

Ricerca di Sistema elettrico



Sistemi integrati: Formulazione di equazioni di correlazione per la progettazione e la gestione di sonde geotermiche abbinate a pompe di calore (LA4.3)

E. Habib

DIAEE
Dipartimento di Ingegneria
Aeronautica, Elettrica ed Energetica



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Sistemi integrati: Formulazione di equazioni di correlazione per la progettazione e la gestione di sonde geotermiche abbinata a pompe di calore

LA4.3: Sistemi integrati: Formulazione di equazioni di correlazione per la progettazione e la gestione di sonde geotermiche abbinata a pompe di calore

E. Habib (Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, Sapienza Università di Roma)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.7 – Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 4.3

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Raniero Trinchieri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Emanuele, Habib, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica - Sapienza Università di Roma

Mese inizio previsto: luglio 2023

Mese inizio effettivo: luglio 2023

Mese fine previsto: dicembre 2024

Mese fine effettivo: dicembre 2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Simulazione di campo termico del terreno circostante sonde geotermiche e formulazione di equazioni di correlazione per la loro progettazione e gestione in abbinamento a pompe di calore

Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte prof. Massimo Corcione, prof. Alessandro Quintino, dott. Leonardo Colacino

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti sviluppati	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Correlazione tra caratteristiche delle sonde geotermiche e la potenzialità delle pompe di calore	10
7.1.1	Metodo	10
7.1.2	Risultati e discussione	12
7.1.3	Equazioni di correlazione	14
7.2	Utilizzo delle sonde geotermiche per l'accumulo nel terreno	15
7.3	Gestione delle sonde geotermiche per l'attuazione di logiche di Demand Side Management	16
7.3.1	Metodo	17
7.3.2	Risultati e discussione.....	17
7.4	Bibliografia.....	18
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	19
9	Pubblicazioni scientifiche.....	20
10	Eventi di disseminazione	21

Indice delle figure

Figura 1 – Distribuzione dell'energia scambiata dalla sonda geotermica di lunghezza 40 m con terreno composto da strati alternati a bassa e alta conducibilità termica	12
Figura 2 – Distribuzione dell'energia scambiata dalla sonda geotermica di lunghezza 100 m con terreno composto da strati alternati a bassa e alta conducibilità termica	12
Figura 3 – Energia scambiata per unità di lunghezza rispetto alla conducibilità termica media del terreno pesata rispetto allo spessore di ciascuno strato	13
Figura 4 – Energia scambiata per unità di lunghezza rispetto alla conducibilità termica media del terreno pesata rispetto allo spessore di ciascuno strato con riduzione del 10% per ciascuno strato successivo.....	13
Figura 5 – Energia scambiata per unità di lunghezza rispetto alla conducibilità termica calcolata mediante simulazione di TRT	14
Figura 6 – Evoluzione della temperatura media del terreno tipo D alla superficie della sonda per effetto di una sollecitazione stagionale (ascisse, ore dall'inizio della simulazione; ordinate, temperatura media del terreno a contatto con la sonda [°C])	16
Figura 7 – Esempio di prova sperimentale di DSM.....	17
Figura 8 – Risultati delle prove di accumulo utilizzando i pozzi 3 e 4, a parametro il periodo di attività che viene anticipato, normalizzate per differenza di temperatura tra mandata del fluido e temperatura del terreno indisturbato e per la lunghezza della sonda	18

1 Risultati attesi

I risultati attesi sono i seguenti:

- Formulazione di equazioni di correlazione tra le caratteristiche delle sonde geotermiche e la potenzialità delle pompe di calore. Le equazioni di correlazione saranno definite in relazione ai parametri progettuali. Saranno formulate sia in relazione alle caratteristiche dell'impianto per la definizione delle caratteristiche delle sonde geotermiche da realizzare, sia in relazione alle caratteristiche del campo di sonde geotermiche per definire la potenzialità degli impianti asservibili.
- Formulazione di equazioni di correlazione tra le caratteristiche delle sonde geotermiche e le prestazioni di accumulo termico. Le equazioni di correlazione consentiranno di definire la capacità, le sovratemperature di carica e di scarica e le efficienze di ciclo per le diverse scale temporali in relazione alle caratteristiche geometriche dell'impianto.
- Formulazione di equazioni di correlazione tra le caratteristiche delle sonde geotermiche e la risposta a impulsi termici di differente durata e intervallo. Le equazioni di correlazione consentiranno di determinare gli effetti sull'efficienza di differimenti temporali della sollecitazione termica in relazione all'energia differita e al periodo intercorrente. Le espressioni saranno formulate in modo da consentire l'integrazione delle equazioni in sistemi di gestione di pompe di calore con finalità di DSM (Demand Side Management). Sarà stilato un report che esporrà dunque le Equazioni di correlazione per la definizione delle caratteristiche delle sonde geotermiche da realizzare in relazione alla potenzialità della pompa di calore e viceversa; le equazioni di correlazione per la definizione della capacità di accumulo, delle sovratemperature di carica e di scarica e delle efficienze di ciclo per le diverse scale temporali in relazione alle caratteristiche geometriche delle sonde geotermiche; le equazioni di correlazione della risposta di sonde geotermiche a sollecitazioni impulsive in relazione alla durata e all'intensità.

2 Risultati ottenuti

Sono state ricavate equazioni di correlazione tra le dimensioni delle sonde geotermiche (BHE - Borehole Heat Exchanger) la potenzialità delle pompe di calore. Rispetto alle equazioni già disponibili in letteratura, è stata sviluppata una formulazione semplificata di immediata applicazione in fase di progettazione preliminare degli impianti GSHP (Ground Source Heat Pump - Pompe di calore a sorgente geotermica). È fornita anche l'equazione inversa che permette di determinare la potenza della pompa di calore in relazione alla dimensione del BHE disponibile. Inoltre, viene fornito un metodo per la determinazione della conducibilità termica equivalente con riferimento a terreni composti da strati differenti. Inoltre, è stato verificato che la conducibilità media ricavata mediante prova in situ (TRT - Thermal Response Test), è appropriata per la descrizione delle prestazioni di BHE.

