RdS
RICERCA DI SISTEMA

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

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

LA 4.2: Sistemi integrati: Simulazione del campo termico nel terreno per la valutazione delle interazioni con pompe di calore

E. Habib, A. Quintino, M. Corcione

DIAEE
Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

RdS_PTR22-24_PR1.7_ LA4.2_029

LA4.2: SISTEMI INTEGRATI: SIMULAZIONE DEL CAMPO TERMICO NEL TERRENO PER LA VALUTAZIONE DELLE INTERAZIONI CON POMPE DI CALORE

E. Habib, A. Quintino, M. Corcione

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*
Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali
Linea di attività: 4.2
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA
Responsabile Linea di Attività: Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica - Sapienza Università di Roma
Mese inizio previsto: gennaio 2022
Mese inizio effettivo: gennaio 2022
Mese fine previsto: giugno 2023
Mese fine effettivo: giugno 2023

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""
Responsabile scientifico ENEA: Anna Carmela Violante
Responsabile scientifico Co-beneficiario: Emanuele Habib

Indice

1 RISULTATI ATTESI 3
2 RISULTATI OTTENUTI 4
3 PRODOTTI ATTESI 5
4 PRODOTTI SVILUPPATI 6
5 ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI 7
6 SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 8
7 DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 9
8 CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE 33
9 PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE 34
10 EVENTI DI DISSEMINAZIONE 35

1 Risultati attesi

Lo scopo dell'attività di ricerca è la messa a punto di un modello numerico di sonde geotermiche da impiegare per la simulazione di diverse configurazioni di esercizio finalizzate alla valutazione delle prestazioni a breve, medio e lungo termine di un sistema con pompe di calore geotermiche.
Il motivo della ricerca risiede nella considerazione che lo studio delle interazioni di pompe di calore con sonde geotermiche per la captazione del calore di evaporazione dal terreno richiede l'analisi del funzionamento durante periodi di tempo annuali e pluriennali. Infatti, il terreno svolge la duplice funzione di accumulo locale e di trasmissione del calore dalle porzioni circostanti di terreno e dall'atmosfera. Pertanto, il fenomeno raggiungerà una condizione stazionaria solo quando il calore captato durante l'inverno diviene pari al calore trasmesso dalla superficie e dagli strati profondi del terreno. Quindi, durante l'esercizio dell'impianto si ha un progressivo ampliamento della porzione di terreno interessata dal fenomeno. Inoltre, le variazioni climatiche interannuali possono determinare fluttuazioni delle porzioni di terreno interessate dallo scambio di calore, sia per incremento del calore captato che per diminuzione del calore trasmesso dalla superficie. Pertanto, considerata la limitata durata possibile degli esperimenti a scala reale, nonché l'impossibilità di modificare le condizioni climatiche esterne, è indispensabile integrare i dati sperimentali con simulazioni numeriche al calcolatore.
Sulla base delle rilevazioni sperimentali realizzate presso il C.R. ENEA Casaccia si vuole realizzare il modello numerico di sonde geotermiche in grado di valutare le prestazioni dell'impianto nelle seguenti configurazioni:

- Esercizio annuale con sola estrazione di calore dal terreno;
- Esercizio giornaliero con sola estrazione di calore dal terreno;
- Esercizio giornaliero con scambio di calore bilanciato.

In dettaglio, i risultati attesi possono essere riepilogati in alcuni punti, di seguito esposti.
Il primo risultato consiste nella validazione del modello di simulazione, previa definizione dei principali parametri, come dimensione del dominio di integrazione, la densità di discretizzazione spaziale del campo (mesh) e limiti del passo temporale di integrazione delle equazioni.
Una volta validato il modello, saranno sviluppate le seguenti simulazioni, che costituiranno gli altri risultati attesi:

- Simulazioni del campo termico all'interno del terreno in presenza di scambio mediante sonde geotermiche in presenza di esercizio con sollecitazione periodica con sola captazione di calore con periodo di 1 anno. Tali simulazioni sono rappresentative dell'esercizio annuale di una pompa di calore.
- Simulazioni del campo termico all'interno del terreno in presenza di scambio mediante sonde geotermiche in presenza di esercizio con successione di sollecitazioni con sola captazione di calore con periodo complessivo di 1 giorno. Tali simulazioni sono rappresentative dell'esercizio giornaliero di una pompa di calore.
- Simulazioni del campo termico all'interno del terreno in presenza di scambio mediante sonde geotermiche in presenza di esercizio con successione di sollecitazioni periodiche con erogazione e successiva captazione di calore con scambio complessivo nullo nel periodo. Tali simulazioni sono rappresentative dell'utilizzo del terreno come accumulo di energia.

2 Risultati ottenuti

I risultati attesi sopra indicati sono stati ottenuti e lo sviluppo dell'attività di ricerca è esposto in dettaglio nel paragrafo 7 di questo documento.

Il modello di simulazione del campo di temperatura in strati di terreno interagenti con sonde geotermiche, sviluppato e validato in questa linea di attività, ha mostrato la capacità di replicare correttamente i valori misurati in campo, entro la precisione delle misure, ad eccezione degli strati superficiali. I campi di temperatura rilevati presentano alcune anomalie, apparentemente riconducibili ad interazioni termiche con falda superficiale o risalite idrotermali. Tali aspetti richiedono uno specifico approfondimento che sarà svolto nella Linea di attività 2.3.

Le simulazioni delle prestazioni per regime di funzionamento annuale e giornaliero con diverse condizioni di esercizio hanno confermato la qualità delle simulazioni.

In regime annuale è necessario estendere le simulazioni a non meno di 10 anni per raggiungere un regime periodico stabilizzato. D'altra parte, le prestazioni del primo anno presentano scostamenti modesti rispetto al regime stabilizzato.

L'esercizio giornaliero intermittente ha evidenziato un miglioramento della prestazione specifica. Tale aspetto merita uno specifico approfondimento che sarà svolto nella linea di attività 2.3 per determinare l'eventuale esistenza di un massimo e la sua dipendenza dai parametri di esercizio.

Il funzionamento con inversione infragiornaliera del verso del flusso mostra una prestazione interessante. Per poterne valutare la sua applicabilità a strategie di accumulo a breve termine è necessario accoppiarla ad un modello di pompa di calore geotermica (GSHP) al fine di valutare l'efficienza complessiva di accumulo.

In generale, i risultati delle simulazioni forniscono le basi necessarie per la prosecuzione dell'attività pianificata per la linea di attività 4.3, che prevede la formulazione di equazioni di correlazione per la progettazione e la gestione di sonde geotermiche abbinate a pompe di calore.

3 Prodotti attesi

Il prodotto atteso per la linea di attività 4.2 è il presente Rapporto tecnico descrittivo dei risultati conseguiti.

4 Prodotti sviluppati

Il presente Rapporto tecnico descrittivo dei risultati conseguiti costituisce il prodotto sviluppato in questa linea di attività. In esso sono dettagliatamente descritte le fasi di realizzazione del modello di simulazione e validazione del campo di temperatura in strati di terreno interagenti con sonde geotermiche e i risultati dell'applicazione del modello per la valutazione delle prestazioni dell'impianto geotermico nelle seguenti configurazioni:

- Esercizio annuale con sola estrazione di calore dal terreno;
- Esercizio giornaliero con sola estrazione di calore dal terreno;
- Esercizio giornaliero con scambio di calore bilanciato.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

L'attività di ricerca non ha avuto scostamenti, né tecnici, né economici rispetto a quanto preventivato. Non si evidenziano particolari criticità emerse durante gli studi, che hanno invece consentito di individuare alcune possibili direttrici di ricerca sviluppabili nella successiva linea di attività 4.3.

6 Sintesi delle attività svolte

I dati raccolti presso il campo geosonde del C.R. ENEA Casaccia sono stati impiegati per realizzare e validare un modello parametrico di simulazione del campo termico all'interno del terreno. I parametri impiegati garantiscono che il modello numerico contempli in modo realistico tutti i fenomeni rilevanti per le prestazioni del sistema. In particolare, è stata verificata l'influenza dei limiti del passo temporale di simulazione, che è il più rilevante ai fini dei tempi di calcolo.

Dopo la definizione del modello, sono state avviate le simulazioni di diverse condizioni di esercizio finalizzate alla valutazione delle prestazioni con diversi intervalli temporali e modalità di sfruttamento della risorsa geotermica:

- Esercizio annuale con sola estrazione di calore dal terreno, valutando l'effetto delle modalità di frazionamento del periodo di sollecitazione;
- Esercizio giornaliero con sola estrazione di calore dal terreno;
- Esercizio giornaliero con scambio di calore bilanciato.

7 Dettaglio delle attività svolte

Nel seguito si descriveranno in dettaglio la procedura di realizzazione del modello numerico di sonde geotermiche, la sua validazione e i risultati della sua applicazione nelle seguenti configurazioni:

- Esercizio annuale con sola estrazione di calore dal terreno;
- Esercizio giornaliero con sola estrazione di calore dal terreno;
- Esercizio giornaliero con scambio di calore bilanciato.

7.1 Modello di simulazione

Per lo sviluppo del modello è stato utilizzato il software ANSYS FLUENT su dominio tridimensionale riferito agli strati solidi. Infatti, la trasmissione di calore da scambiatori interrati (BHE – Borehole Heat Exchanger) 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.
In assenza di porzioni di dominio in cui sia implementato un fluido, il programma risolve esclusivamente l'equazione dell'energia. Per ovvie ragioni tutte le simulazioni sono state svolte in transitorio. È stato scelto un metodo first-order di integrazione temporale con passo variabile. Infatti, i transitori sono caratterizzati da gradienti temporali fortemente variabili per cui il tempo di calcolo complessivo è significativamente ridotto. Le impostazioni sono:

- Adaptive time step
- minimum step change factor 0.5
- maximum step change factor 2.0
- initial time step size 1 s

Per ciascun passo temporale è impostato un limite di iterazioni di 25, sufficiente a determinare Residuals inferiori a 10^{-7}, prossimi al limite inferiore raggiungibile con iterazioni illimitate.
La conformazione del BHE è corrispondente a quella dell'impianto sperimentale presente presso ENEA – Casaccia, corrispondente al più diffuso standard del settore. In particolare, lo scambiatore è costituito da un pozzo all'interno del quale sono inseriti due circuiti a U a tubi paralleli.

