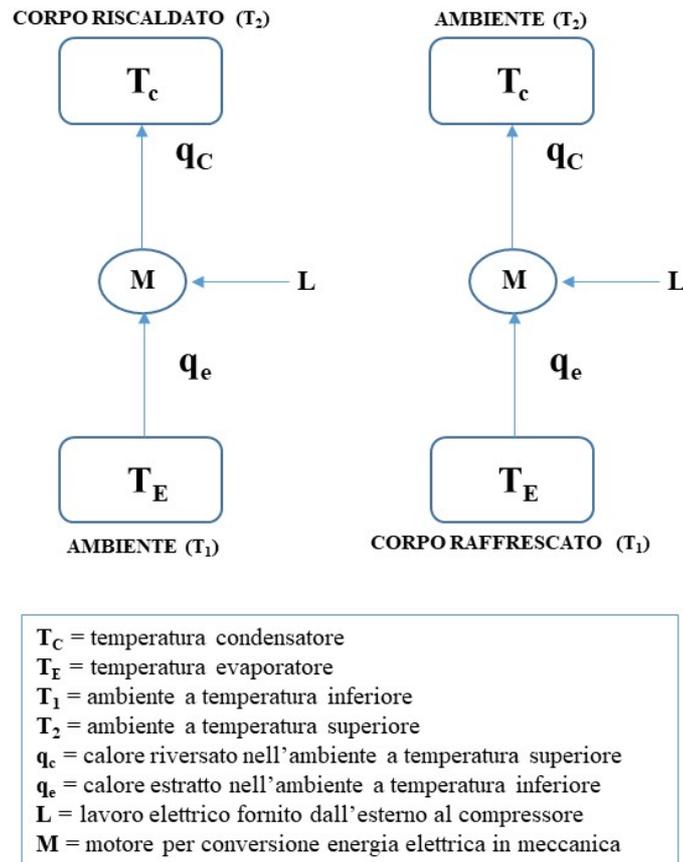


Figura 12: Schema di funzionamento di una pompa di calore in regime invernale ed estivo (da [20], modificata)

Il geotermico diventa conveniente quando il salto termico è il più contenuto possibile: si useranno quindi impianti di riscaldamento che funzionano con terminali a bassa temperatura (30°- 40° C), rispetto a quelli tradizionali che richiedono invece temperature dell'ordine di 70 °C (radiatori). Le due possibili alternative sono rappresentate dai sistemi diffusi (pannelli radianti), in cui la trasmissione del calore avviene per irraggiamento, oppure dai sistemi concentrati (ventilconvettori), in cui la trasmissione del calore avviene per moto convettivo.

2.3 Impatto dei sistemi geotermici closed loop

I principali rischi potenziali connessi alla realizzazione di un sistema geotermico *closed loop* sono legati agli aspetti idrogeologici e termogeologici [21-23].

Per ciò che concerne gli aspetti idrogeologici, i principali rischi possono essere determinati dalla trivellazione di un sito contaminato, dall'interconnessione di due o più falde sovrapposte oppure dalla perforazione di una falda artesianiana. Pertanto, in fase di perforazione del pozzo geotermico è necessario installare e cementare un *casing* in acciaio di lunghezza opportuna. La miscela sigillante deve avere bassa permeabilità e alta conducibilità termica, al fine di fornire un ulteriore elemento di protezione contro l'eventuale trasporto di contaminanti.

L'interconnessione di più falde acquifere potrebbe comportare il cambiamento di chimismo nelle acque (es. acqua salina che fluisce in acqua dolce). È necessario che il tetto dell'acquifero sia isolato ermeticamente dal *casing* temporaneo. Nel caso in cui si verifichi una perforazione della falda artesianiana, la fuoriuscita incontrollata di acqua può ridurre significativamente le risorse idriche sotterranee, oltre a essere considerata un'estrazione illegale ai sensi della legislazione sulle risorse idriche. Da qui discende la grande importanza di uno studio preliminare sulla geologia e l'idrogeologia della zona.

Relativamente al rischio termogeologico, è noto che quando si estrae calore da una sonda geotermica la temperatura del sottosuolo nel suo intorno diminuisce. Di conseguenza, è possibile che tra due sistemi *closed loop* troppo vicini si verifichi il fenomeno di interferenza termica. Alcuni sistemi a sonde geotermiche possono operare a temperature sotto lo zero, creando così zone di terreno ghiacciato attorno alle sonde. Questo fattore aumenta la conducibilità termica del terreno ma può avere un impatto sulle strutture, sulla vegetazione, sulle comunità microbiologiche e sulle proprietà del suolo. In modalità di raffreddamento si dovrà considerare il rischio potenziale dovuto alla migrazione del vapore e all'essiccazione progressiva dei suoli.

3. DIMENSIONAMENTO DELL'IMPIANTO GEOTERMICO DA REALIZZARE NEL C.R. CASACCIA

3.1 Considerazioni preliminari

Date le dimensioni dell'area concessa dalla Direzione di Centro per la realizzazione dell'impianto geotermico sperimentale, tra le configurazioni a circuito chiuso disponibili si è optato per le sonde geotermiche verticali (SGV) a diversa profondità, con configurazione a doppia U (Figura 13) [24]. Come è noto, oltre una certa profondità ("zona neutra di omotermia", situata a circa 15-18 m dal piano campagna alle nostre latitudini) la temperatura rimane costante nel corso dell'anno (Figura 14) [25,26]. Pertanto, lo scambio termico tra la SGV in polietilene e il terreno circostante avviene attraverso la trasmissione del calore per conduzione e convezione. Le SGV vengono installate in fori trivellati e lo spazio restante anulare viene riempito con malta cementizia opportunamente miscelata, al fine di assicurare continuità agli scambi termici.

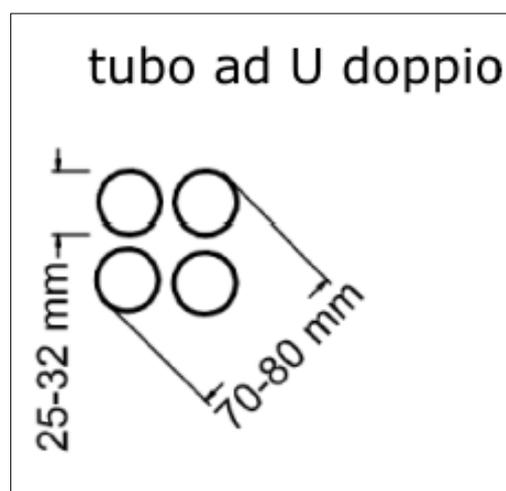


Figura 13: Sonda geotermica verticale, configurazione a doppia U. Vista in sezione [24]

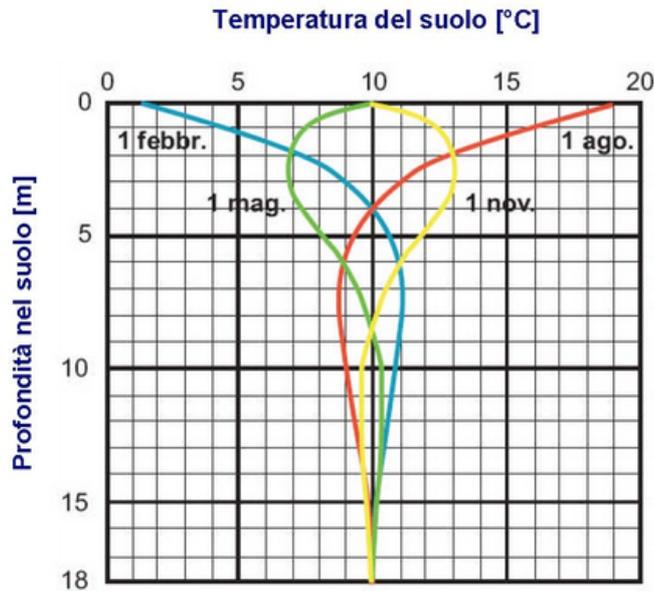


Figura 14: Andamento della temperatura del suolo in funzione della profondità [25,26]

Sulla base delle evidenze geologico-stratigrafiche acquisite dalle indagini pregresse, è stato deciso di realizzare quattro pozzi a diversa profondità: 35 m, 50 m, 80 m e 100 m. I pozzi saranno attrezzati con fibre ottiche al loro interno per monitorare costantemente le variazioni di temperatura tra la stagione estiva e invernale. In particolare, durante il terzo anno di attività del progetto, si osserverà in quale misura lo *storage* del calore durante l'estate influirà sull'apporto di calore fornito nella stagione invernale.