Sono state effettuate simulazioni del funzionamento di BHE per la valutazione della loro utilizzabilità per la realizzazione di sistemi di accumulo. Non sono stati ottenuti risultati conclusivi, ma è stata comunque formulata un'equazione semplificata per il dimensionamento preliminare.

Per quanto attiene alle sollecitazioni impulsive, dalle prove sperimentali non sono emerse variazioni apprezzabili delle prestazioni. Pertanto, non è necessario introdurre equazioni specifiche per l'applicazione di logiche di differimento di esercizio per la gestione della domanda energetica (DSM - Demand Side Management). Quindi, sarà possibile implementare tali logiche di esercizio per impianti con GSHP.

3 Prodotti attesi

Rapporto tecnico: Sistemi integrati: Formulazione di equazioni di correlazione per la progettazione e la gestione di sonde geotermiche abbinate a pompe di calore.

4 Prodotti sviluppati

Rapporto tecnico: Sistemi integrati: Formulazione di equazioni di correlazione per la progettazione e la gestione di sonde geotermiche abbinate a pompe di calore.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

L'implementazione delle simulazioni del funzionamento dei BHE ha richiesto tempi macchina superiori a quanto atteso. Ciò ha limitato la numerosità dei dati per lo sviluppo delle correlazioni. Pertanto, come previsto come soluzione nel piano di rischio, sono state adottate equazioni di correlazione più generali, adeguate alla qualità dei dati disponibili.

6 Sintesi delle attività svolte

Sono state sviluppate simulazioni del campo termico nel terreno per differenti stratigrafie e dimensioni delle sonde geotermiche. È stata condotta un'analisi comparativa dei risultati con la letteratura tecnica di settore. Dai dati sono state ricavate equazioni di correlazione per il dimensionamento preliminare di sonde geotermiche accoppiate a pompe di calore e una metodologia per la valutazione della conducibilità termica di riferimento di terreno multistrato. Sono state realizzate simulazioni di accumulo termico nel terreno, formulando una correlazione semplificata.

Sono state effettuate misure sperimentali di differimento del carico determinando che l'applicazione di logiche di DSM non comporta variazioni significative delle prestazioni delle sonde geotermiche.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Correlazione tra caratteristiche delle sonde geotermiche e la potenzialità delle pompe di calore

La progettazione preliminare di GSHP richiede la disponibilità di equazioni sintetiche che consentano la correlazione tra la potenzialità della pompa di calore e la dimensione di BHE. In letteratura sono disponibili metodologie per la progettazione definitiva [1], [2]. La loro applicazione richiede un'analisi dettagliata delle prestazioni richieste dall'impianto, sia lato utenza (edificio) che lato macchina (pompa di calore e BHE), onerosa nelle fasi preliminari della progettazione. I software disponibili per l'ausilio alla progettazione degli impianti GSHP implementano gli algoritmi, ma non esonerano dalla necessità di approfondimento dell'analisi.

Un altro aspetto critico è la valutazione delle proprietà del terreno. Infatti, i BHE hanno uno sviluppo di alcune decine di metri che, inevitabilmente, interessata strati con proprietà differenti. Nel caso di impianti di considerevole potenza, è possibile procedere mediante TRT che richiede lo scavo di un pozzo di prova. Tale procedura limita l'informazione agli strati interessati dalla perforazione, introducendo un'indeterminazione nel caso dal calcolo consegua l'adozione di pozzi di maggiore profondità.

L'attività ha riguardato la simulazione del funzionamento di BHE con riferimento a differenti stratigrafie, al fine di determinare se vi sia una metodologia affidabile per la valutazione ex-ante delle prestazioni, nonché dell'affidabilità dei risultati di TRT che forniscono un valore mediato di conducibilità termica del terreno.

Inoltre, sono state condotte delle simulazioni del campo termico in presenza di falda. I risultati ottenuti non sono significativi, presentando una forte dipendenza in relazione al modello di falda utilizzato. Pertanto, si è ritenuto di omettere tali risultati.

7.1.1 Metodo

Per lo sviluppo delle simulazioni è stato utilizzato il software FLUENT su dominio tridimensionale. Infatti, la trasmissione di calore da BHE avviene quasi esclusivamente in senso radiale a partire dall'asse dello scambiatore nel periodo di esercizio. Nelle pause tra due periodi di esercizio del BHE la trasmissione avviene prevalentemente in senso perpendicolare al terreno, verso il campo geotermico profondo e verso la superficie per lo scambio con l'atmosfera.

I dettagli del modello sono disponibili nel report "Simulazione del campo termico nel terreno per la valutazione delle interazioni con pompe di calore" prodotto nell'ambito della LA4.2 del presente progetto.

La stratigrafia è composta da due materiali, lava e tufo argilloso sabbioso, che corrispondono ai valori di conducibilità termica massima e minima misurate presso l'impianto geotermico a bassa entalpia del centro di ricerca ENEA Casaccia, pari, rispettivamente a 1.50 W/m K e 0,50 W/m K per lava e tufo sabbioso argilloso. Per entrambi è assunta una densità di 1200 kg/m³ ed un calore specifico pari a 1200 J/kg K.