7.2 Mesh – discretizzazione spaziale

Nella trasmissione di calore da scambiatori interrati (BHE – Borehole Heat Exchanger) il campo di temperatura presenta gradienti fortemente variabili nello spazio. Infatti, in prossimità della superficie di scambio si hanno i massimi gradienti che successivamente vanno degradando, fino ad annullarsi a distanza tali che non si risenta più dell'azione dello scambiatore. Il gradiente di temperatura presenta un decremento esponenziale in quanto la capacità termica è proporzionale alla distanza, smorzando l'onda termica generata dal BHE.

Tabella 1: Impostazioni per la generazione automatica della mesh.

Mesh settings	
Physics preference	CFD
Element order	Linear
Method	Patch conforming method
Definition method	Tetrahedrons
Scoping method	Geometry selection
Definition type	Element size
Min element size	0,025 [m]

Mesh settings	
Growth rate	1,2425
Defeature size	0,05 [m]
Curvature normal angle	18°
Inflation option	Smooth transition
Transition ratio	0,275
Maximum layers	5

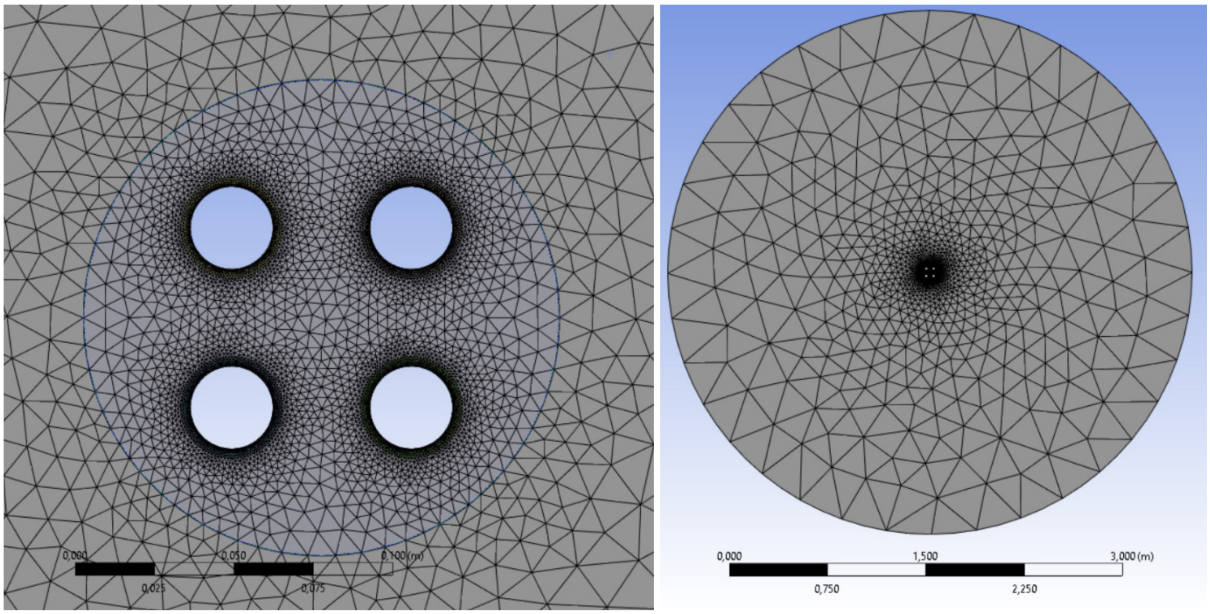

Figura 1: Esemplificazione della mesh

Tabella 2: Profondità di penetrazione dell'onda termica per diversi periodi

periodo	penetrazione
[s]	[m]
1 ora	3600	0,03
1 giorno	86400	0,17
1 mese	2592000	0,91
1 anno	31536000	3,17

Pertanto, è stato scelto di utilizzare una discretizzazione spaziale (mesh) variabile con progressivo diradamento mediante l'utilizzo del generatore automatico di mesh ANSYS MESHING con "Patch conforming method" e celle di forma tetraedrica, come illustrato in figura 1. Per il campo nel terreno circostante il pozzo sono stati utilizzati i parametri riportati in Tabella 1.

7.3 Dominio di integrazione

Trattandosi di un fenomeno relativo ad un campo chiuso, la simulazione numerica introduce una limitazione geometrica artificiale che "comprime" il campo di temperatura entro i limiti del dominio di integrazione scelto. Al fine di garantire che le scelte arbitrarie non modifichino i risultati, è stata svolta un'analisi di sensibilità del campo alla dimensione del dominio.

Come noto dalla letteratura tecnica di base, l'ordine di grandezza della profondità di penetrazione δ di un'onda termica in un campo piano è dato dalla seguente equazione (in cui α è la diffusività termica e t_0 è il periodo della sollecitazione):

$$\delta = \sqrt{\frac{\alpha\, t_0}{\pi}} \qquad (1)$$

La diffusività termica degli strati di terreno è inferiore a 10^{-6} m^2/s. Quindi, è possibile determinare la profondità di penetrazione di riferimento per diversi periodi di interesse, come illustrato in tabella 2.
L'analisi di sensibilità è stata condotta ripetendo le simulazioni per sollecitazione termica sinusoidale con media nulla (pari alla temperatura iniziale) applicata al bordo esterno del pozzo a domini di differente estensione, ottenuti ritagliando quello originario di diametro 17 m. La valutazione degli scostamenti in relazione ai valori del campo di temperatura in porzioni congruenti mostra un notevole rumore conseguente ai piccoli scostamenti dei centri delle celle per effetto della nuova mesh che è stato necessario generare di volta in volta. Pertanto, per la comparazione è stata determinata la distanza di perturbazione del campo di temperatura, definita come la distanza oltre la quale la variazione del campo di temperatura rispetto al valore iniziale è inferiore allo scarto ε, scelto pari a 1%. I risultati, illustrati nelle figure da 2 a 4, mostrano che per sollecitazioni di periodo fino a 1 mese ($3.6x10^6$ s) un diametro di 5 m è sufficiente perché non vi sia una significativa sensibilità. Per un periodo di 1 anno ($3.6x10^7$ s) si osserva una sensibilità della distanza di perturbazione per tutte le estensioni analizzate dei domini (figura 5). Pertanto, si ritiene che sia necessario utilizzare il dominio con diametro 17 m per le simulazioni.

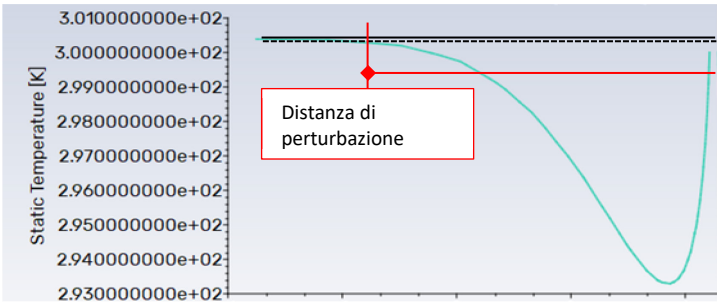

Figura 2: Esemplificazione della distanza di perturbazione

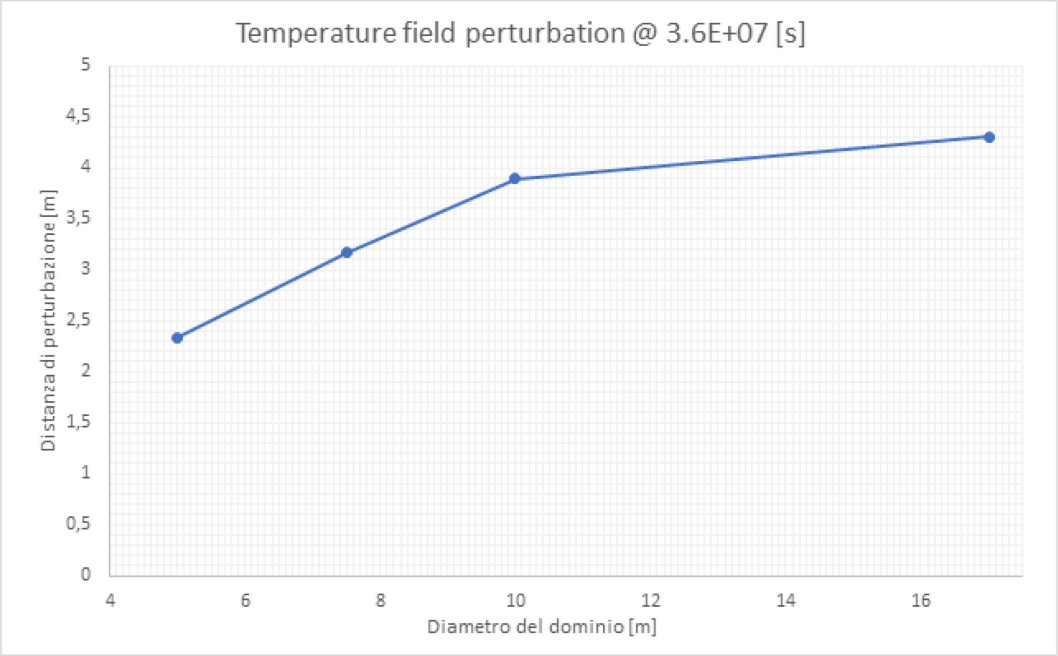

Figura. 3: Distanza di perturbazione in relazione alla dimensione del dominio per una sollecitazione con periodo superiore a 1 anno