Poiché le formazioni geologiche nell'area di studio sono principalmente di origine vulcanica, può essere assunto un valore di conducibilità termica media pari a 1,7 W/mK a cui corrisponde una resa termica del pozzo pari a circa 50 W per metro lineare di sonda installata. È chiaro che tali valori, al momento necessariamente stimati, potranno essere determinati con certezza soltanto dopo l'effettuazione del GRT. Così come dai risultati di questa prova sarà decisa la destinazione di tale calore, se dovrà asservire un'utenza oppure dovrà essere inviato direttamente in un serbatoio di accumulo, sistema ausiliario che interverrà nei periodi di richiesta da parte della PdC durante particolari condizioni stagionali.

Stante questa premessa, si è proceduto con il dimensionamento dell'impianto per climatizzare una superficie (ufficio) di 140 m², ubicata al secondo piano dell'edificio F40 nel C.R. ENEA-Casaccia. Il passo successivo è stato determinare i fabbisogni termici richiesti dall'utenza per il riscaldamento e il raffrescamento. In particolare, l'area ricade nel comune di Roma, che rientra nella Zona Climatica D, caratterizzata da un valore di 1415 Gradi Giorno (GG). Per GG si intende la somma, estesa a tutti i giorni del periodo di riscaldamento

convenzionale, delle sole differenze di temperature positive fra la temperatura interna di progetto e quella esterna media giornaliera; quanto più alto è il valore dei GG tanto più il clima è rigido.

Il periodo dell'anno nel quale è consentito tenere in funzione gli impianti di riscaldamento e il numero massimo giornaliero di ore di accensione dipendono dal clima della località ove è ubicato l'edificio. Gli impianti termici destinati alla climatizzazione invernale degli ambienti devono essere condotti in modo che, durante il loro funzionamento, non vengano superati i valori massimi di temperatura fissati.

L'esercizio degli impianti termici è consentito con limiti massimi, relativi alla durata giornaliera di attivazione e al periodo annuale di esercizio. Per la Zona Climatica D l'esercizio degli impianti, in ambito residenziale, è di dodici ore giornaliere, per un periodo che va dal 1° novembre al 15 aprile. Al di fuori di tali periodi gli impianti termici possono essere attivati solo in presenza di situazioni climatiche che ne giustifichino l'esercizio e comunque con una durata giornaliera non superiore alla metà di quella consentita a pieno regime. È consentito il frazionamento dell'orario giornaliero di riscaldamento in due o più sezioni. La durata di attivazione degli impianti dovrà essere comunque compresa tra le ore 5 e le ore 23 di ciascun giorno.

Nel caso di studio, considerando che l'utenza è un ufficio, nel periodo suddetto i giorni lavorativi sono 113. Il periodo di funzionamento considerato è di dieci ore, pertanto le ore di riscaldamento annuale saranno 1130. Il valore limite per il fabbisogno annuo di energia primaria nel periodo invernale per m² di superficie utile dell'edificio dipende dal fattore di forma (rapporto tra la superficie e il volume dell'ambiente (S/V)) e dalla zona climatica in cui ricade. Nel caso specifico, in base all'Allegato C del D.Lgs. 2006/311, riguardante le disposizioni correttive e integrative al D.Lgs. 2005/192, recante attuazione della Direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia, considerando una superficie di 140 m², un volume di 378 m³ e un'altezza del soffitto pari a 2,7 m, si evince che il valore limite per la climatizzazione invernale è pari 68 kWh/m² all'anno (Tabella 6).

TABELLA 1.3		EP_i limite dal 1 gennaio 2010								
		Valori limite per la climatizzazione invernale espressi in kWh/m² anno								
		Zona climatica								
S/V	A	B		C		D		E		F
	<600 GG	601 GG	900 GG	901 GG	1400 GG	1401 GG	2100 GG	2101 GG	3000 GG	>3000 GG
≤0.2	8.5	8.5	12.8	12.8	21.3	21.3	34	34	46.8	46.8
≥0.9	36	36	48	48	68	68	88	88	116	116

Tabella 6: Valori limite per la climatizzazione invernale in kWh/m² per anno (Allegato C del D.Lgs. 2006/311)

Nel periodo considerato della stagione invernale (113 giorni lavorativi) l'energia media da consumare al giorno per m² è:

$$Ed = \frac{E}{D} = \frac{68 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{a}}{113} = 0,60 \text{ kWh} / \text{m}^2$$

La quantità di energia termica annuale è data da:

$$Et \text{ annuale} = S * E = 140 \text{ m}^2 * 68 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}} = 9520 \text{ kWh} / \text{a}$$

La potenza media può essere così definita:

$$Qm = Ed * \frac{S}{\text{ore di funzionamento}} = 0,60 * \frac{140}{10 \text{ ore}} = 8,4 \text{ kW}$$

La differenza di temperatura media è pari a:

$$\Delta tm = \frac{1415 \text{ GG}}{113 \text{ giorni di riscaldamento}} = 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

A questo punto è possibile determinare la potenza nominale o di picco, richiesta dall'utenza nella condizione più critica, come segue:

$$Pt \text{ nominale / picco} = \frac{Et \text{ annuale} (ti - tp)}{\text{GG} * \text{ore funzionamento}} = \frac{9520 \text{ kWh} (20 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C})}{1415 * 10 \text{ ore}} = 13,45 \text{ kWt}$$

dove t_i è la temperatura interna e t_p è la temperatura di progetto. Per la città di Roma, la t_p , ovvero in condizioni critiche, sarà uguale a 0 (zona climatica D e GG 1415).

Inoltre, è stata calcolata la potenza per le medie mensili e la potenza di picco mensile (Tabella 7). Riguardo alle temperature medie mensili (T_m in Tabella 7), sono stati utilizzati i valori medi mensili della temperatura media giornaliera dell'aria esterna relativi alla città di Roma, riportati nella norma UNI 10349-2016 riguardante i dati climatici per la climatizzazione degli edifici.

Fabbisogno totale mensile (inverno)	Tm (°C)	Potenza per le medie mensili (kW)	Potenza di picco mensile (kW)
Novembre	12,6	4,98	0,007036
Dicembre	8,9	7,46	0,010555
Gennaio	7,6	8,34	0,011791
Febbraio	8,7	7,60	0,010745
Marzo	11,4	5,78	0,008178
Aprile (fino al 15)	11,7	5,58	0,007892

Tabella 7: Potenza per le medie mensili e potenza di picco mensile (kW) in inverno. Tm: temperatura media

A questo punto, definiti i carichi termici annuali e di picco per le medie mensili richieste dall'utenza, è necessario procedere al dimensionamento delle sonde verticali. A tal fine è stato utilizzato il software *GeoHeatCal* [20], sviluppato sia per il dimensionamento di sistemi di sonde geotermiche verticali abbinata a PdC, sia per il riscaldamento e il raffrescamento di utenze. Il dimensionamento consentirà di determinare la lunghezza complessiva delle sonde da installare nel terreno per soddisfare il fabbisogno termico e frigorifero precedentemente calcolato.