Le simulazioni realizzate hanno una durata di un anno e riproducono il funzionamento della pompa di calore in regime invernale, ovvero quando l'impianto lavora in modalità riscaldamento. La stagione di riscaldamento inizia al giorno 20 della simulazione e termina al giorno 170. La temperatura dell'aria esterna è modellizzata con distribuzione sinusoidale annuale, senza specifica modellazione dell'apporto della radiazione solare.

$$T_{amb} = 17 + 17\sin\left(\pi\frac{t+t_f}{\tau}\right) \quad (1)$$

Il carico richiesto dal BHE è assunto variabile con profilo determinato come nel Regolamento europeo R2016/2281 relativo al calcolo della prestazione energetica media stagionale delle pompe di calore. Il campo termico, dopo essere stato inizializzato, viene lasciato svilupparsi liberamente per fino all'attivazione del BHE. Dopodiché, nei 195 giorni rimanenti il campo rimane inattivo, per cui è possibile valutare la risposta termica del terreno dopo la stagione di riscaldamento ed i rispettivi tempi di recupero.

Il prelievo di calore del terreno avviene simulando la superficie della sonda geotermica come una parete che scambia calore con il terreno in funzione del coefficiente convettivo equivalente determinato in modo analitico, pari a 12,88 W/m² K. La temperatura interna alla sonda geotermica è stata definita con la seguente procedura analitica:

$$\begin{cases} -G \cdot c \cdot dT_m = [U'_g (T_m - T_g) + U'_c (T_m - T_r)] dz \\ -G \cdot c \cdot dT_r = [U'_g (T_r - T_g) - U'_c (T_m - T_r)] dz \end{cases} \quad (2)$$

In cui, G e c sono, rispettivamente, la portata e il calore specifico del fluido termovettore, T_m è la temperatura del fluido nella tubazione di mandata (discendente), T_r è la temperatura del fluido nella tubazione di ritorno (ascendente), U'_g è la conduttanza equivalente tra tubazione e terreno, U'_c è la conduttanza equivalente tra tubazione di mandata e di ritorno, z è l'ascissa verticale. Definita la temperatura media tra le tubazioni di mandata e ritorno $\bar{T} = \frac{T_m + T_r}{2}$ e introducendo i parametri ausiliari $\theta_g = \bar{T} - T_g$; $\theta = T_m - T_r$ le soluzioni analitiche sono espresse dalle eqq. (3) - (5):

$$\theta_g = \theta_{g0} e^{-\frac{U'_g}{G \cdot c} z} \quad (3)$$

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{U'_g + 2 U'_c}{G \cdot c} z} \quad (4)$$

$$\dot{Q} = 2 G \cdot c \cdot \theta_{g0} \left(1 - e^{-\frac{U'_g L}{G \cdot c}} \right) \quad (5)$$

Imposta una portata equilibrata rispetto alla conduttanza equivalente, $\frac{U'_g L}{G \cdot c} = 1$, e imposto a potenza nominale $\frac{\dot{Q}}{G \cdot c} = 5 = \theta_0$, si ha:

$$\theta_{g0} = \frac{5}{2(1-e^{-1})} \cong 4 K \quad (6)$$

Quindi, con portata d'acqua costante si ha:

$$\theta_{g0} = \frac{5}{2(1-e^{-1})} \cdot (1.0714 - 0.0357 \cdot T_e) \cong 4 \cdot (1.0714 - 0.0357 \cdot T_e) \quad (7)$$

Assumendo come riferimento la temperatura del terreno a 5 m di profondità, si impone ad ogni passo temporale la seguente distribuzione di temperatura nel pozzo:

$$T = T(5 m) - 4 \cdot (1.0714 - 0.0357 \cdot T_e) e^{-z/L} \quad (8)$$

Con una conduttanza termica pari al reciproco della resistenza termica tra tubo e pozzo.

Le simulazioni sono state sviluppate per diverse lunghezze della sonda da 20 m a 100 m, con strati di terreno omogenei di profondità 10 m, oltre ad uno strato superficiale di 5 m. Sono state considerate sei diverse stratigrafie:

- Tutti "argilla"
- Tutti "lava"
- Alternati "argilla" - "lava"

- Sopra "argilla", sotto "lava"
- Sopra e sotto "argilla", intermedio "lava"
- Sopra "lava", sotto "argilla"

Per ciascuna profondità e tipologia di stratigrafia è stato simulato un TRT, determinando il corrispondente valore di conducibilità termica apparente. Inoltre, sono stati calcolate le conducibilità medie con due metodologie: media delle conducibilità degli strati, pesata con la profondità di ciascuno strato; media delle conducibilità degli strati, pesata con la profondità di ciascuno strato ridotta progressivamente del 10%.

7.1.2 Risultati e discussione

Le simulazioni hanno permesso di determinare l'energia scambiata con il terreno, come illustrato, a titolo d'esempio, nelle figure 1 e 2. Si osserva che il profilo segue quello del carico, come ovvio.