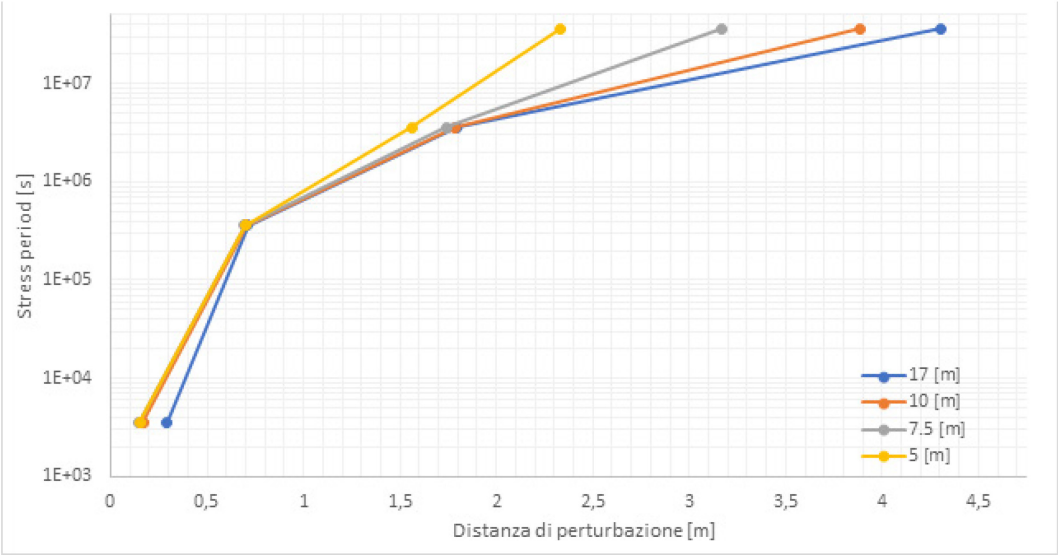

Figura 4: Distanza di perturbazione in relazione al periodo della sollecitazione per diverse dimensioni del dominio

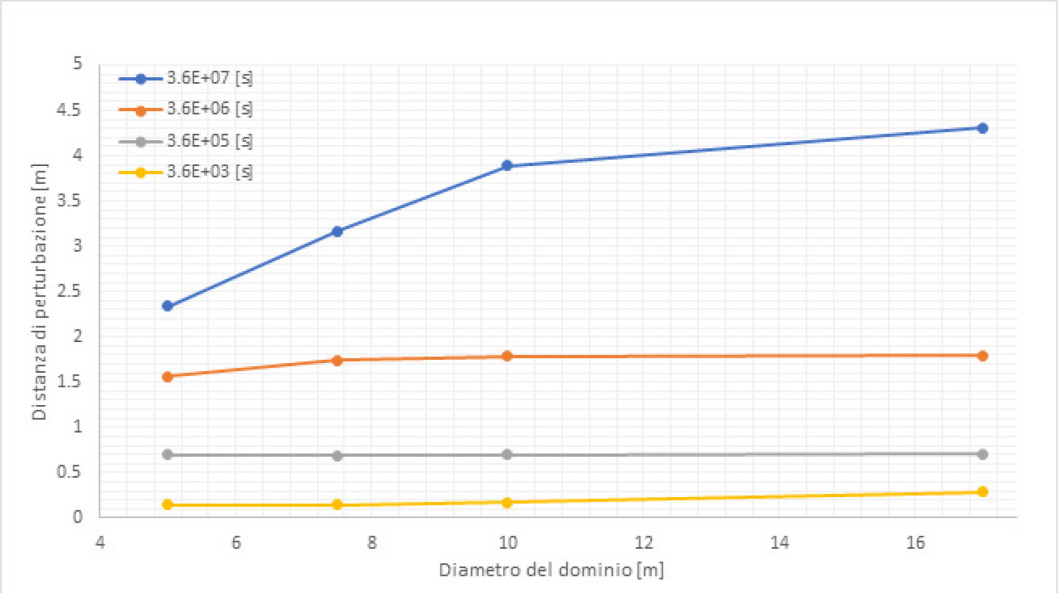

Figura 5: Distanza di perturbazione in relazione alla dimensione del dominio per diversi periodi della sollecitazione

7.4 Validazione

7.4.1 Sistema di riferimento

Per la validazione del modello sono stati utilizzati i dati delle rilevazioni acquisite presso l'impianto sperimentale di ENEA-Casaccia.

Il sito è costituito di 4 BHE con diverse lunghezze. Il minore ha una lunghezza di 35 m, il più ha profondità pari a 85 m. Ogni scambiatore è costituito da una coppia di tubi a U. Ogni pozzo è equipaggiato con un sistema di rilevazione distribuito di temperatura (DTS – Distributed Temperature Sensing) a fibra ottica che consente di misurare la temperatura del suolo con passo di 2 metri.

Il terreno interessato dai BHE è costituito da 20 strati come riportati sinteticamente nelle figure 6 e 7. Gli spessori degli strati superficiali sono leggermente differenti tra i pozzi, nonostante siano disposti con distanze reciproche relativamente moderate. Le proprietà termofisiche del terreno, determinate durante le fasi di avviamento dell'apparato sperimentale sono riportate in Tabella 3.

Le rilevazioni delle temperature sono disponibili con cadenza giornaliera con brevi interruzioni delle rilevazioni. La precisione delle misure di temperatura è ± 0.1 K.

Tabella 3: Proprietà termofisiche degli strati

Layer	Density [kg/m^3]	Specific heat [J/kg K]	Thermal conductivity [W/m K]	Thermal diffusivity [m^2/s]
1	1787	1455	0,77	2,96E-07
2	1347	1930	0,61	2,35E-07
3	1300	2000	0,84	3,23E-07
4	1278	2035	0,87	3,35E-07
5	1224	2124	0,97	3,73E-07
6	1345	1993	0,76	2,84E-07
7	1533	1696	0,73	2,81E-07
8	1998	1301	0,94	3,62E-07
9	2042	1273	1,20	4,62E-07
10	2791	932	1,55	5,96E-07
11	2166	1200	1,02	3,92E-07
12	2166	1200	1,02	3,92E-07
13	2110	1232	0,87	3,35E-07
14	1741	1493	0,95	3,65E-07
15	1624	1600	0,88	3,39E-07
16	1605	1620	0,84	3,23E-07
17	1600	1625	0,87	3,35E-07
18	1600	1625	0,82	3,15E-07
19	1664	1563	0,71	2,73E-07
20	1767	1471	1,00	3,85E-07

Figura 6: Visione assonometrica della composizione del terreno

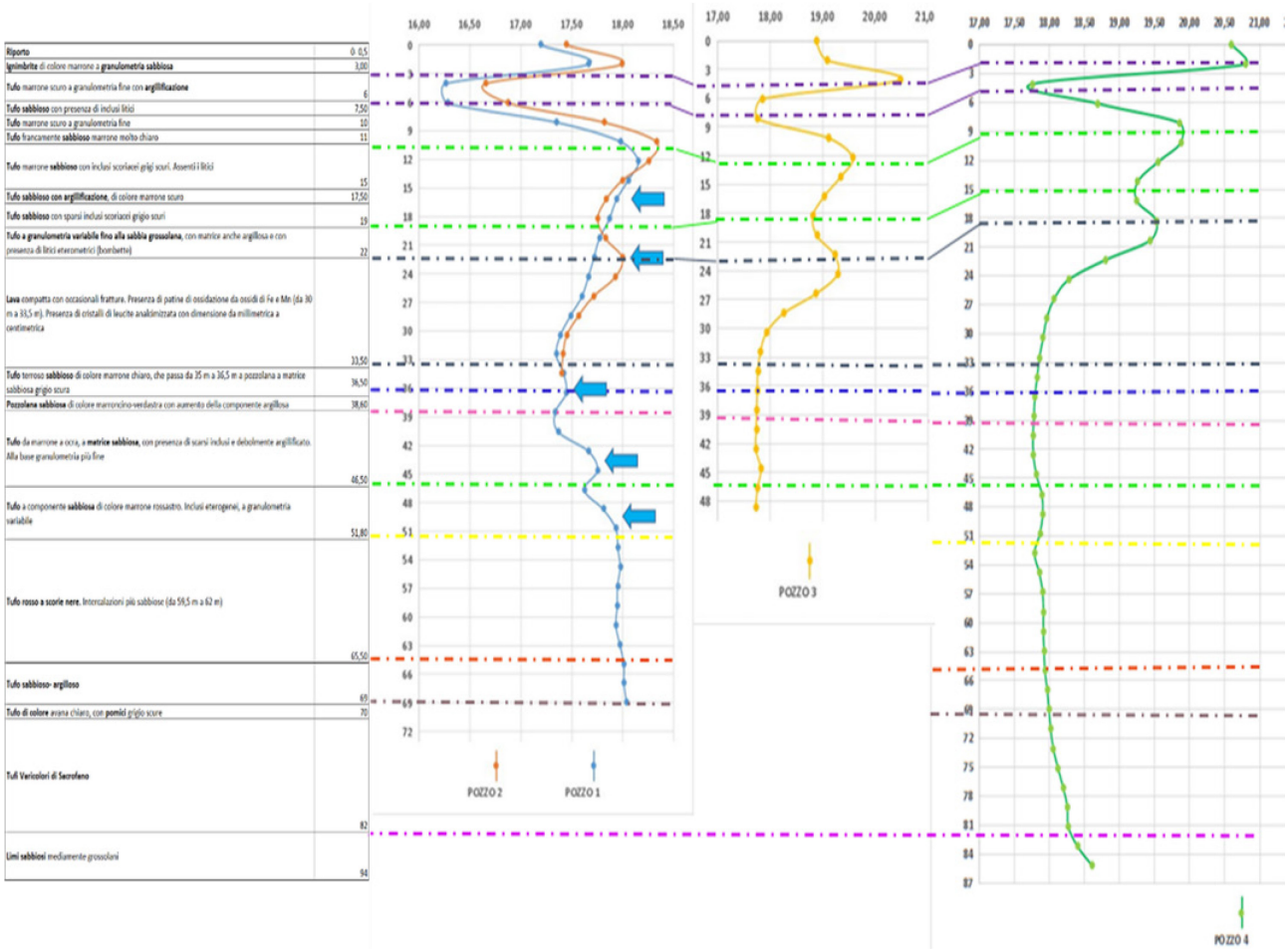

Figura 7: Composizione del terreno

7.4.2 Comparazione di simulazioni e dati sperimentali

Le misure dei campi di temperatura durante i periodi di attivazione dei BHE presenta numerose incertezze conseguenti alla limitata disponibilità dei dati relativi agli scambiatori. Infatti, le misure di temperatura di mandata e ritorno dai pozzi sono acquisite in corrispondenza dei collettori di raccordo. Pertanto, la potenza scambiata dipende sia dalla trasmissione di calore delle tubazioni di raccordo tra collettore e pozzo che dalla trasmissione di calore all'interno del pozzo. Questo limite inficia gravemente la riproducibilità del campo di temperatura mediante simulazione numerica. Peraltro, l'intermittenza di esercizio comporta una disuniformità del campo di temperatura per effetto della sovrapposizione di diverse onde termiche.
Ciononostante, sono disponibili le rilevazioni pressoché ininterrotte del campo di temperatura da Maggio 2021 ad Aprile 2022. Durante questo periodo non vi sono stati scambi di calore da parte dei BHE. Quindi, è possibile una validazione del modello di simulazione utilizzando questi dati. I risultati relativi ai pozzi di maggiore profondità, 1 e 4 sono illustrati nelle figure da 8 a 26.
Si osserva un generale buon accordo dei dati, con scostamenti inferiori a 0.5 K, ad eccezione degli strati superficiali, fino a circa 15m di profondità. Nonostante nei primi mesi i dati presentino qualche maggiore scostamento, legato a disuniformità del campo di temperatura rilevato, via via che questo campo si "rilassa" con riduzione dei gradienti, aumenta l'affinità tra i risultati delle simulazioni e le misure, replicando correttamente anche alcune inversioni del gradiente verticale.