Il software esegue il dimensionamento sulla base del metodo ASHRAE, ovvero a sorgente cilindrica, sviluppato da Kavanaugh e Rafferty [27]; successivamente, il codice è stato modificato da Zeng et al. [28] con l'inserimento di un algoritmo basato sul metodo quasi-tridimensionale. Nelle equazioni si tiene conto della geometria e disposizione dello scambiatore e dei parametri costruttivi dello stesso. I parametri progettuali considerati sono:

- temperature del terreno indisturbato e del fluido in ingresso alla PdC lato sorgente;
- portata e proprietà del fluido (tipo, densità, viscosità, regime di flusso, conducibilità e diffusività termica);
- proprietà del suolo (conducibilità e diffusività);
- proprietà dei tubi scambiatori (numero per pozzo, diametro, disposizione, caratteristiche termiche del grout);
- caratteristiche del campo sonde (numero, distanza, disposizione, tipo di circuitazione);

- carichi termici e frigorigeni dei giorni di progetto e ore annue equivalenti a pieno carico.
Le equazioni che permettono di calcolare la lunghezza complessiva delle sonde relativa al riscaldamento (Lc) e al raffreddamento (Lf) sono, rispettivamente:

$$L_c = \frac{q_a R_a + (q_{pc} - W_c) * (R_p + FCP_{mc} * R_m + R_g * F_{sc})}{T_s - \frac{T_{fin} + T_{fout}}{2} - T_p}$$

$$L_f = \frac{q_a R_a + (q_{pf} - W_f) * (R_p + FCP_{mf} * R_m + R_g * F_{sc})}{T_s - \frac{T_{fin} + T_{fout}}{2} - T_p}$$

dove:

q_a = flusso termico medio annuale (W) scambiato dalle sonde con il terreno;

q_{pc} e q_{pf} = carichi di progetto (W) necessari, rispettivamente, per riscaldare e raffreddare;

FCP_{mc} e FCP_{mf} = fattore di carico parziale mensile durante il mese di progetto in riscaldamento e in raffreddamento;

W_c e W_f = potenze elettriche (W) assorbite dal compressore della PdC/refrigeratore in condizione di carico di progetto;

T_s = temperatura del sottosuolo indisturbato;

T_p = temperatura di penalizzazione determinata dal disturbo termico reciproco di scambiatori presenti nel campo sonde;

T_{fin} e T_{fout} = temperature del fluido, rispettivamente in ingresso e in uscita alla PdC lato sonde;

R_a = resistenza termica del terreno dovuta a un impulso termico annuale;

R_m = resistenza termica del terreno dovuta a un impulso termico mensile;

R_g = resistenza termica del terreno dovuta a un impulso termico giornaliero;

R_p = resistenza termica del pozzo dovuta a un impulso termico annuale;

F_{sc} = fattore di cortocircuito (-) dovuto all'interferenza termica tra lo stelo in andata e in ritorno.

Nelle due equazioni, si considera il processo di trasferimento del calore attraverso il terreno e il pozzo sia nella parte esterna, sia nella porzione interna del pozzo stesso, che

comprende il materiale di riempimento, le sonde verticali e il fluido termovettore. Per questo motivo si considerano due tipi di resistenze termiche, l'una associata al terreno e l'altra al pozzo. Il carico termico medio annuale assorbito o ceduto dal terreno è così calcolato:

$$q_a = \frac{q_{pc} * C_c * OEC_c + q_{pf} * C_f * OEC_f}{8760}$$

dove:

OEC_f e OEC_c = rappresentano le ore equivalenti del carico di picco per il raffrescamento e il riscaldamento;

8760 = ore in un anno.

Le ore equivalenti di picco rappresentano il numero delle ore di esercizio del sistema se questo fosse a carico massimo per tutto l'anno. I valori di C_f e C_c corrispondono a:

$$C_f = \frac{EER + 1}{EER} \quad C_c = \frac{COP - 1}{COP}$$

La resistenza termica del pozzo R_p viene determinata utilizzando il modello analitico quasi-tridimensionale di Zeng et al. [28], in grado di stimare l'effetto del cortocircuito termico tra le sonde. Un altro parametro sensibile preso in considerazione nel metodo ASHRAE è la temperatura del fluido in ingresso e in uscita alla PdC, i cui valori dipendono a loro volta dalla temperatura indisturbata del terreno e dalle caratteristiche della PdC.

In modalità riscaldamento, per evitare l'impiego di soluzioni anticongelanti nelle sonde è necessario che la temperatura in ingresso alla PdC sia di almeno 3 - 4 °C. La temperatura del terreno varia per effetto dell'estrazione/immissione di energia dal/nel terreno: se il calore estratto dal terreno in inverno viene compensato dal calore immesso durante l'estate, la temperatura media attorno allo scambiatore di calore cambierà poco e quindi l'efficienza delle sonde geotermiche non diminuirà durante gli anni di funzionamento dell'impianto. Un fattore che incide sulla penalizzazione della temperatura T_p nei pressi delle sonde è rappresentato dalla distanza tra le sonde stesse; per questo motivo, è stata definita una distanza reciproca accettabile non inferiore a 7 - 8 m.

3.2 Simulazione con il codice di calcolo

Il modulo relativo alle sonde geotermiche verticali permette di considerare diversi aspetti progettuali, quali:

- tipologia dello scambiatore (singolo, doppia U);
- diametro dei tubi e del pozzo;
- conducibilità termica del terreno e del materiale di riempimento;
- tipo di tubi;
- tipo di fluido termovettore;
- caratteristiche del campo sonde (distanziamento, disposizione geometrica dei pozzi);
- periodo di calcolo della variazione termica nel terreno.

Oltre al dimensionamento dell'impianto, il software permette di calcolare analiticamente i parametri termofisici del fluido termovettore, la resistenza termica del pozzo e l'incremento/diminuzione della temperatura media attorno alle sonde stesse.

Inizialmente, in un riquadro specifico, devono essere inseriti i carichi termici e frigoriferi, richiesti dall'utenza, in corrispondenza del giorno di progetto: il giorno più freddo (in inverno) e più caldo (in estate). La fascia oraria considerata è dalle 8:00 alle 20:00, per cinque giorni settimanali. La durata equivalente del carico di picco viene espressa in ore per il periodo invernale (708 h) ed estivo (476 h) e rappresenta il numero delle ore di funzionamento che servirebbero per soddisfare il fabbisogno termico totale se la PdC lavorasse a pieno carico. Il fattore di carico mensile viene calcolato automaticamente, per ogni mese, in riscaldamento e in raffrescamento, e rappresenta il rapporto tra il fabbisogno termico mensile reale e il fabbisogno necessario se l'intero sistema lavorasse sempre a pieno carico. Viene inoltre individuato il fattore di carico mensile del mese più critico sia in riscaldamento, sia in raffrescamento (Figura 15).

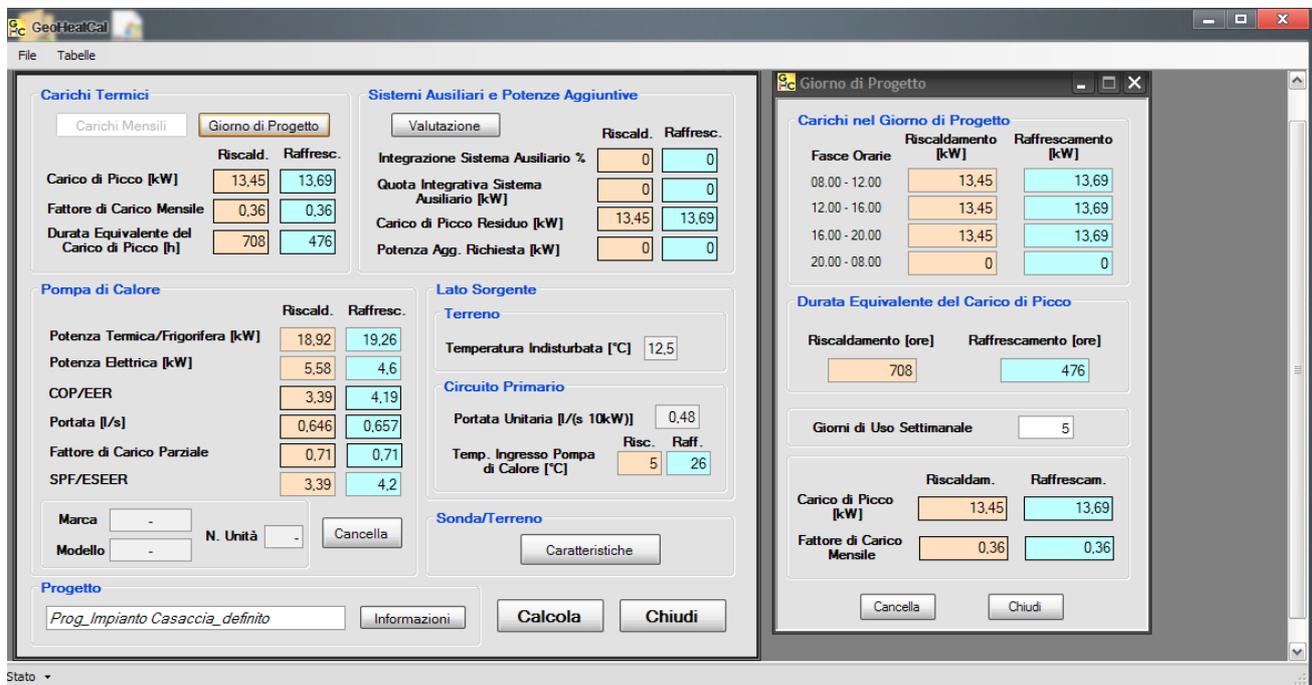


Figura 15: Carichi di picco invernali ed estivi (software *GeoHeatCal* [20])