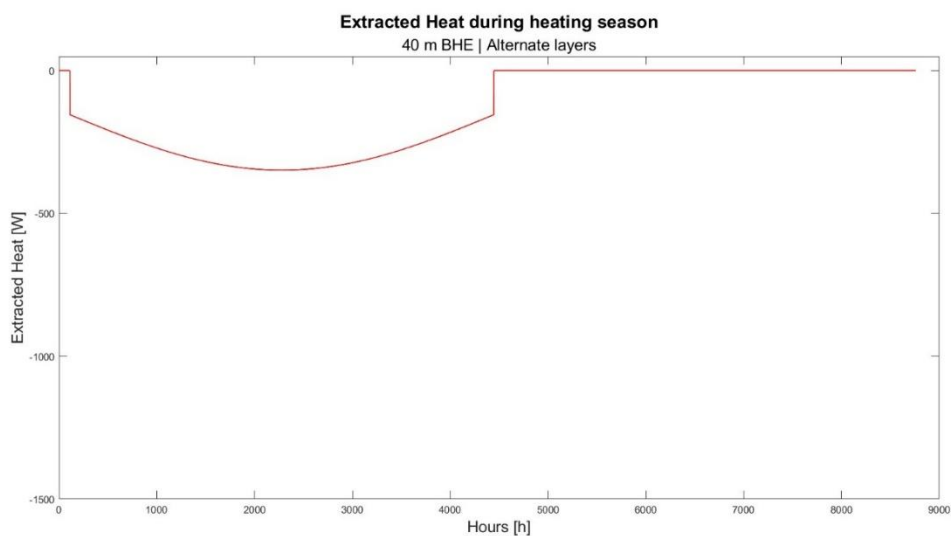


Figura 1 – Distribuzione dell'energia scambiata dalla sonda geotermica di lunghezza 40 m con terreno composto da strati alternati a bassa e alta conducibilità termica

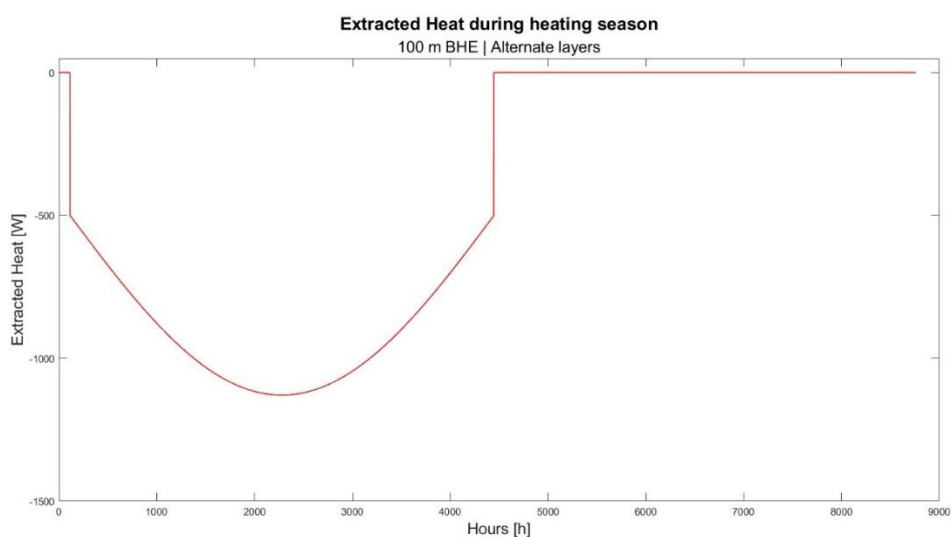


Figura 2 – Distribuzione dell'energia scambiata dalla sonda geotermica di lunghezza 100 m con terreno composto da strati alternati a bassa e alta conducibilità termica

I valori di energia sono stati normalizzati per l'estensione della sonda, comparando i risultati con la conducibilità media del terreno con i tre metodi descritti nel paragrafo precedente, come illustrato nelle figure 3, 4 e 5. Si osserva che tutti i metodi forniscono una buona correlazione lineare tra l'energia scambiata e la conducibilità media.

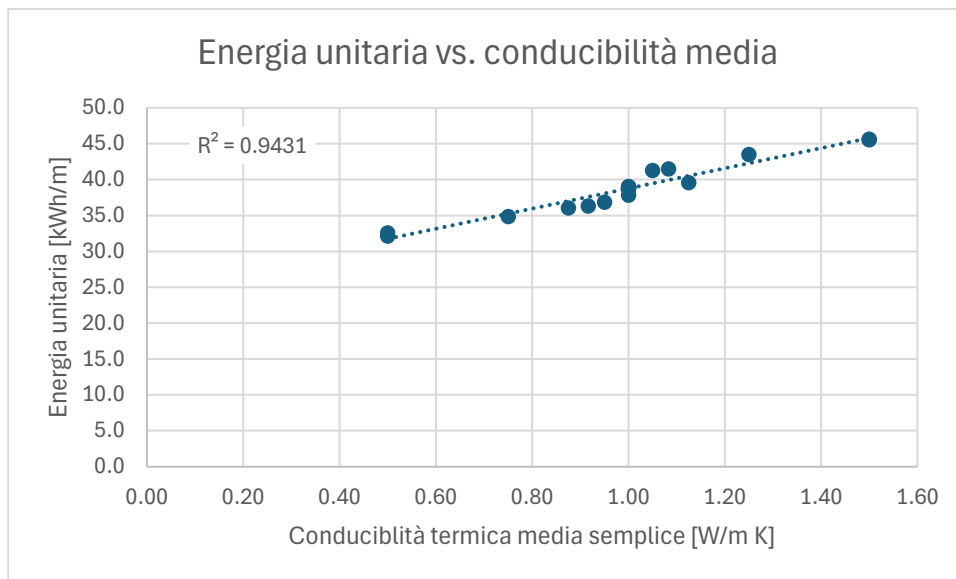


Figura 3 - Energia scambiata per unità di lunghezza rispetto alla conducibilità termica media del terreno pesata rispetto allo spessore di ciascuno strato