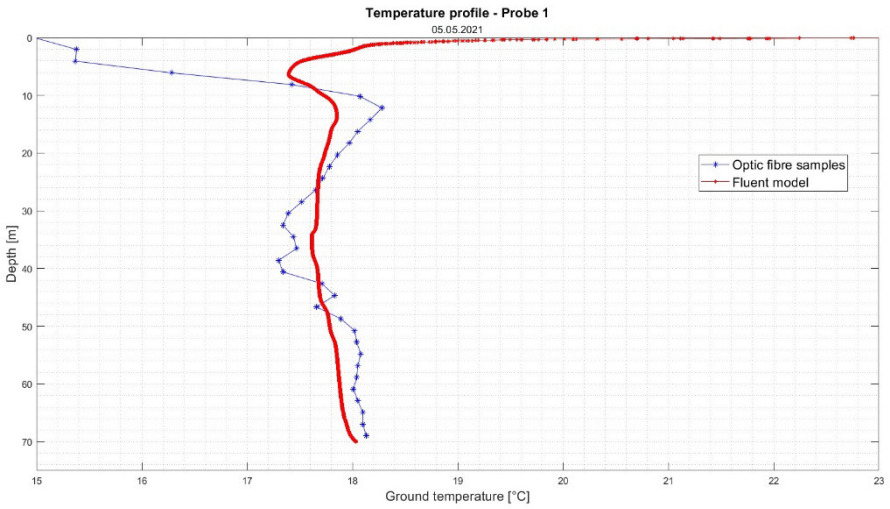

Figura 8: Pozzo 1 – Maggio 2021

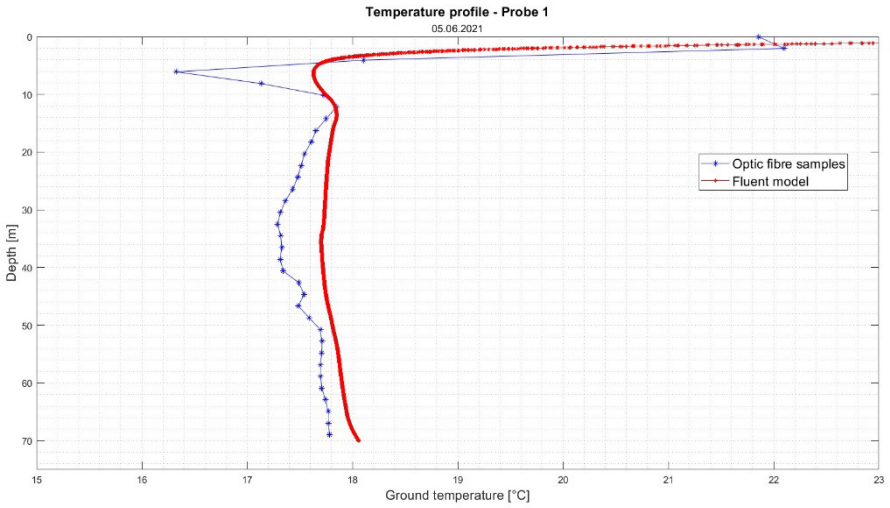

Figura 9: Pozzo 1 – Giugno 2021

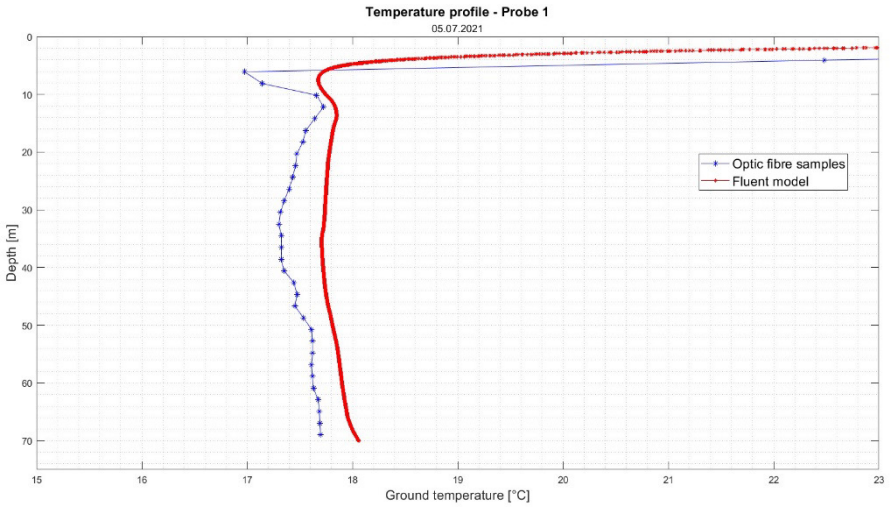

Figura 10: Pozzo 1 – Luglio 2021

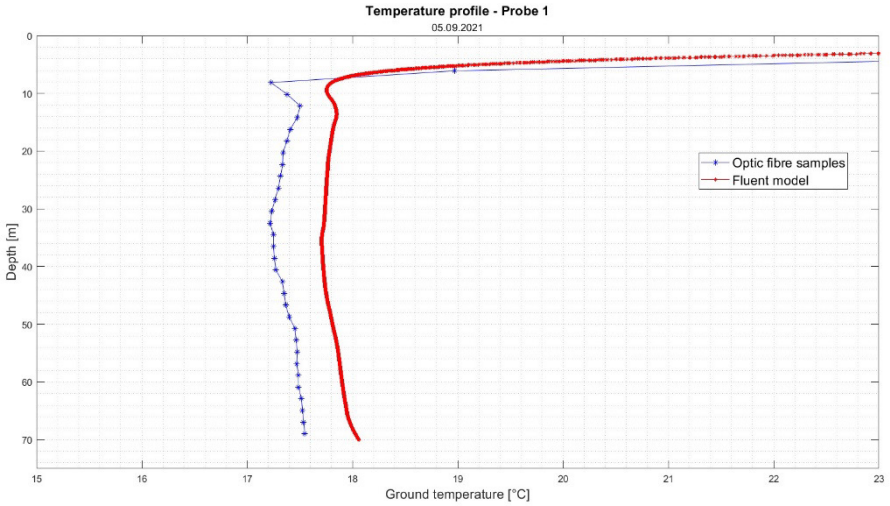

Figura 11: Pozzo 1 – Settembre 2021

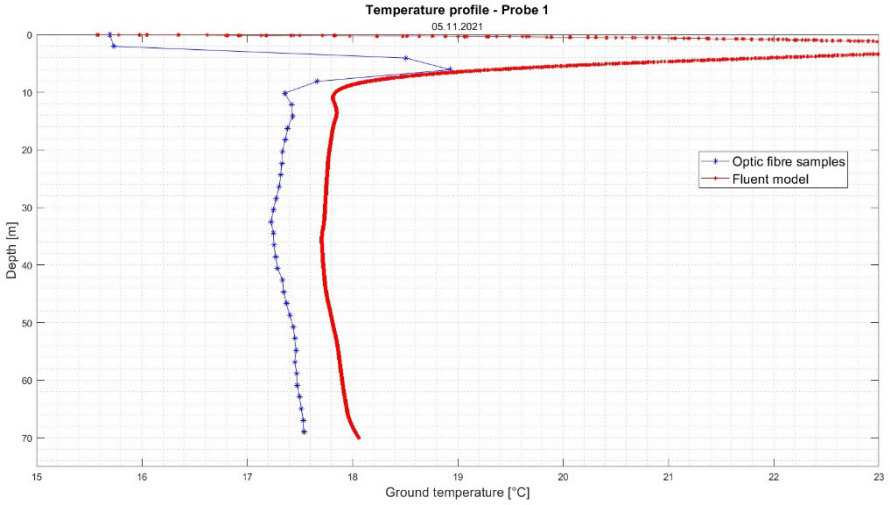

Figura 12: Pozzo 1 – Novembre 2021

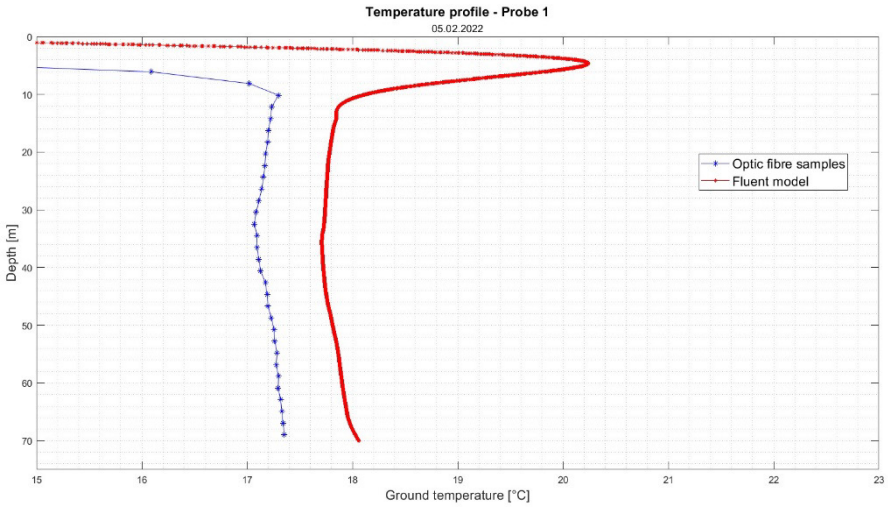

Figura 13: Pozzo 1 – Febbraio 2022

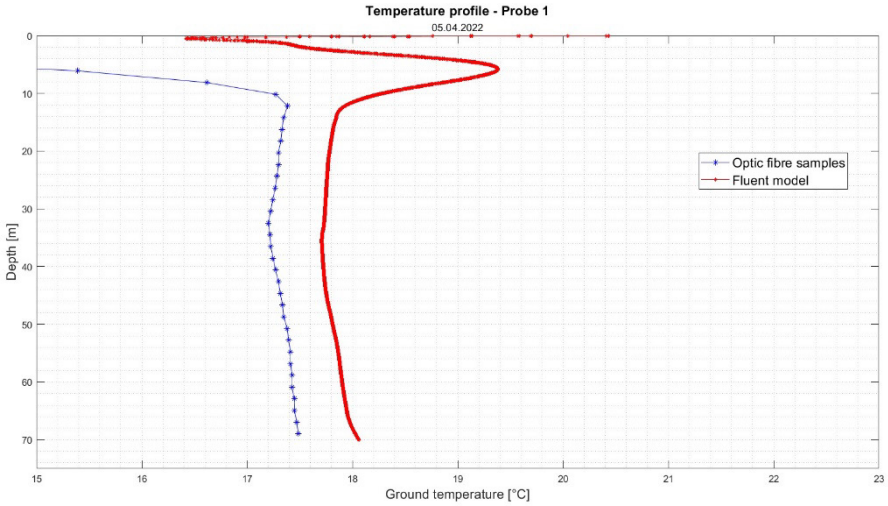

Figura 14: Pozzo 1 – Aprile 2022

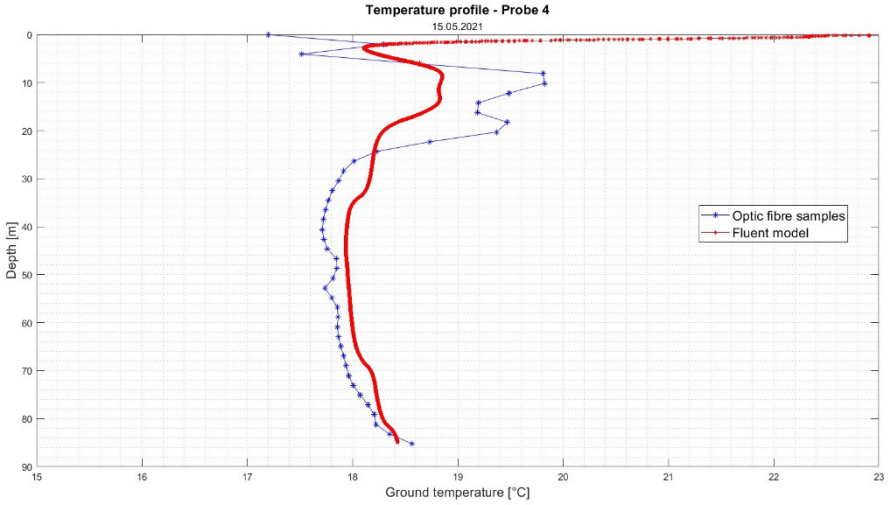

Figura 15: Pozzo 4 – Maggio 2021

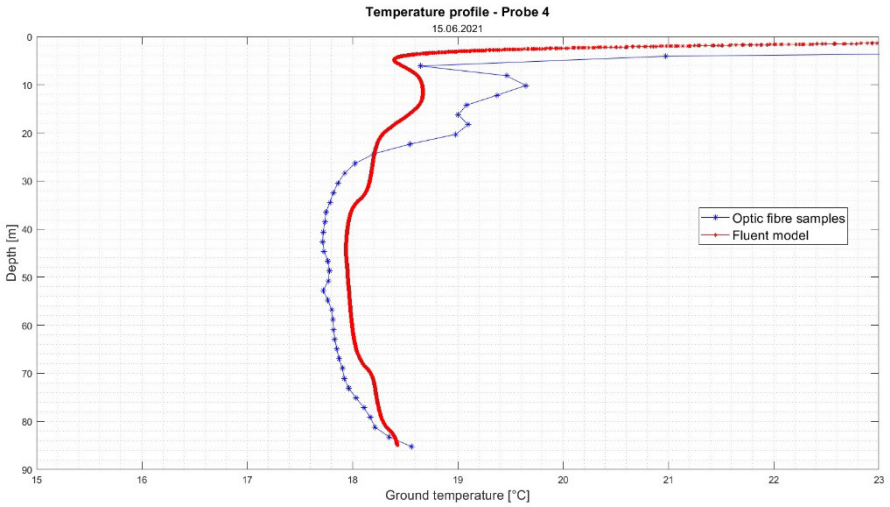

Figura 16: Pozzo 4 – Giugno 2021

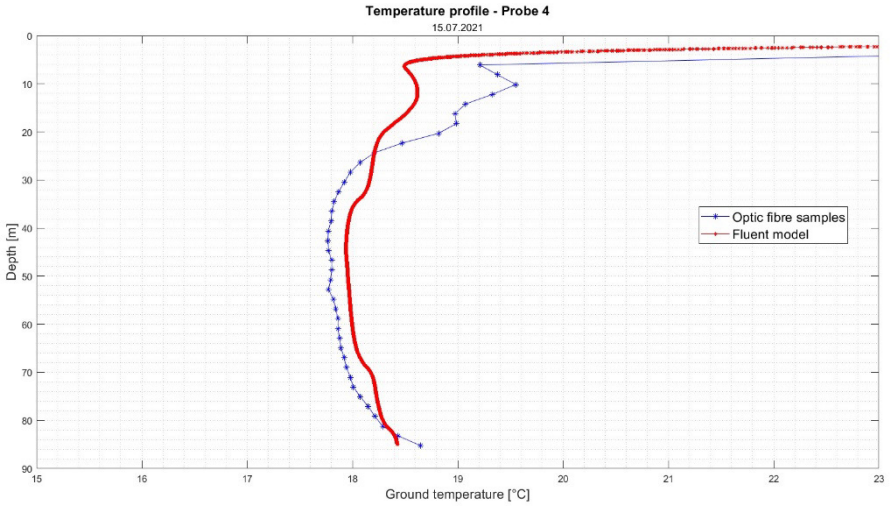

Figura 17: Pozzo 4 – Luglio 2021

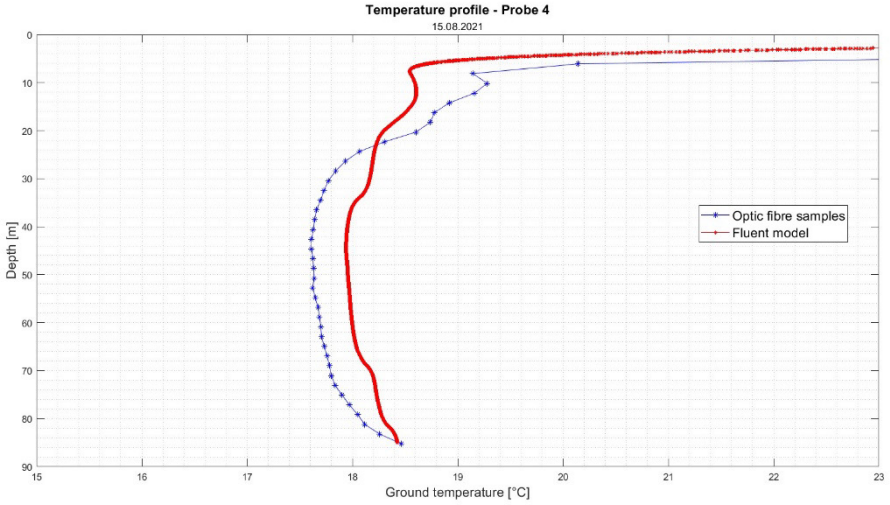