I dati relativi alla PdC sono stati estrapolati dalla scheda tecnica della PdC geotermica commerciale *AQUA BLDC - aqua inverter* prodotta dall'azienda *Global System Integration* (GSI). In particolare, è stata scelta la PdC associata ai terminali di utilizzo fancoil, sia per il funzionamento invernale che per quello estivo (Figura 16).

Nello specifico, in modalità di funzionamento invernale è stata scelta la PdC di potenza termica pari a 18,92 kW in quanto è in grado di soddisfare il carico di picco calcolato per l'utenza. La stessa, in modalità di funzionamento estivo fornisce al sistema una potenza frigorifera pari a 19,26 kW. Pertanto, nel software di simulazione sono stati inseriti i dati relativi alla potenza termica, frigorifera ed elettrica della macchina prescelta. Il software fornisce anche il valore del coefficiente di prestazione sia in riscaldamento che in raffrescamento (COP/EER). Inoltre, fornisce il valore della portata (l/s) in funzione del carico di picco e della portata unitaria che rappresenta la portata del fluido che effettivamente scorre nel circuito primario (Figura 15).

Il fattore di picco parziale indica il rapporto tra il carico di picco e la potenza termica totale della PdC. Nella sezione Lato Sorgente sono stati inseriti diversi parametri, quali la temperatura indisturbata del terreno, assunta pari a 12,5 °C, la portata unitaria del fluido termovettore (0,48 l/s 10 kW) e la temperatura di ingresso nella PdC sia per il riscaldamento (6 °C) che per il raffrescamento (26 °C) (Figura 15).

Dati Tecnici (Geotermia)

Technical Data (Geothermal)

AQUA INVERTER	Mod	107		112		114		122		130		135		142	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
FUNZIONAMENTO: INVERNALE - B0/W35 Geo/Radiante / OPERATION: WINTER - B0/W35 Geo / Radiant Floor															
Potenza Termica / Thermal Power	kW	2,02	8,02	3,01	11,84	3,95	14,25	5,17	20,07	7,22	29,94	8,83	36,59	10,29	42,67
Portata acqua Imp. / Plant water flow	m3/h	0,35	1,38	0,52	2,04	1,23	2,45	1,72	3,45	2,47	5,15	3,02	6,29	3,52	7,34
P.A. Totale / Total Power Consumption	kW	0,34	1,61	0,54	2,34	0,73	3,04	1,02	4,33	1,37	6,31	1,60	7,37	1,97	9,03
COP		6,02	4,97	5,63	5,06	5,40	4,68	5,09	4,63	5,25	4,74	5,50	4,96	5,23	4,72
FUNZIONAMENTO: INVERNALE - B0/W45 Geo/FanCoil / OPERATION: WINTER - B0/W45 Geo/FanCoil															
Potenza Termica / Thermal Power	kW	1,75	7,23	2,68	10,80	3,54	13,22	4,73	18,92	6,59	28,17	8,02	34,29	9,39	40,17
Portata acqua Imp. / Plant water flow	m3/h	0,30	1,24	0,46	1,86	0,61	2,27	0,81	3,25	1,13	4,85	1,38	5,90	1,62	6,91
P.A. Totale / Total Power Consumption	kW	0,45	2,01	0,73	2,96	1,00	3,85	1,41	5,58	1,91	8,13	2,23	9,49	2,74	11,63
COP		3,87	3,60	3,67	3,65	3,54	3,44	3,35	3,39	3,45	3,46	3,59	3,61	3,43	3,45
FUNZIONAMENTO: INVERNALE - B0W55 Geo/Radiatori / OPERATION: WINTER - B0/W55 Geo/Radiators															
Potenza Termica / Thermal Power	kW	1,52	6,72	2,41	10,19	3,22	12,67	4,44	18,47	6,15	27,42	7,43	33,22	8,77	39,12
Portata acqua Imp. / Plant water flow	m3/h	0,26	1,16	0,41	1,75	0,55	2,18	0,76	3,18	1,06	4,72	1,28	5,71	1,51	6,73
P.A. Totale / Total Power Consumption	kW	0,60	2,52	0,99	3,79	1,37	4,92	1,99	7,27	2,69	10,59	3,14	12,37	3,85	15,15
COP		2,52	2,67	2,43	2,69	2,35	2,58	2,23	2,54	2,28	2,59	2,36	2,69	2,28	2,58
FUNZIONAMENTO: ESTIVE - B30W7 Geo/FanCoil / OPERATION: SUMMER - B30/W7 Geo/FanCoil															
Potenza Frigorifera / Cooling Power	kW	1,67	7,79	2,49	11,55	3,24	13,71	4,22	19,26	5,94	28,90	7,33	35,68	8,45	41,16
Portata acqua Imp. / Plant water flow	m3/h	0,29	1,34	0,43	1,99	0,56	2,36	0,73	3,31	1,02	4,97	1,26	6,14	1,45	7,08
P.A. Totale / Total Power Consumption	kW	0,41	1,72	0,66	2,47	0,89	3,23	1,24	4,60	1,67	6,70	1,95	7,83	2,39	9,59
EER		4,05	4,53	3,81	4,67	3,62	4,24	3,41	4,19	3,55	4,31	3,75	4,56	3,53	4,29
FUNZIONAMENTO: ESTIVE - B30W18 Geo/Radiante / OPERATION: SUMMER - B30/W18 Geo/Radiant Floor															
Potenza Frigorifera / Cooling Power	kW	1,86	9,76	2,84	14,54	3,68	17,42	4,80	24,46	6,75	36,70	8,33	45,31	9,61	52,26
Portata acqua Imp. / Plant water flow	m3/h	0,32	1,68	0,49	2,50	0,63	3,00	0,83	4,21	1,16	6,31	1,43	7,79	1,65	8,99
P.A. Totale / Total Power Consumption	kW	0,50	2,04	0,79	2,94	1,07	3,78	1,44	5,29	1,94	7,71	2,27	9,01	2,78	11,03
EER		3,70	4,79	3,60	4,94	3,44	4,61	3,34	4,62	3,47	4,76	3,67	5,03	3,46	4,74
DATI GENERALI / GENERAL DATA															
Refrigerante / Refrigerant		R410A													
Carica / Charge	Kg	1,20	1,75	2,30	3,20	3,70	4,20	4,70							
P. Max Assorbita / Max Power Absorbed [+]	kW	3,20	4,47	5,53	9,07	11,88	13,52	16,61							
C. Max Assorbita Monofase / Current Max Absorb. Single-phase [+]	A	14,66	20,47	25,35	n.d	n.d	n.d	n.d							
C. Max Assorbita Trifase / Current Max Absorb. Three-phase [+]	A	6,34	8,27	10,73	16,33	21,50	23,99	28,81							
Classe Energetica / Energy Class		A++	A++	A++	A++	A++	A++	A++							
Circuiti frigoriferi / Refrigerant circuits	n°	1	1	1	1	1	1	1							
Gradini di parzializzazione / Staging steps	n°	Inverter	Inverter	Inverter	Inverter	Inverter	Inverter	Inverter							
Compressori / Compressor	n°	1	1	1	1	1	1	1							
Tensione alimentazione / Power supply	V/Hz/Ph	230/1/50 - 400/3/50						400/3/50							
Pressione sonora Lp / Sound pressure Lp*	dB(A)	43,20	46,40	46,40	47	47	48	49,1							
Lunghezza / Length	L	mm	690	690	690	890	890	1090							
Profondità / Depth	P	mm	720	720	720	900	900	1000							
Altezza / Height	H	mm	1220	1220	1220	1220	1220	1110							
Interasse ACS / DHW Wheelbase	IACS	mm	85	85	85	85	85	140							
Interasse Imp / Plant Wheelbase	IIMP	mm	85	85	85	85	85	150							
Interasse Geo / Geo Wheelbase	IGEO	mm	85	85	85	85	85	150							
Interasse Sx / Left Distance	ISX	mm	103	103	103	130	130	167							
Interasse 1 / 1 Wheelbase	IM1	mm	115	115	115	175	175	140							
Interasse 2 / 2 Wheelbase	IM2	mm	115	115	115	175	175	140							
Interasse Dx / Right Distance	IDX	mm	103	103	103	152	152	154							
Peso / Weight	Kg	180	190	200	250	280	280	420							