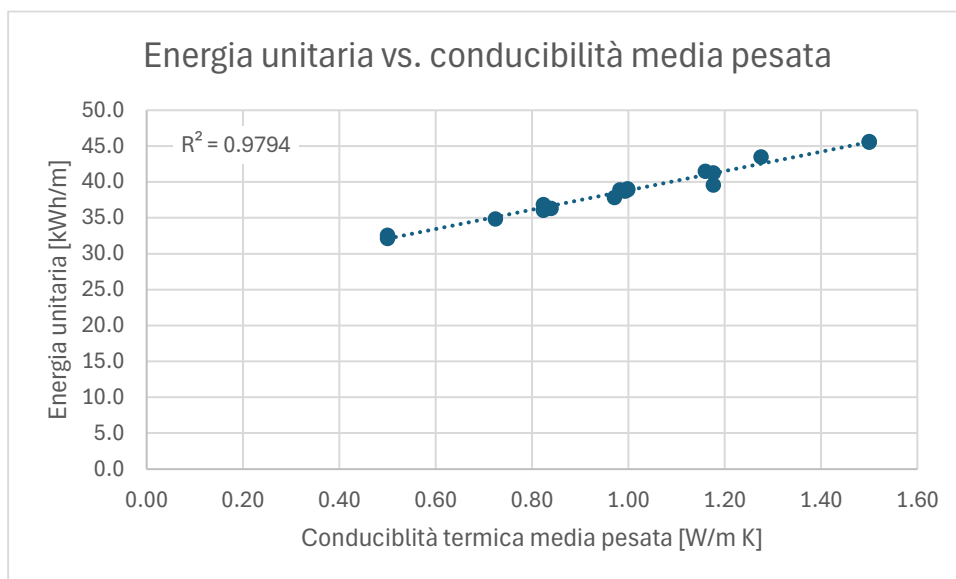


Figura 4 - Energia scambiata per unità di lunghezza rispetto alla conducibilità termica media del terreno pesata rispetto allo spessore di ciascuno strato con riduzione del 10% per ciascuno strato successivo

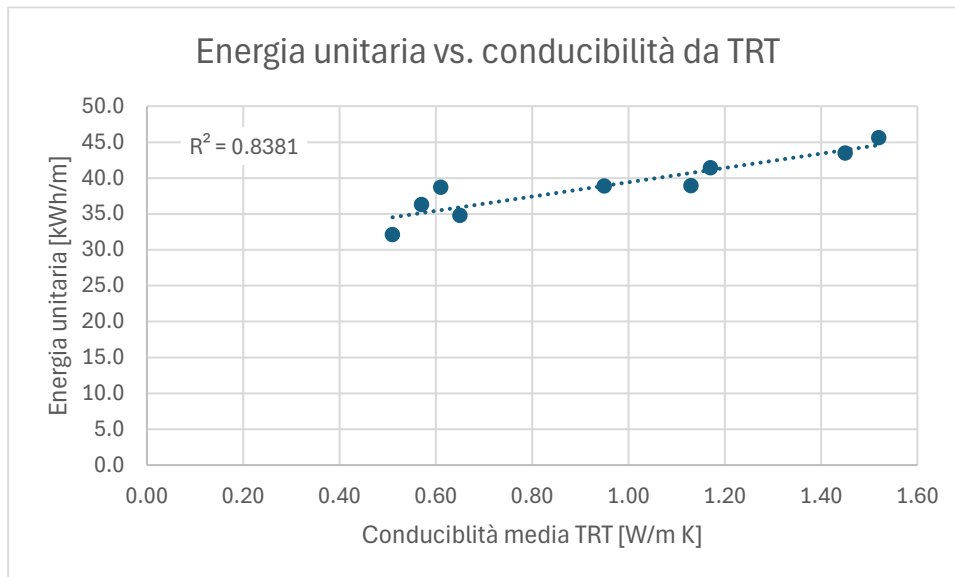


Figura 5 - Energia scambiata per unità di lunghezza rispetto alla conducibilità termica calcolata mediante simulazione di TRT

Pertanto, il risultato di un TRT è appropriato per la determinazione della conducibilità termica del terreno ai fini del dimensionamento delle sonde geotermiche; in alternativa, è possibile determinare la conducibilità termica media ai fini dei calcoli come media delle conducibilità degli strati di cui è composto il terreno, pesata con gli spessori di ciascuno. L'utilizzo di una migliore approssimazione, attribuendo un peso maggiore agli strati superficiali, per quanto consenta una maggiore affidabilità dei risultati, non determina un vantaggio sufficiente a promuoverne l'utilizzo a fronte della complicazione del calcolo e dell'indeterminazione dei parametri disponibili.

7.1.3 Equazioni di correlazione

L'espressione compatta per il dimensionamento delle sonde geotermiche disponibile in letteratura [2] è stata ampiamente validata [3]:

$$L = \frac{Q_y \cdot R_y + Q_m \cdot R_m + Q_h \cdot (R_h + R_b)}{T_g - T_f - T_p} \quad (9)$$

In cui Q_y , Q_m e Q_h sono le potenze scambiate (positive per energia fornita all'edificio), rispettivamente, media di 10 anni, media del mese con maggiore fabbisogno energetico, media del giorno con maggiore fabbisogno energetico; R_y , R_m e R_h sono le corrispondenti resistenze termiche equivalenti nel terreno; R_b è la resistenza termica della sonda geotermica; T_g è la temperatura media del terreno indisturbato; T_f è la temperatura limite accettabile del fluido; T_p è la riduzione della differenza di temperatura disponibile per effetto dell'interazione tra sonde geotermiche adiacenti, trascurabile nell'ipotesi di poche sonde ampiamente distanziate. Il calcolo delle resistenze termiche equivalenti del terreno richiede il calcolo del numero di Fourier riferito al diametro del BHE per ciascun periodo temporale di riferimento, in base al quale calcolare il valore del corrispondente gradiente del campo termico circostante al pozzo, descritto abitualmente come funzione G. È stata determinata una formulazione semplificata, valida per $Fo = 1 \div 10^6$ con precisione $\pm 2\%$:

$$G = -0.108 \times 10^{-3} \ln^3 Fo + 0.2894 \times 10^{-2} \ln^2 Fo + .05532 \ln Fo + 0.12614 \quad (10)$$

Gli intervalli temporali di riferimento sono $t_h = 6 \text{ ore}$, $t_m = 30.25 \text{ giorni}$, $t_y = 3680.25 \text{ giorni}$. La resistenza termica equivalente del terreno è pari al valore appropriato di G diviso la

conducibilità del terreno, diminuita della resistenza termica equivalente del periodo più breve (senza riduzione per R_h).