Figura 18: Pozzo 4 – Agosto 2021

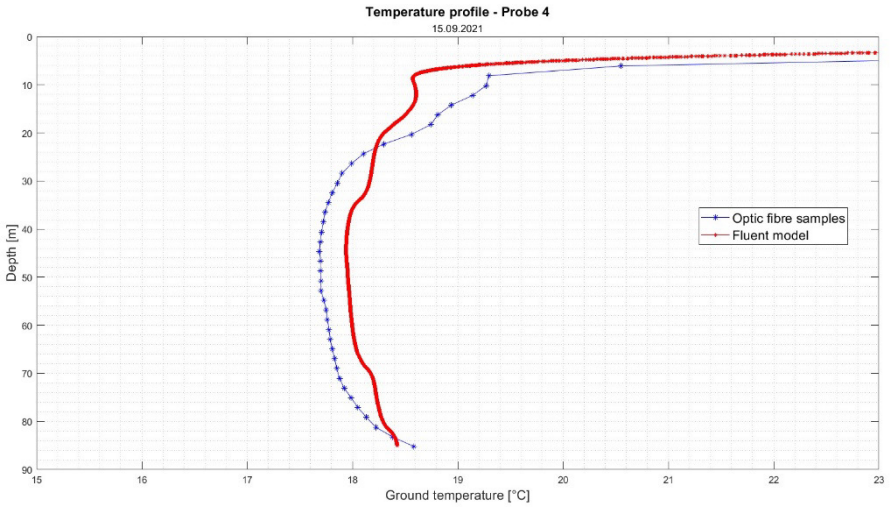

Figura 19: Pozzo 4 – Settembre 2021

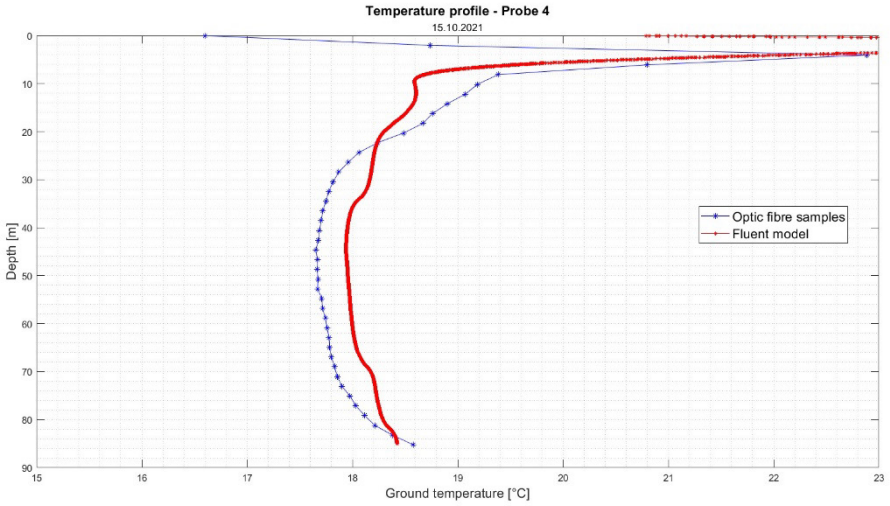

Figura 20: Pozzo 4 – Ottobre 2021

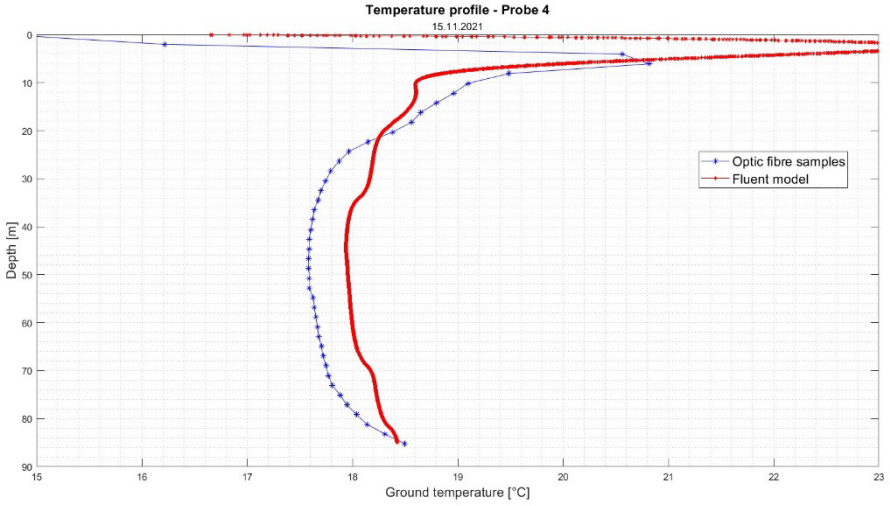

Figura 21: Pozzo 4 – Novembre 2021

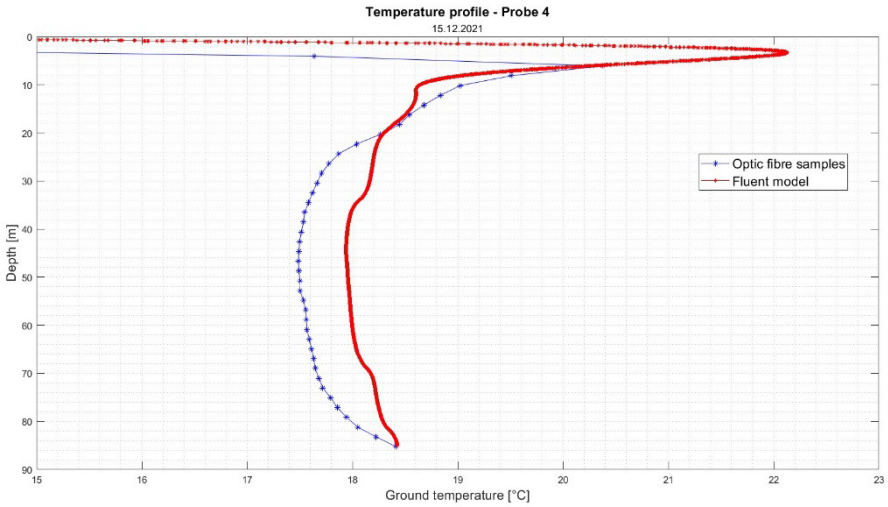

Figura 22: Pozzo 4 – Dicembre 2021

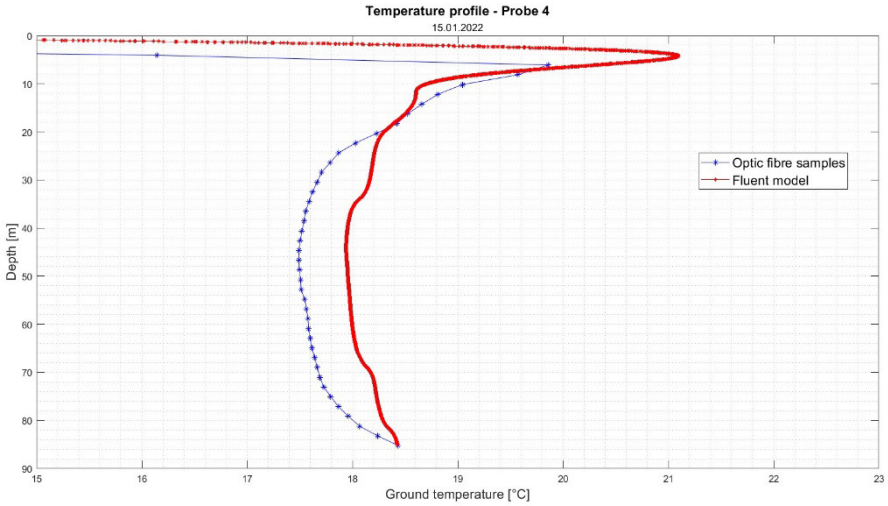

Figura 23: Pozzo 4 – Gennaio 2022

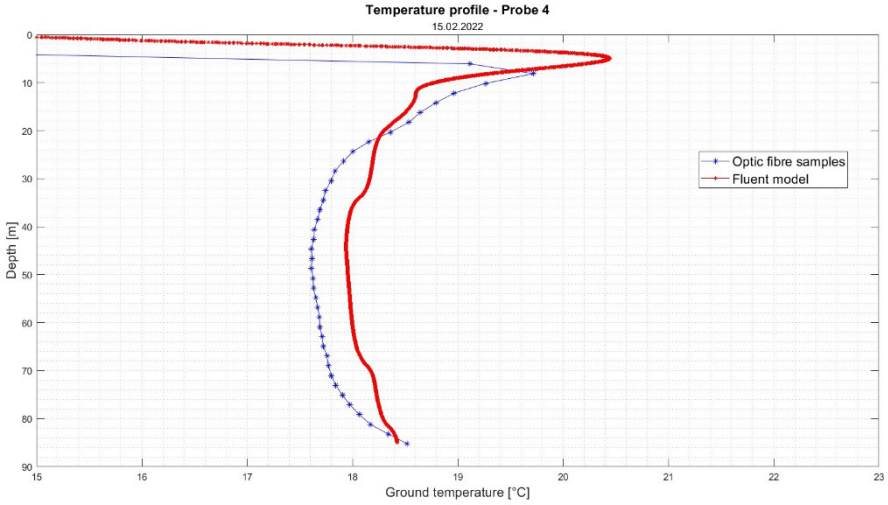

Figura 24: Pozzo 4 – Febbraio 2022

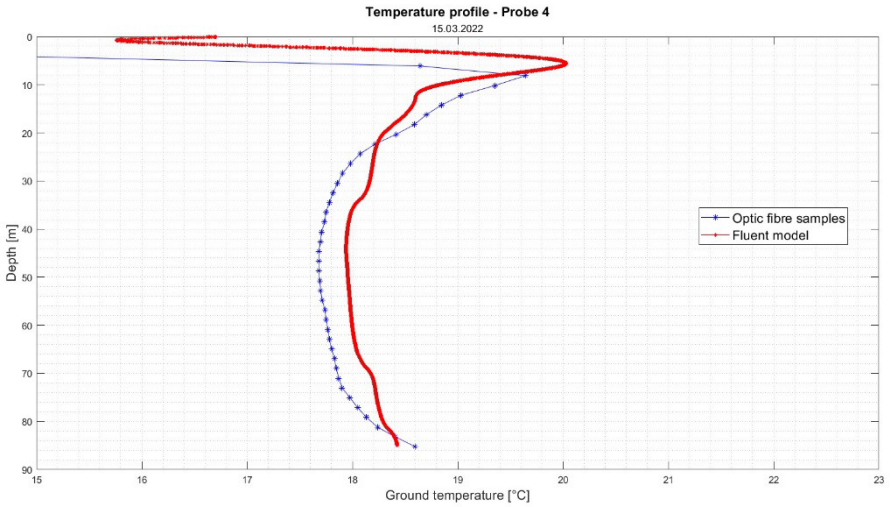

Figura 25: Pozzo 4 – Marzo 2022

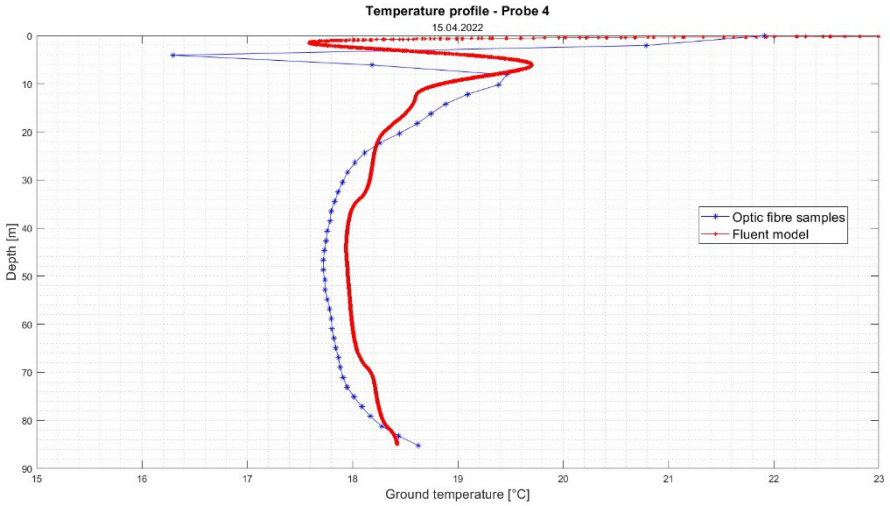

Figura 26: Pozzo 4 – Aprile 2022

7.5 Risultati

7.5.1 Simulazione di esercizio in sola captazione con periodo di 1 anno

Il campo di temperatura nel terreno per effetto dell'esercizio annuale di BHE è stato valutato per diversi valori di potenza specifica scambiata. È stata impostata una potenza assorbita uniforme dalla superficie del BHE per l'intero periodo di climatizzazione invernale, al termine del quale si interrompe l'esercizio dello scambiatore. Il periodo di riscaldamento utilizzato è quello di riferimento per Roma, dal 1 novembre al 15 aprile. La sollecitazione superficiale è stata simulata calcolata con funzione sinusoidale riferita alla massima escursione della temperatura media giornaliera e all'irraggiamento solare incidente con coefficiente d'assorbimento del terreno pari a 0.6. Il coefficiente di adduzione della superficie del terreno è stato imposto pari a 25 W/m^2 K, come usuale. Ovviamente, essendo necessaria energia per l'evaporazione della pompa di calore si ha una riduzione della temperatura superficiale.