[+]= Valori di dimensionamento linee elettriche e protezione magnetotermica differenziali
 * Distanza misurata ad 1 metro in campo libero

[+]= Electricity dimensioning values and differential magnetic protection
 * Measured distance to 1 meter in free field

Figura 16: Scheda tecnica della PdC geotermica *AQUA BLDC - aqua inverter* (GSI). I riquadri in rosso si riferiscono alle caratteristiche del modello scelto per la simulazione in questo studio

La sezione sonda/terreno consiste di tre schede:

- Terreno;
- Campo Sonde;
- Tubo + Fluido.

Nella scheda Terreno (Figura 17) è stato inserito il valore della conducibilità termica del tufo, assunta pari a 1,7 W/mK.

	Spessore [m]	Conducibilità Termica [W/(mK)]	Diffus. Termica [m ² /giorno]
Strato 1			
Strato 2			
Strato 3			
Strato 4			
Strato 5			
Strato 6			

Figura 17: Scheda terreno (software *GeoHeatCal* [20])

Nella scheda Campo Sonde (Figura 18) è stata definita la disposizione dei quattro pozzi che costituiranno il campo sonde. In funzione del numero indicato di circuiti in serie e in parallelo, il software determina le portate di circolazione del fluido termovettore in ciascuna sonda sia in riscaldamento che in raffreddamento. Inoltre, è possibile inserire il periodo di dimensionamento (10 anni), ovvero il tempo necessario affinché le temperature attorno alle sonde si stabilizzino. Nello specifico, sono stati considerati due circuiti paralleli, uno di mandata e un altro di ritorno che collegano ognuna delle quattro sonde al collettore. Il numero di sonde per circuito è pari a quattro, ovvero due di mandata e due di ritorno.

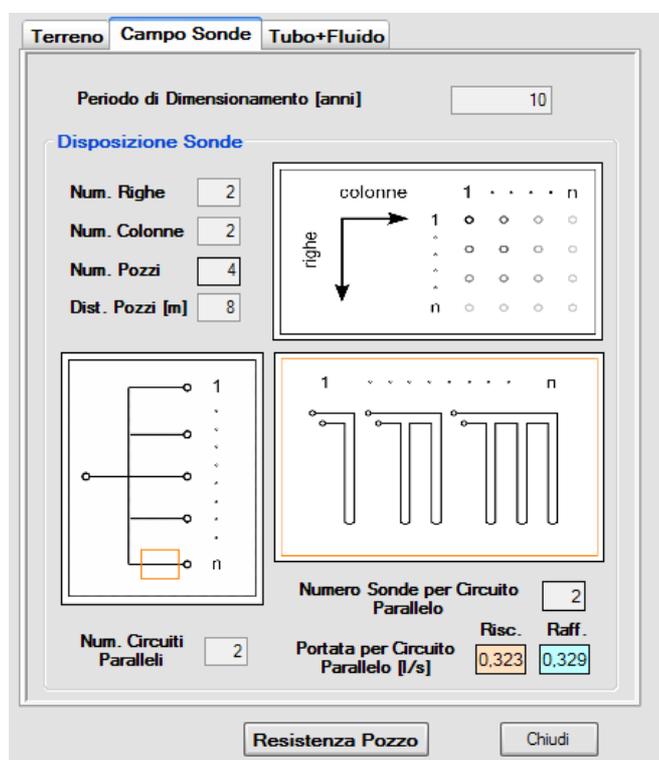


Figura 18: Scheda Campo Sonde (software *GeoHeatCal* [20])

Nella scheda Tubo + Fluido (Figura 19) sono state definite tutte le caratteristiche tecniche relative alla singola sonda. Il diametro esterno nominale della sonda, in cui scorrerà il fluido termovettore, è pari a 32 mm. Il fluido termovettore sarà acqua, senza aggiunta di anticongelanti. La conducibilità termica del grout (2 W/mK) è relativa al tipo di cemento che verrà utilizzato (TermoplastPLUS® oppure FassaGEO100®). Infine, la configurazione delle sonde scelta è la doppia U, ovvero due tubi in polietilene (diametro 32 mm) di mandata e due di ritorno.

The image shows a software interface for configuring geothermal well parameters. It is organized into three main sections: 'Tubo' (Pipe), 'Fluido' (Fluid), and 'Pozzo' (Well).
 - **Tubo:** 'Diametro Nominale del Tubo' is set to 32 mm, 'Tipo' is PE100 SDR11. 'Diam. Esterno [mm]' is 32 and 'Diam. Interno [mm]' is 26. A 'Tabelle Tubi' button is present.
 - **Fluido:** 'Temp. Ingresso Pompa [°C]' has two values: 5 (highlighted in orange) for heating ('Riscald.') and 26 (highlighted in cyan) for cooling ('Raffres.'). 'Soluzione' is 'acqua' and the percentage is 100%. A 'Tabelle Fluidi' button is present.
 - **Pozzo:** 'Diametro del Pozzo [mm]' is 150, 'Spaziatura Tubi' is 'centrati', and 'Conducib. Termica del Grout [W/(mK)]' is 2. Two diagrams illustrate 'Singola U' (single U-tube) and 'Doppia U' (double U-tube) configurations. A 'Tabelle Grout' button is present.
 At the bottom, there are 'Resistenza Pozzo' and 'Chiudi' buttons.

Figura 19: Scheda Tubo + Fluido (software *GeoHeatCal* [20])

A questo punto è possibile consultare tutti i parametri legati alle sonde geotermiche e al fluido che scorre nel loro interno. Nel dettaglio, in Figura 20 sono espresse le grandezze termofisiche del fluido termovettore acqua (T , densità, conducibilità termica, calore specifico, viscosità dinamica, numero di Prandtl) e le grandezze relative alla portata per flusso parallelo, numero di Reynolds, regime di flusso e numero di Nusselt. Sono riportate, infine, anche le resistenze equivalenti del fluido e del tubo.

Soluzione		
Soluzione	acqua	% 100
	Riscald.	Raffresc.
Temperatura [°C]	5	26
Densità [kg/m ³]	1000,14	996,47
Conducib. Termica [W/(mK)]	0,56871	0,60032
Calore Specifico [kJ/(kgK)]	4,20732	4,19806
Viscosità Dinam. [Pa s]	0,0015	0,00085
Numero di Prandtl	10,96	5,9
Temperatura di Congelamento [°C]	0	
Flusso		
Port. per Circ. Parallelo [l/s]	0,323	0,329
Portata per Stelo [l/s]	0,161	0,164
Numero di Reynolds	5282,4	9379,9
Regime del Flusso	Transiz.	Transiz.
Numero di Nusselt	60,4411	76,3077
Resistenze Equivalenti		
Resistenza del Fluido [mK/W]	0,00116	0,00087
Resistenza del Tubo [mK/W]	0,02146	0,02146

Figura 20: Scheda parametri sonde geotermiche e fluido (software GeoHeatCal [20])

Dopo aver settato tutti i dati di input si ottiene il dimensionamento dell'impianto (Figura 21). Il software fornisce la lunghezza totale delle sonde necessaria a soddisfare il fabbisogno energetico richiesto dall'utenza. Tale valore corrisponderà, pertanto, alla lunghezza totale di perforazione. Nel caso di studio la lunghezza totale dei pozzi ottenuta è 268,7 m, valore che rientra perfettamente nell'ipotesi di partenza, ovvero di considerare quattro pozzi a diversa profondità per una lunghezza complessiva di 265 m (35 m, 50 m, 80 m e 100 m). Nella scheda del dimensionamento è riportato anche il valore della resa termica delle sonde (espressa in W/m), che corrisponde al calore che le sonde riescono a prelevare dal terreno durante l'inverno e a inviare all'evaporatore della PdC nelle condizioni di progetto. In raffreddamento, è il calore che viene prelevato dall'ambiente interno e stoccato nel sottosuolo tramite le sonde, sempre in condizioni di progetto. La temperatura di penalizzazione del terreno esprime il degrado termico medio del terreno dovuto all'esercizio del campo sonde nella stagione invernale. In raffreddamento, invece, rende conto dell'innalzamento medio della temperatura del terreno indisturbato conseguentemente all'esercizio del campo geosonde.