Indicando con P_n la potenza nominale all'evaporatore della pompa di calore si ha in prima approssimazione:

$$Q_h = P_n, Q_m = P_n \frac{20-T_m}{20-T_n}, Q_y = f \cdot P_n \cdot \frac{GG}{N_g \cdot (20-T_n)} \quad (11)$$

In cui, T_m è la temperatura media mensile del mese più freddo, T_n è la temperatura di progetto, GG sono i gradigiorno della località, N_g è il numero di giorni di attivazione dell'impianto di riscaldamento in base alla zona climatica. Il parametro f è il rapporto tra il bilancio energetico netto annuale e l'energia prelevata in inverno. Nel caso di assenza di funzionamento estivo del BHE è pari a 1. Altrimenti, in prima approssimazione è pari a 0 per le zone climatiche A e B, a 0,33 per le zone climatiche C e D e a 0,67 per zone climatiche E ed F.

La temperatura del fluido deve essere determinata in relazione alla prestazione attesa della pompa di calore. Riscrivendo la correlazione sintetica disponibile in [4] assumendo una temperatura invariante al condensatore si ha:

$$COP = COP_n - (COP_n - 1) \cdot \left(\frac{0.717}{T_{ci} - T_{eo,n}} - \frac{1.967}{T_{eo,n}} \right) \cdot (T_{eo,n} - T_{eo}) \quad (12)$$

Con i dati EN 14511 si ha:

$$T_f = 7 + \frac{COP-4}{0.378} \quad (13)$$

Quindi, l'eq. (9) può essere esplicitata rispetto alla sola potenza nominale all'evaporatore e alla conducibilità termica media del terreno:

$$L = \frac{P_n}{T_g - T_f} \cdot \left(\frac{\frac{f \cdot GG}{180} \cdot G(Fo(t_y)) + (20 - T_m - \frac{f \cdot GG}{180}) \cdot G(Fo(t_m)) + (T_m - T_n) \cdot G(Fo(t_h))}{k_g \cdot (20 - T_n)} + R_b \right) \quad (14)$$

L'espressione può essere riformulata per la valutazione dell'entità del fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale realizzabile con una data lunghezza disponibile di sonde geotermiche:

$$Q_b = \frac{L \cdot (T_g - T_f) \cdot \frac{COP}{COP-1}}{\frac{\frac{f \cdot GG}{180} \cdot G(Fo(t_y)) + (20 - T_m - \frac{f \cdot GG}{180}) \cdot G(Fo(t_m)) + (T_m - T_n) \cdot G(Fo(t_h))}{k_g \cdot (20 - T_n)} + R_b} \quad (15)$$

7.2 Utilizzo delle sonde geotermiche per l'accumulo nel terreno

Dalla letteratura tecnica [1] è noto che vi sono forti limitazioni alla possibilità di accumulo nel terreno conseguenti al rapido rilassamento del campo termico che limita la possibilità di accesso all'energia termica accumulata. Ciò implica che l'accumulo termico è limitato dalle differenze di temperatura disponibili tra accumulo ed estrazione. Di fatto, le eqq. (9), (14) e (15) del paragrafo precedente includono i fenomeni di accumulo termico nel termine di resistenza pluriennale.

L'entità della variazione della temperatura del terreno in assenza di sollecitazione termica di estrazione è stata valutata con le modalità già esposte al paragrafo 7.1.1. Come osservabile dalla figura 6, al termine della fase di carica, la temperatura del terreno subisce un rapido rilassamento, nell'arco di circa 20 giorni (500 ore), seguito da una successiva variazione pressoché lineare della temperatura fino alla condizione stazionaria, raggiunta solo da sonde di modesta profondità (20 m).

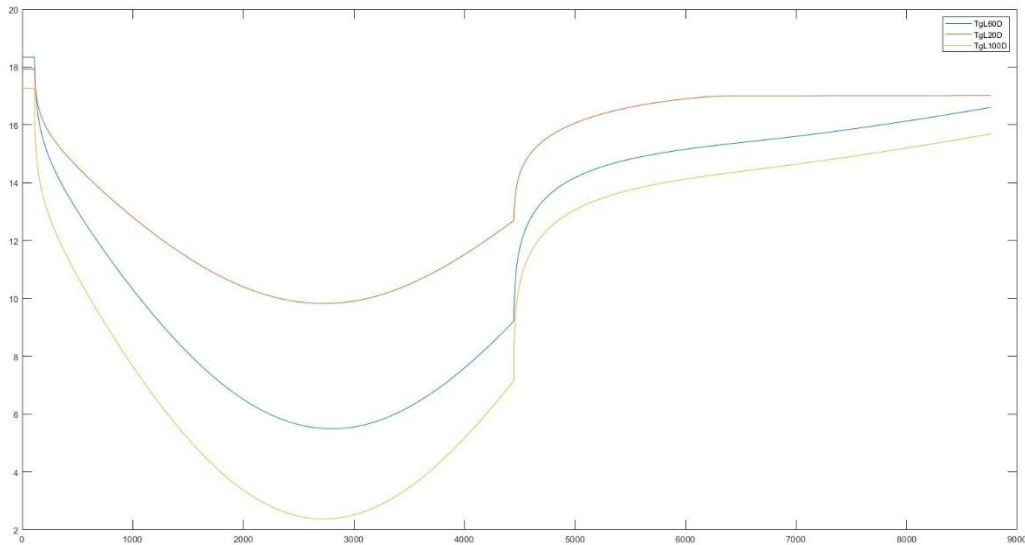


Figura 6 – Evoluzione della temperatura media del terreno tipo D alla superficie della sonda per effetto di una sollecitazione stagionale (ascisse, ore dall’inizio della simulazione; ordinate, temperatura media del terreno a contatto con la sonda [°C])

Al termine di un anno, la differenza di temperatura residua è compresa tra 0,5°C e 2°C in relazione alla stratigrafia e alla lunghezza della sonda. Simulazioni di estrazione dell’energia hanno evidenziato un rapidissimo decadimento della temperatura circostante.