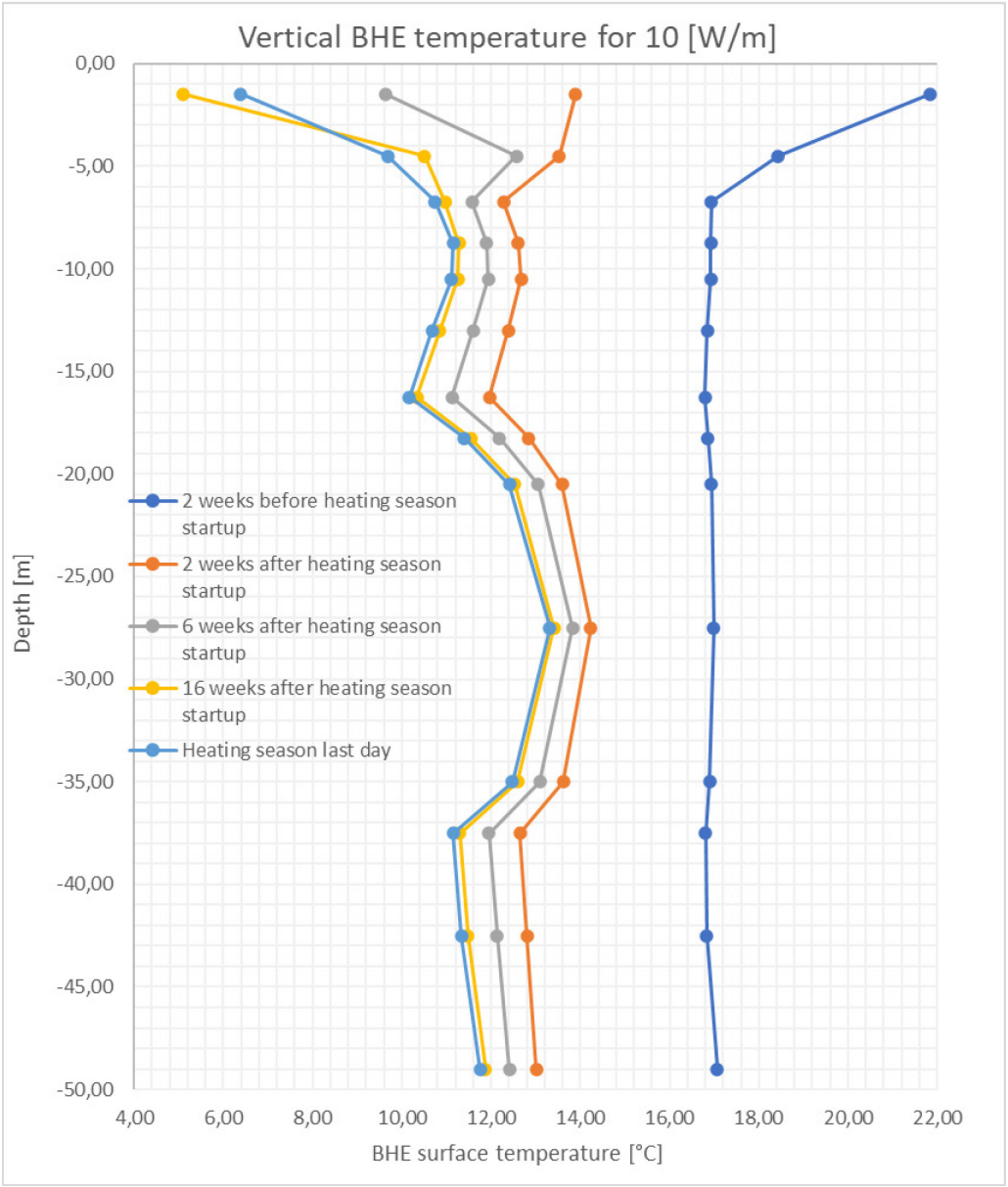

Figura 27: Campo di temperatura sulla superficie del BHE in diversi istanti

Il campo di temperatura lungo l'asse manifesta una significativa disomogeneità conseguente alle diverse proprietà degli strati costituenti il terreno, specie nelle prime settimane di esercizio, come mostrato in figura 27. Nei dintorni del BHE si ha una progressiva riduzione della temperatura fino al raggiungimento di una condizione di saturazione con forte riduzione del gradiente temporale di variazione della temperatura, come illustrato nelle figure 28 e 29. Il recupero del campo di temperatura conseguente all'interruzione dell'assorbimento del calore mostra un rapido recupero della temperatura, tanto maggiore quanto più intensa è stata la potenza scambiata, come illustrato in figura 28. Come prevedibile, i gradienti termici nei dintorni del BHE raggiungono rapidamente condizioni stazionarie durante il periodo di assorbimento del calore. All'interruzione dell'esercizio si una rapida riduzione dei gradienti che diventano pressoché nulli, come illustrato in figura 29.

Le simulazioni sono state sviluppate su un periodo di 10 anni, orizzonte temporale indicato in [1,2] come periodo di assestamento degli impianti. I risultati, illustrati in figura 30, mostrano che la durata del transitorio iniziale dell'impianto fino al raggiungimento di un regime periodico stabilizzato dipende dall'intensità della potenza termica scambiata. Considerato che l'incremento del periodo comporta un ampliamento della zona

di influenza del campo termico che potrebbe essere condizionato dalla scelta della dimensione del dominio di integrazione, è stata valutata la temperatura del bordo esterno del dominio, come illustrato in figura 31. Si osserva che dopo 10 anni la temperatura presenta un gradiente temporale. Ciononostante, il valore è molto esiguo, inferiore a 0.02 K/anno, tanto da non comportare apprezzabili effetti sulle prestazioni del BHE.

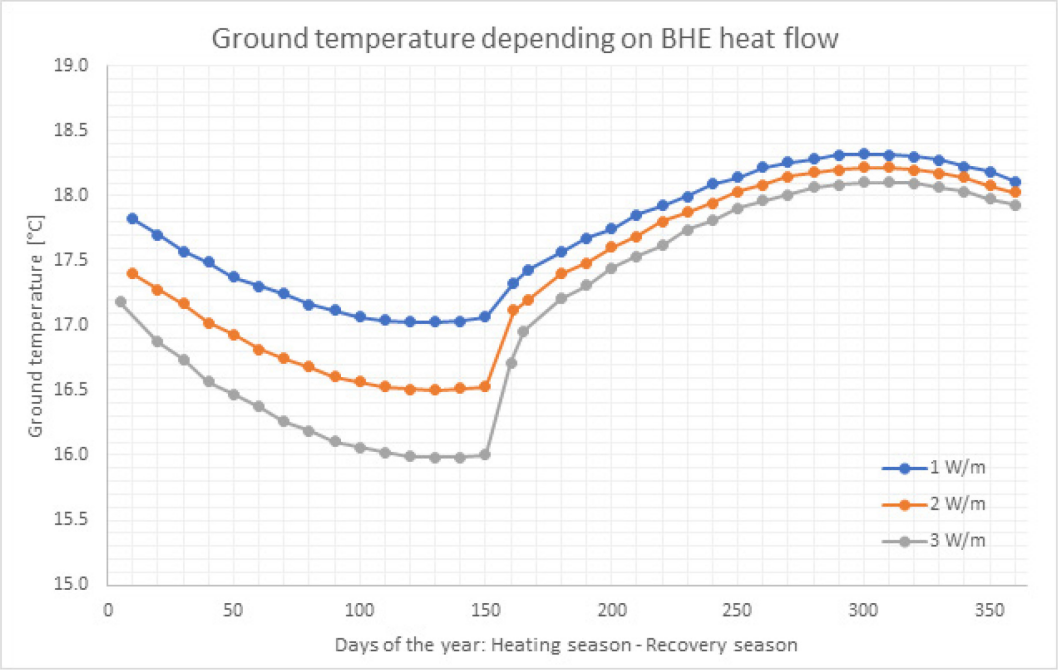

Figura 28: variazione della temperatura della superficie del BHE nel tempo per diversi valori di potenza imposta

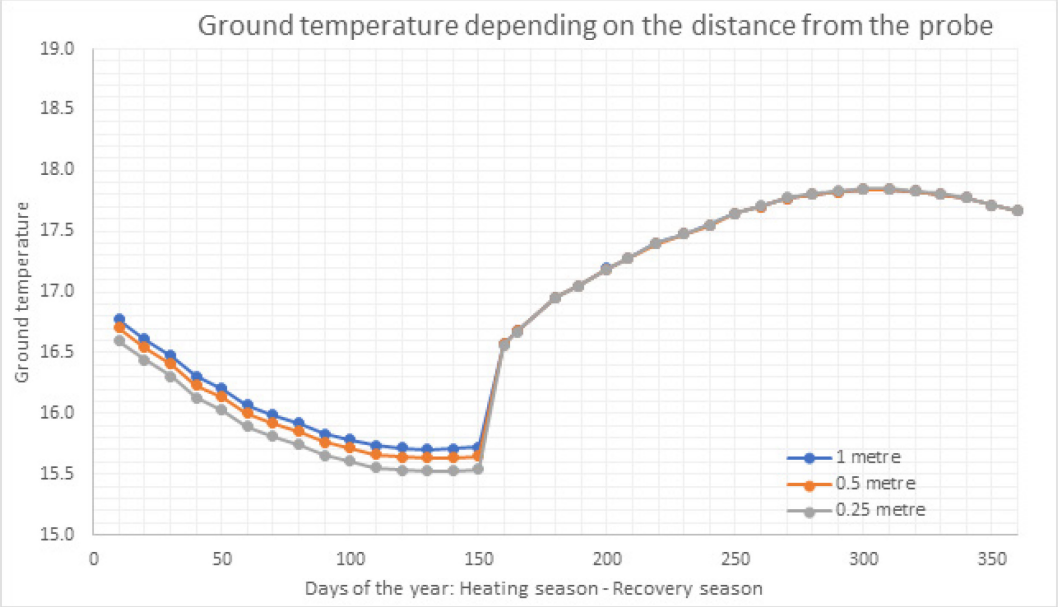

Figura 29: variazione della temperatura nel tempo a diverse distanze dalla superficie del BHE