Dai risultati del dimensionamento si constata come la potenza termica fornita dal terreno consenta alla PdC di raggiungere rendimenti molto elevati con consumi elettrici ridotti da parte del compressore, sia nella fase di riscaldamento che in quella di raffrescamento.

Lungh. Totale [m]	268,7	Resa Termica Sonda [W/m]	63,1
Lungh. Sing. Sonda [m]	67,2	Temp. Penaliz. Terreno [°C]	0,04
Numero Sonda	4	Temp. Congelamento [°C]	0

	Riscald.	Raffresc.
Temperatura Ingresso Pompa di Calore [°C]	5	26
Temperatura Uscita Pompa di Calore [°C]	1,51	32,17
ΔT Ingresso/Uscita Pompa di Calore [°C]	-3,49	6,17
Carico di Picco [kW]	13,45	13,69
Potenza Sistema Ausiliario [kW]	0	0
Percentuale Sistema Ausiliario [%]	0	0
Potenza Term. Effettiva Pompa di Calore [kW]	13,45	13,69
Potenza Term. Nominale Pompa di Calore [kW]	18,92	19,26
Fattore di Carico Parziale	0,71	0,71
Potenza Term. Prelevata/Riversata Terreno [kW]	9,48	16,96
Potenza Elett. Effettiva Pompa di Calore [kW]	3,97	3,27
Potenza Elett. Nominale Pompa di Calore [kW]	5,58	4,6
COP/EER Nominale Pompa di Calore	3,39	4,19
SPF/ESEER Pompa di Calore	3,39	4,2
Potenze Elettriche Aggiuntive [kW]	0	0
COP/EER Sistema	3,39	4,2
Portata Circuito Primario [l/s]	0,646	0,657
Portata per Sonda [l/s]	0,323	0,329
Regime di Flusso	Transiz.	Transiz.

Figura 21: Output del dimensionamento dell'impianto geotermico a sonde verticali (software *GeoHeatCal* [20])

Da ultimo, è stato possibile effettuare una prima valutazione dell'impatto energetico ed ambientale del sistema geotermico dimensionato. Pertanto, in funzione dei fabbisogni energetici e dei fattori di emissione di CO₂ e NO_x, il software permette di effettuare una stima di massima dei costi di gestione del sistema, del fabbisogno di energia primaria dell'edificio e delle emissioni inquinanti in atmosfera (Figura 22).

	Riscald.	Raffresc.
Carico di Picco [kW]	13,45	13,69
Durata Equivalente del Carico di Picco [h]	708	476
Fabbisogno Energetico [kWh]	9522,6	6516,4
COP/EER Sistema	3,39	4,2
Fabbisogno Elettrico [kWh]	2809	1551,5
Tonnellate Equiv. Petrolio		
Fattore di Conversione dell'Energia Elettrica	0,4044	
Fabb. Energ. Primario [kWh]	6946,2	3836,6
Tonnellate Equiv. di Petrolio	0,6	0,33
Costi		
Costo dell'Energia [€/kWh]	0,2	
Costi Stimati [€]	561,8	310,3
EPI		
Superficie/Volume Utile Netta/o [m ²]/[m ³]	378	
Indice Prestaz. Energ. Involucro Edificio e Fabbisogno A.C.S [kWh/m ²]/[kWh/m ³]	25,19	17,24
Emissioni		
Fattore di Emissione di CO2 [kg/kWh]	383	
Emissioni di CO2 [t]	0	0
Fattore di Emissione di NOx [kg/kWh]	0,000227	
Emissioni di NOx [kg]	0,64	0,35

Figura 22: Consumi energetici ed emissioni (software GeoHeatCal [20])

Di seguito si riporta una stima dei costi stagionali dovuti al consumo di energia elettrica per il riscaldamento/raffrescamento e le emissioni in atmosfera legate alle centrali di produzione elettrica. Inoltre, è stato calcolato il fabbisogno di energia primaria dell'edificio, sia per il riscaldamento (9522,6 kWh) che per il raffrescamento (6516,4 kWh), in funzione del fabbisogno energetico dell'edificio, del fattore di conversione dell'energia elettrica e dell'efficienza della PdC. Viene riportato anche il valore EPI dell'edificio, che tiene conto del fabbisogno energetico dell'utenza e della produzione della acqua calda sanitaria (D.Lgs. 192/2005. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia). Sulla base del fabbisogno energetico, sia in fase di riscaldamento che di raffrescamento, viene determinato il fabbisogno elettrico, inteso come il consumo elettrico della PdC, rispetto ai valori del COP/EER del sistema.

Il fattore di conversione dell'energia elettrica, che indica il valore del rendimento di produzione dell'energia elettrica in Italia, è stato fissato pari a 0,4044 tep/kWh. L'inserimento di tale dato permette di calcolare in modo automatico il fabbisogno energetico primario dell'edificio sulla base del fabbisogno energetico e dell'efficienza della PdC utilizzata, e lo stesso in tonnellate equivalenti di petrolio (tep), sia in inverno che in estate.

Per il costo dell'energia si è considerato un costo medio pari a 0,2 €/kWh¹. Il sistema, con l'inserimento di questo dato, fornisce una stima dei costi imputabili al consumo elettrico complessivo da parte del compressore sia in inverno (561,8 €), sia in estate (310,3 €).

Il dato del volume utile netto dell'ufficio ha permesso il calcolo dell'indice di prestazione energetico dell'involucro edilizio e del fabbisogno dell'acqua calda sanitaria (ACS), sia in inverno che in estate. Sono stati inseriti i valori dei fattori di emissione, rispettivamente di CO₂ (383 kg/kWh) e di NO_x (0,000227 kg/kWh). Il sistema calcola automaticamente le emissioni di CO₂ (t) e di NO_x (kg), sia in inverno che in estate, relativamente all'impianto geotermico dimensionato. È interessante notare che il sistema così concepito risulta ad impatto ambientale nullo in termini di emissioni di CO₂; pertanto, le sonde geoscambio accoppiate alle PdC rappresentano un utile strumento per contribuire all'abbattimento delle emissioni climalteranti.

3.3 Costo dell'impianto e valutazione dell'investimento

La realizzazione dell'impianto può essere sezionata e riassunta nelle seguenti attività: 1) allestimento del cantiere; 2) realizzazione del campo geosonde; 3) esecuzione del GRT; 4) collaudo delle sonde geotermiche; 5) realizzazione dei collegamenti orizzontali – tramite trincee – tra i quattro pozzi e il collettore.