D’altra parte, la riduzione della differenza di temperatura disponibile per effetto dell’interazione tra sonde geotermiche adiacenti, T_p , che compare nell’eq. (9) esprime l’azione sinergica di isolamento rispetto al terreno circostante di un campo di sonde geotermiche sufficientemente ravvicinate. I tempi di sviluppo della presente ricerca, specie in relazione al tempo macchina che si è reso necessario per le simulazioni esposte al paragrafo 7.2, non hanno consentito l’approfondimento opportuno.

Comunque, nell’utilizzo della sonda geotermica per l’accumulo termico, assumendo una potenza costante, l’eq. (9) può essere semplificata rispetto all’unica scala temporale, costituita dal periodo di carica/scarica. Ne segue la potenza termica che può essere scambiata una volta assegnata la temperatura desiderata del fluido:

$$Q = \frac{G(Fo(t)) / k_g + R_b}{L \cdot (T_g - T_f - T_p)} \quad (16)$$

L’equazione può essere riformulata per determinare la temperatura opportuna del fluido termovettore in relazione alla potenza media e all’orizzonta temporale di esercizio:

$$T_f = T_g - T_p \pm \frac{G(Fo(t)) / k_g + R_b}{L \cdot Q} \quad (17)$$

7.3 Gestione delle sonde geotermiche per l’attuazione di logiche di Demand Side Management

L’utilizzo di GSHP comporta un trasferimento del fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale dalla rete gas naturale alla rete elettrica. D’altra parte, l’utilizzo del vettore elettrico per la climatizzazione permette di utilizzare l’inerzia termica dell’involucro edilizio per il DSM. In presenza di GSHP è necessario valutare gli effetti della variazione di utilizzo delle sonde geotermiche sulla loro prestazione.

Infatti, dalla letteratura tecnica ([1], [5]) è noto che la riduzione del periodo di scambio nell'arco della giornata comporta una riduzione della prestazione del BHE. Pertanto, è stato valutato l'effetto del differimento di pacchetti di energia.

7.3.1 Metodo

Considerato che gli intervalli di tempo rilevanti sono tali per cui l'evoluzione del campo termico all'interno della sonda è molto rilevante, si è proceduto con prove sperimentali, utilizzando il campo dedicato esistente presso ENEA-Casaccia.

Sono state eseguite prove di scambio termico con temperatura di mandata costante e interruzione della circolazione nei periodi di stasi. Al fine di limitare le interferenze intergiornaliere tra le prove, sono state alternate prove con erogazione di energia e prove con estrazione di energia. Le misure sono state eseguite nei mesi di Luglio e Ottobre 2024. Sono stati utilizzati due sonde con diversa lunghezza. L'apparato sperimentale disponibile ha consentito la misura della temperatura del fluido e del campo di temperatura lungo la sonda. Un'esemplificazione delle rilevazioni e del calcolo dell'energia scambiata è illustrata in figura 7.

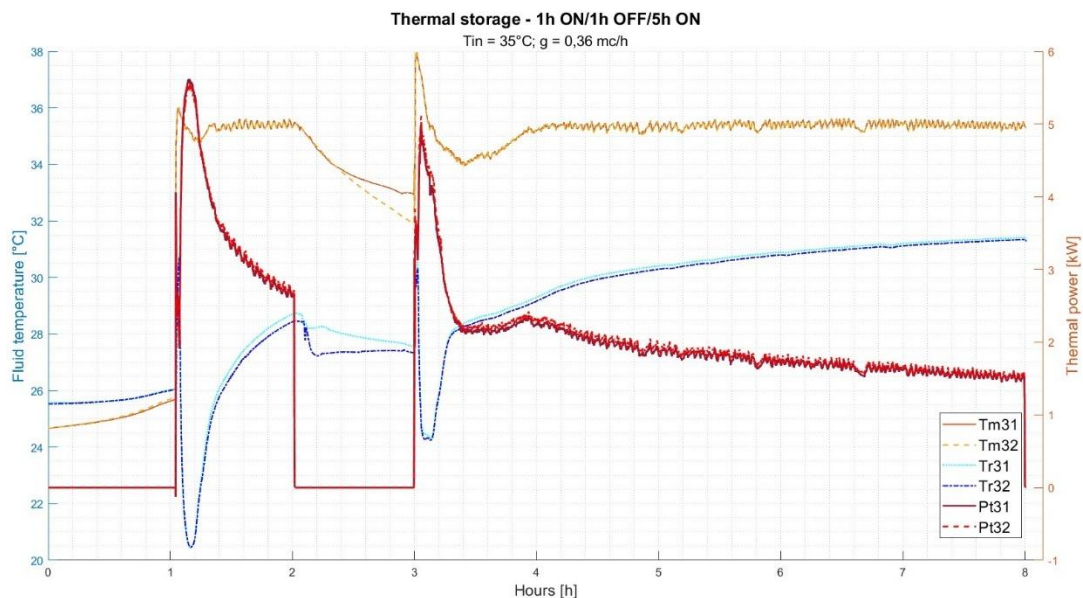


Figura 7 – Esempio di prova sperimentale di DSM

7.3.2 Risultati e discussione

Dall'analisi degli esiti delle prove emerge che l'attuazione di logiche di DSM non comporta riduzioni della prestazione. Per contro, si osservano alcuni miglioramenti delle prestazioni, seppure di entità non significativa nei limiti delle prove condotte.

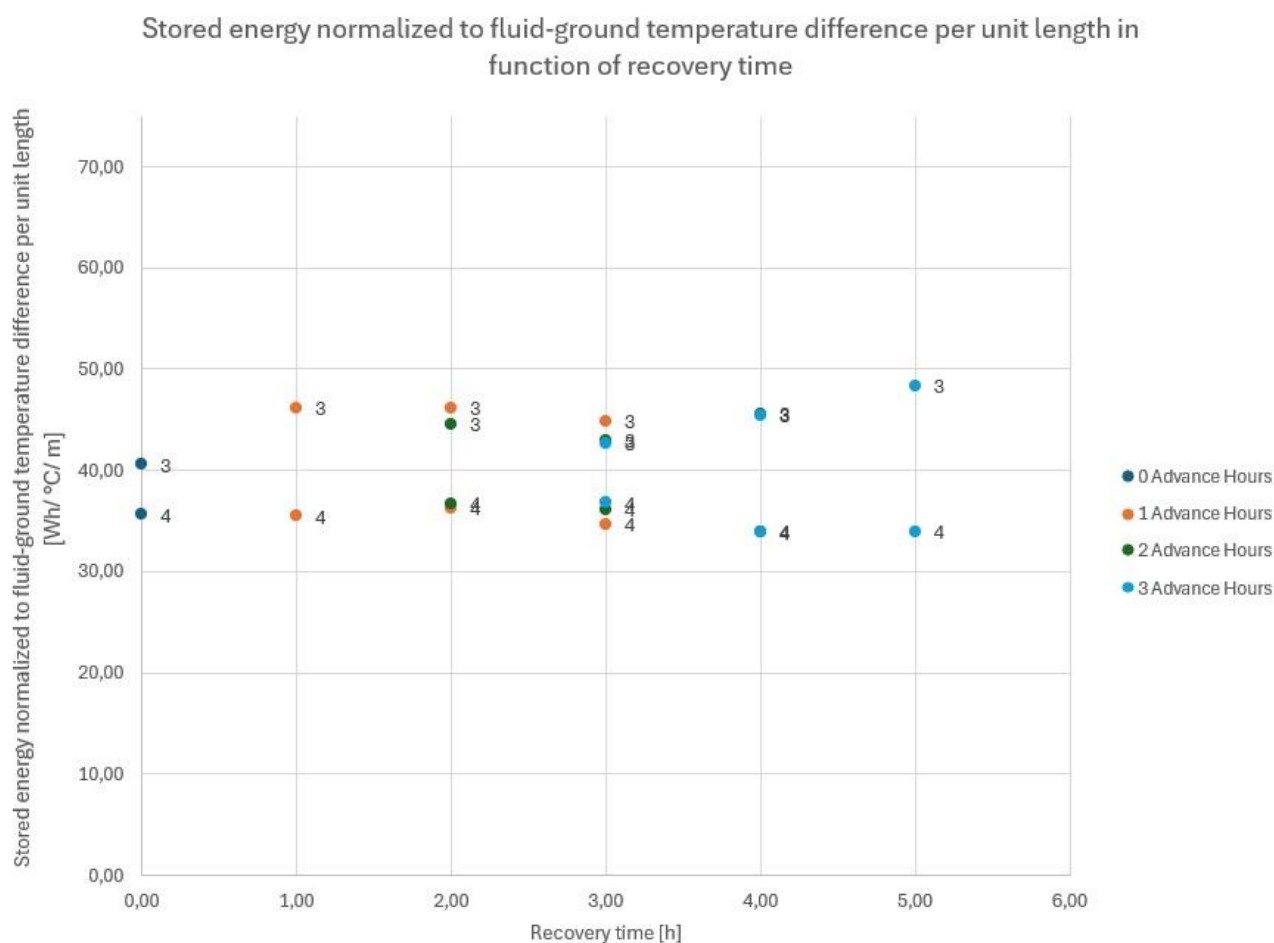


Figura 8 – Risultati delle prove di accumulo utilizzando i pozzi 3 e 4, a parametro il periodo di attività che viene anticipato, normalizzate per differenza di temperatura tra mandata del fluido e temperatura del terreno indisturbato e per la lunghezza della sonda

7.4 Bibliografia

- [1] J. Claesson, P. Eskilson, Conductive heat extraction to a deep borehole: thermal analyses and dimensioning rules, *Energy* 1988 (13-6), pp. 509-527
- [2] ASHRAE Handbook-HVAC Applications, Geothermal Energy, 2003 (Chapter 32)
- [3] M. Fossa, The temperature penalty approach to the design of borehole heat exchangers for heat pump applications, *Energy and Buildings* 43 (2011) 1473-1479
- [4] R. Croteau, L. Gosselin, Correlations for cost of ground-source heat pumps and for the effect of temperature on their performance, *Int. J. Energy Res.* 2015; 39:433-438
- [5] S.H.Baek, M.S.Yeo, K.W.Kim, Effects of the geothermal load on the ground temperature recovery in a ground heat exchanger, *Energy and Buildings* 136 (2017) 63-72

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

In questa linea di attività non ci si è avvalsi di servizi di consulenza.

9 Pubblicazioni scientifiche

Al momento, non sono ancora scaturite pubblicazioni scientifiche nel periodo di svolgimento dalla presente attività.

10 Eventi di disseminazione

Al momento, non sono ancora scaturiti eventi di disseminazione nel periodo di svolgimento dalla presente attività.