- 1) Allestimento del cantiere. Trasferimento presso il cantiere dei materiali necessari per tutta la durata delle lavorazioni, trasporto dell'attrezzatura di perforazione e della strumentazione per il test geotermico. In genere, per questa attività preliminare il costo – a corpo – si attesta su 2.000 €.
- 2) Realizzazione del campo geosonde. I pozzi saranno realizzati come segue:
 - una perforazione a carotaggio continuo profonda 100 m, per poter disporre di campioni su cui effettuare in seguito determinazioni dirette di conducibilità termica e definire con esattezza assetto litostratigrafico e livello di falda nell'area prescelta;
 - tre perforazioni profonde 35 m, 50 m e 80 m, da eseguire a distruzione di nucleo.Questa fase comprende anche la fornitura delle sonde geotermiche, del tipo 4 X 32 mm, testate e certificate, complete di peso zavorrato in acciaio. Le quattro sonde per ogni pozzo dovranno essere installate e cementate con miscele cementizie termicamente migliorate. La scelta del cemento da utilizzare è di estrema importanza in quanto deve assicurare un'alta conduttività termica. La cementazione dovrà essere effettuata in

¹ La simulazione che segue è stata effettuata considerando il costo dell'energia nel dicembre 2019.

modo da assicurare la completa e uniforme adesione tra la sonda e la parete interna del foro, senza crepe o discontinuità.

Il costo della perforazione a carotaggio continuo, nonché della fornitura, installazione e cementazione delle sonde nel pozzo profondo 100 m è stimato all'incirca 9.500-10.000 €, al netto di eventuali imprevisti. La spesa per le tre perforazioni a distruzione di nucleo, per l'installazione delle sonde e loro cementazione nei tre pozzi (profondi 35 m, 50 m e 80 m) si aggira complessivamente intorno a 14.000 €.

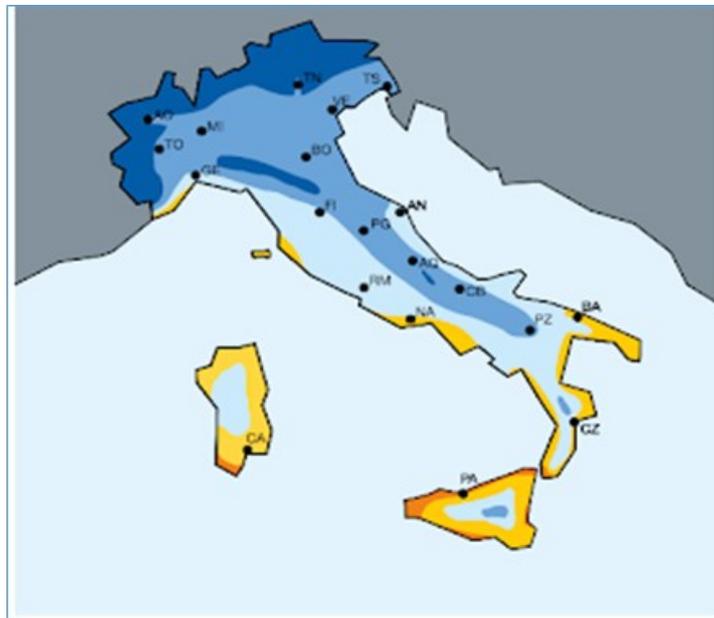
- 3) Esecuzione del GRT. Successivamente, ad avvenuta maturazione del cemento, è necessario effettuare il GRT sul pozzo di 100 m per ricavare la conducibilità termica media delle formazioni attraversate (W/mK), la resistenza termica sonda geotermica/terreno (KW/m) e la temperatura del terreno indisturbato (°C). Il costo di tale test è quotato circa 4.000 €.
- 4) Collaudo delle sonde geotermiche. È la fase finale, che consiste nel test di pressione e di flusso sulle sonde. Il test di pressione accerterà la tenuta del circuito idraulico, mentre il test di flusso dovrà verificare il comportamento fluidodinamico del circuito idraulico installato e dovrà valutare l'entità della caduta di pressione in ciascuna singola U della sonda a condizione di flusso costante. I due test, ognuno da eseguire quattro volte in accordo alla norma UNI 11467:2012 e SIA 384/6:2010, hanno un costo complessivo che si aggira intorno a 2.000 €.
- 5) Realizzazione dei collegamenti orizzontali – tramite trincee – tra i quattro pozzi e il collettore. Verificato che le sonde geotermiche siano state correttamente installate, che non abbiano subito deformazioni durante la messa in posa e che presentino una buona tenuta del circuito idraulico, si dovrà procedere con il raccordo di tali sonde fino al collettore. I circuiti primari paralleli sono due, ovvero un tubo di mandata e uno di ritorno che collegheranno ogni singolo pozzo con il collettore. Il collettore a quattro circuiti dovrà essere ubicato in prossimità della PdC, in modo da consentire la gestione autonoma dei pozzi. Oltre al collettore dovrà essere prevista l'installazione del degasatore, in prossimità della PdC, per eliminare l'aria eventualmente presente nei tubi e potenzialmente pericolosa per la PdC. Il costo di quest'ultima attività è stimato in circa 8.000 €.

Pertanto, il costo complessivo stimato dell'intero impianto è nell'ordine di 40.000 € (al netto dell'IVA).

Con riferimento alla stima dell'investimento, una valutazione economica di un impianto geotermico – in termini di costi e benefici – deve considerare diverse variabili, quali:

- il fabbisogno di energia termica dell'utenza;
- l'utilizzo della PdC;
- il tipo di terreno a disposizione e l'opzione impiantistica scelta;
- il costo per l'eventuale sostituzione dei radiatori con un impianto di riscaldamento a bassa temperatura;
- il grado di isolamento termico dell'edificio.

Nel caso di studio l'utenza ha una superficie di 140 m², ricade nella zona climatica D e quindi, in accordo al DPR 412/1993, possiamo assumere per essa un discreto livello di isolamento (valore di trasmittanza $U \leq 0,36$ W/mK) (Figura 23). L'utenza è provvista di un impianto di distribuzione del calore a ventilconvettori.



Schema indicativo delle zone climatiche secondo DPR 412/93



Zona Climatica	Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali (W/m ² K)	
	2015	2019/2021
A e B	0,45	0,43
C	0,38	0,34
D	0,34	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

Figura 23: Valori di trasmittanza in funzione delle zone climatiche (D.P.R. 412/93)

Per soddisfare interamente il fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento, l'impianto con sonde geotermiche verticali e PdC geotermica ha una potenza elettrica effettiva rispettivamente di 3,97 kW in inverno e 3,27 kW in estate. La profondità della perforazione complessiva è di 265 metri.

I costi di investimento per l'impianto geotermico, come visto all'inizio del paragrafo, comprendono le perforazioni dei quattro pozzi, la messa in posa delle sonde verticali, i test e i collaudi in pozzo, senza considerare i terminali di utilizzo e la PdC, in quanto l'utenza già ne dispone. La spesa di investimento iniziale ammonta a circa 40.000 €.

Dal confronto di bollette annuali relativamente al costo per il riscaldamento e il raffrescamento di un'utenza di simile metratura, si evince che l'impianto geotermico, rispetto a un sistema tradizionale di riscaldamento con caldaia a metano e condizionatore elettrico per il raffrescamento, consente un risparmio annuo in bolletta pari al 50%, che sale fino al 70-80% se si confronta lo stesso con impianti di riscaldamento a gasolio e GPL.

Per calcolare il tempo di ritorno o di ammortamento, ovvero in quanti anni si recupera il costo iniziale di investimento dell'impianto, è necessario stimare:

- il risparmio annuo in bolletta (1.000 € è la spesa per la climatizzazione con il geotermico rispetto a 2.000 € con il sistema tradizionale);
- il costo dell'impianto geotermico, o meglio il suo extra-costò rispetto a un impianto tradizionale (in questo caso è stato considerato un impianto con caldaia a metano e condizionatore elettrico).

L'investimento iniziale complessivo dell'impianto geotermico è di 40.000 €. L'investimento complessivo di un impianto tradizionale è di circa 20.000 €. Poiché l'extra-costò dell'impianto geotermico è di 20.000 €, si può affermare che il tempo di ritorno dell'investimento per un impianto geotermico sarà di circa 20 anni.

Bisogna tener conto che la vita media di un impianto geotermico è superiore rispetto a quella di una caldaia a metano e di un condizionatore elettrico. La PdC ha una vita media di circa 15-20 anni, mentre le sonde geotermiche possono funzionare senza problemi anche per molti decenni. A ciò si aggiunga che gli impianti geotermici non necessitano di alcuna manutenzione, perché non dispongono di canne fumarie e bruciatori; pertanto, a differenza dei sistemi tradizionali, all'investimento iniziale non vanno sommate le spese di manutenzione. Inoltre, le componenti impiantistiche ben si adattano a qualsiasi tipo di

edificio (abitazioni, uffici, edifici commerciali, hotel, scuole, piscine, capannoni), e l'assenza di una caldaia che utilizzi gasolio o metano scongiura il rischio potenziale legato ai serbatoi.

4. CONCLUSIONI

In questo Rapporto sono state descritte le attività effettuate nel primo anno del 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”), nell’ambito dell’Accordo di Programma tra il Ministero dello Sviluppo Economico e l’ENEA. Tali attività hanno riguardato dapprima una *survey*, con la consultazione di tutta la letteratura disponibile sulle caratteristiche geologiche e idrogeologiche dell’area potenzialmente idonea, e successivamente uno studio di fattibilità di un impianto geotermico a bassa entalpia – costituito da un campo geosonde con 4 pozzi profondi fino a 100 m, attrezzati con sonde geotermiche verticali, da realizzarsi nel C.R. ENEA-Casaccia – integrato con pompa di calore, con relativo dimensionamento, analisi economica e valutazione del tempo di ritorno dell’investimento iniziale.

A questa prima fase, necessariamente conoscitiva, seguiranno, nel corso degli anni successivi, le attività di realizzazione e monitoraggio, con test effettuati direttamente nei pozzi e tramite fibre ottiche direttamente inserite all’interno delle sonde verticali per misurare le variazioni di temperatura in tutto il volume del campo geosonde. In funzione di tali valori si potrà scegliere la destinazione di questa risorsa, se asservirla a un’utenza oppure inviarla direttamente a un serbatoio di accumulo, in modo da soddisfare particolari esigenze. L’intento è dimostrare la valenza effettiva di tale calore pulito, rinnovabile e sicuro nel tempo in quanto sfrutta il naturale gradiente geotermico terrestre, disponibile sempre e in ogni parte della superficie terrestre.

Gli autori di questo Rapporto auspicano una decisa sensibilizzazione da parte del legislatore verso tale risorsa, promuovendola per esempio con politiche incentivanti e autorizzative in termini di concessione. Al momento non vi è una normativa nazionale, e soltanto alcune Regioni italiane dispongono di proprie regolamentazioni; pertanto, il sistema autorizzativo e legislativo risulta ancora frammentato e poco chiaro, ostacolando in tal modo il decollo della risorsa geotermica. Le ragioni della mancata diffusione delle PdC geotermiche sono principalmente legate a barriere di tipo informativo ed economico. Le prime dipendono dall’insufficiente conoscenza di questo tipo di macchine, con particolare riguardo alle potenzialità operative, alle prestazioni effettive in campo e al rischio temuto di possibili malfunzionamenti per la presunta immaturità di una tecnologia ancora considerata emergente. Le seconde dipendono dall’incertezza sui costi energetici e da un costo di installazione relativamente elevato. Bisogna però prendere atto che questo tipo di risorsa

termica ha, almeno nel nostro Paese, potenzialità straordinarie in quanto può essere applicata su gran parte del territorio, e potrebbe contribuire in modo significativo, insieme ad altre fonti rinnovabili, a soddisfare la domanda termica nazionale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. IEA – Renewables 2020. <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>. *Ultimo accesso 14/11/2022*
2. Lund J, Tóth AN (2020). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics* 90:101915. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>
3. <https://www.greenreport.it/news/economia-ecologica/la-geotermia-come-alleata-per-la-transizione-giusta-prevista-dal-green-deal-europeo/>. *Ultimo accesso 14/11/2022*
4. Alves Dias P, et al. (2018). EU coal regions: opportunities and challenges ahead. Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-79-89884-6. doi:10.2760/064809
5. PNIEC. Ministero dello sviluppo economico, Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare e Ministero delle infrastrutture e dei trasporti (2018). Proposta di piano nazionale integrato per l'energia e il clima. <https://www.mise.gov.it/index.php/it/198-notizie-stampa/2040668-pniec2030>. *Ultimo accesso 14/11/2022*
6. De Rita D, Di Filippo M, Rosa C (1996). Structural evolution of the Bracciano volcano-tectonic depression, Sabatini Volcanic District, Italy. *Geological Society London Special Publications* 110(1):225–236. DOI:10.1144/GSL.SP.1996.110.01.17
7. De Rita D (1993). Il Vulcanismo – in Guide geologiche regionali. 14 Itinerari Lazio, a cura della Società geologica Italiana, Be-Ma editrice
8. Buonasorte G, Carboni MG, Conti MA (1991). Il substrato plio-pleistocenico delle vulcaniti sabatine: considerazioni stratigrafiche e paleoambientali. *Boll Soc Geol It* 110:35–40
9. Di Filippo M (1993). Sabatini Volcanic Complex. *PF Geodinamica, CNR. Quad. de La Ricerca Scientifica* 114(11)
10. Relazione tecnica Sogin. Caratterizzazione idrogeologica e radiometrica del sito Casaccia propedeutica allo smantellamento dei serbatoi Waste-A e Waste-B. Elaborato NP VA 0148
11. Manca F, Viaroli S, Mazza R (2017). Hydrogeology of the Sabatini Volcanic District (Central Italy). *Journal of Maps* 13:252–259. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1297740>
12. Capelli G, Mastroiillo L, Mazza R, Petitta M, Baldoni T, Banzato F, Cascone D, Di Salvo C, La Vigna F, Taviani S, Teoli P (2012). Carta Idrogeologica del Territorio della

Regione Lazio, scala 1:100.000. Regione Lazio. S.EL.CA. Firenze

13. <http://geothopica.igg.cnr.it>. *Ultimo accesso 14/11/2022*
14. Dall'Aglio M, Giannotti GP (1964). Studio idrogeologico e idrogeochimico preliminare del bacino del F. Arrone, ai fini di una eventuale immissione di affluenti radioattivi. Nota CNEN, 10
15. Lombardi L, Giannotti GP (1969). Idrogeologia della zona a Sud-Est del Lago di Bracciano. Boll Soc Geol It 88:107–121
16. Basta S, Minchio F (2007). Geotermia e pompe di calore - Guida pratica agli impianti di climatizzazione. Ed. S. Basta, Verona
17. VDI 4640/1 (2000). Thermal use of the underground, Fundamentals, approvals, environmental aspects. Verein Deutscher Ingenieure (VDI)
18. Claesson J, Eskilson P (1987). Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Tesi di dottorato, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden
19. Tinti F (2009). Geotermia per la climatizzazione - Applicazioni, tecnologia - analisi costi-benefici. Ed. D. Flaccovio, Palermo
20. Baietto A, Pochettino M, Salvatici E (2010). Progettazione di impianti geotermici. Sonde verticali e pozzi d'acqua (con software GeoHeatCal). Ed. D. Flaccovio, Palermo
21. Banks D (2008). An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling". Ed. John Wiley & Sons, Ltd, UK
22. Rybach L (2003). Regulatory framework for geothermal in Europe, with special reference to Germany, France, Hungary, Romania, and Switzerland. United Nations University, Geothermal Training Programme, International Geothermal Conference IGC2003 Short Course, Reykjavik, Iceland
23. Sanner B (2008). Guidelines, standards, certification and legal permits for ground-source heat pumps in the European Union. In: Proceedings of the 9th International IEA Heat Pump Conference, Zürich, Switzerland
24. European Geothermal Energy Council (EGEC). Geothermal Heat Pumps – Ground Source Heat Pumps. 2009
25. Davies JH, Davies DR (2010). Earth's surface heat flux. Solid Earth 1:5–24
26. Cataldi R, Mongelli F, Squarci P, Taffi L, Zito G, Calore C (1995). Geothermal ranking of Italian territory. Geothermics 24(1):115–129. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(94\)00026-9](https://doi.org/10.1016/0375-6505(94)00026-9)
27. Kavanaugh SP, Rafferty K (1997). Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings. American Society of Heating,

Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Chiba

28. Zeng HY, Diao NR, Fang ZH (2003). Efficiency of vertical geothermal heat exchangers in ground source heat pump systems. *J Therm Sci* 12(1):77–81

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

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