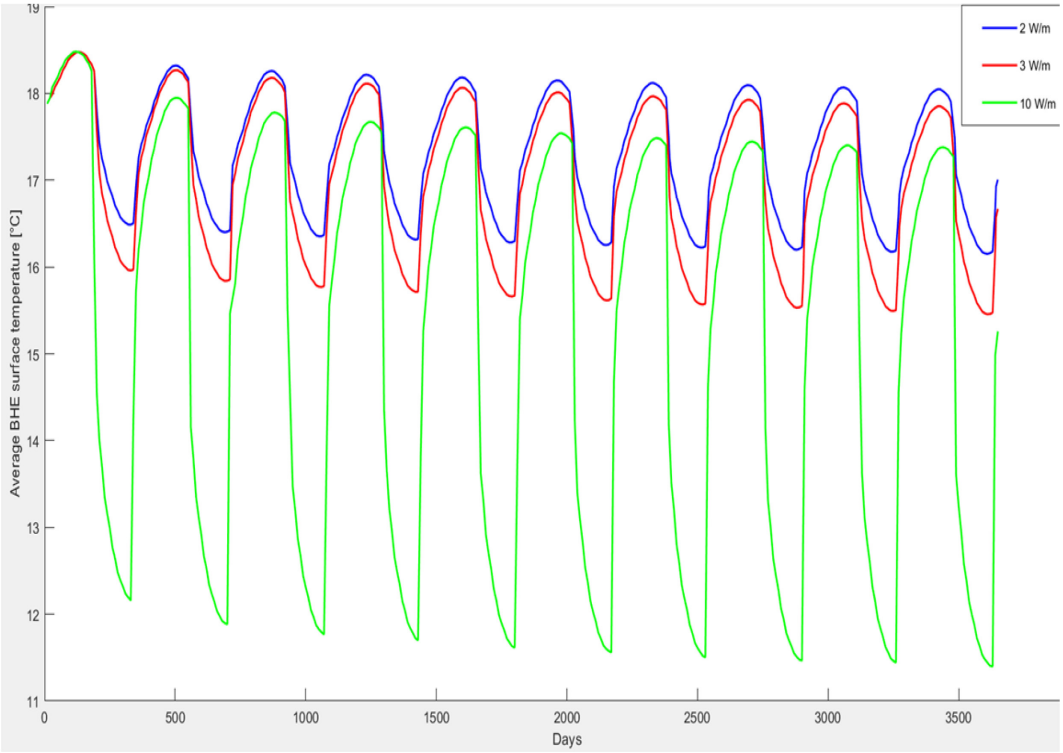

Figura 30: variazione della temperatura della superficie del BHE nel tempo per diversi valori di potenza imposta

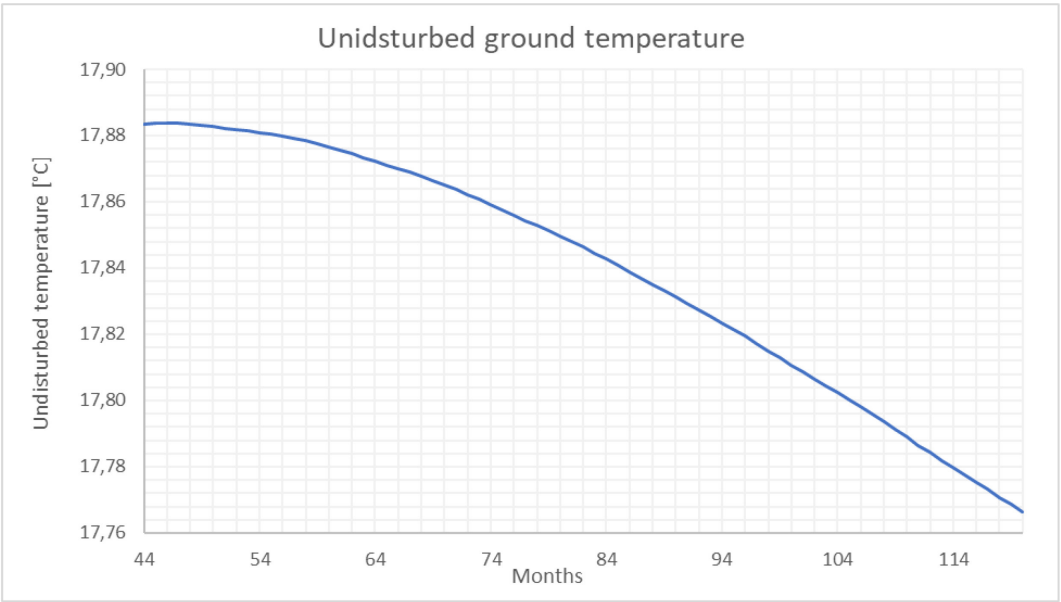

Figura 31: Variazione nel tempo della temperatura del bordo esterno del dominio di integrazione

7.5.2 Simulazione di esercizio in sola captazione con periodo giornaliero

Per le simulazioni delle prestazioni del campo a fronte di variazioni giornaliere della sollecitazione, le simulazioni sono state impostate definendo la temperatura dell'acqua all'interno del BHE. Ciò richiede la determinazione dei coefficienti di scambio convettivo. Nonostante il moto nelle tubazioni sia forzato, le velocità sono molto ridotte, tanto che gli effetti della convezione naturale sono determinanti sul coefficiente di convezione. L'esame dei lavori di review disponibili in letteratura tecnica [3,4] ha consentito di verificare

che le condizioni di esercizio in esame ricadono nell'ambito delle correlazioni disponibili, come illustrato in figura 32. In particolare, in [3] è disponibile una correlazione applicabile per i BHE in esame, equazione 2.

$$Nu = 0.95 \left(\frac{Gr^*}{Re}\right)^{0.28} \quad (2)$$

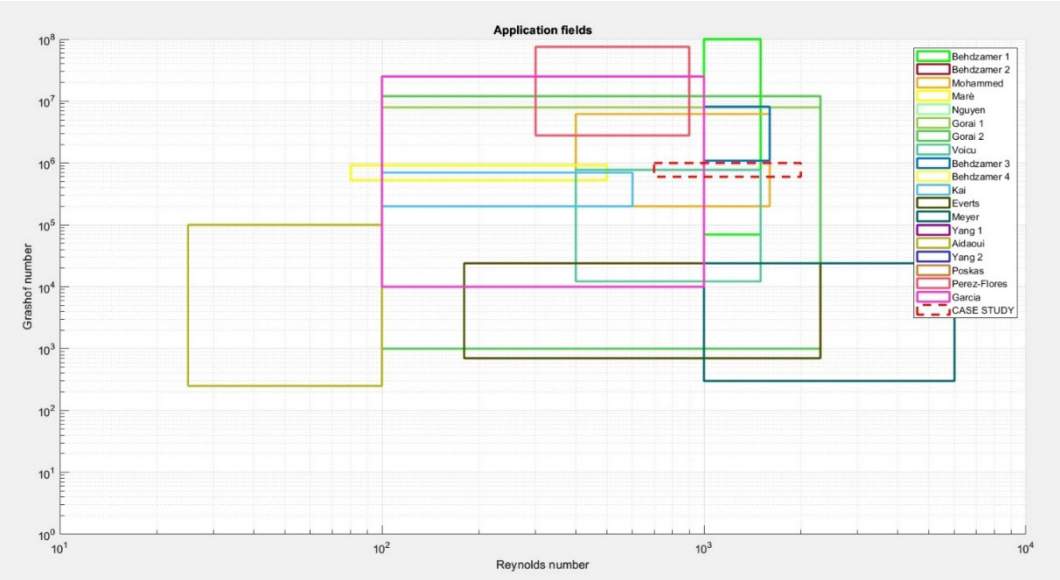

Figura 32: Campi Re-Gr di convezione mista indagati da diversi autori

Sono state simulate diverse alternanze simmetriche di attivazione e inattività del BHE con periodo 2 ore (1 ora ON), 12 ore (6 ore ON) e 24 ore (12 ore ON). Inoltre, a fini di comparazione è stata ripetuta la simulazione con impianto attivo in modo continuo (24 ore ON). Trascorsi 14 giorni non vi erano variazioni apprezzabili del campo di temperatura. I risultati sono stati analizzati con riferimento al comportamento in testa al pozzo (profondità 2 m), dove sono apprezzabili gli effetti della trasmissione verso la superficie e le temperature delle tubazioni di mandata e ritorno sono significativamente differenti, e sul fondo, dove le tubazioni di mandata e ritorno hanno la medesima temperatura. Dalle distribuzioni della potenza scambiata lungo la circonferenza del BHE si osserva che in testa al pozzo si ha una marcata riduzione della potenza scambiata in corrispondenza della tubazione di ritorno, a prescindere dal periodo di attivazione, come illustrato nelle figure da 33 a 38. La maggiore temperatura della tubazione di mandata in testa al pozzo non determina un incremento della potenza scambiata nella porzione circostante, essendo assorbita dallo scambio verso la stessa tubazione di ritorno, come illustrato nelle figure 39 e 40.
La comparazione delle potenze scambiate per diversi periodi di alternanza mostra un effetto positivo, con incremento della potenza specifica scambiata rispetto al regime continuo, come illustrato in figura 41.

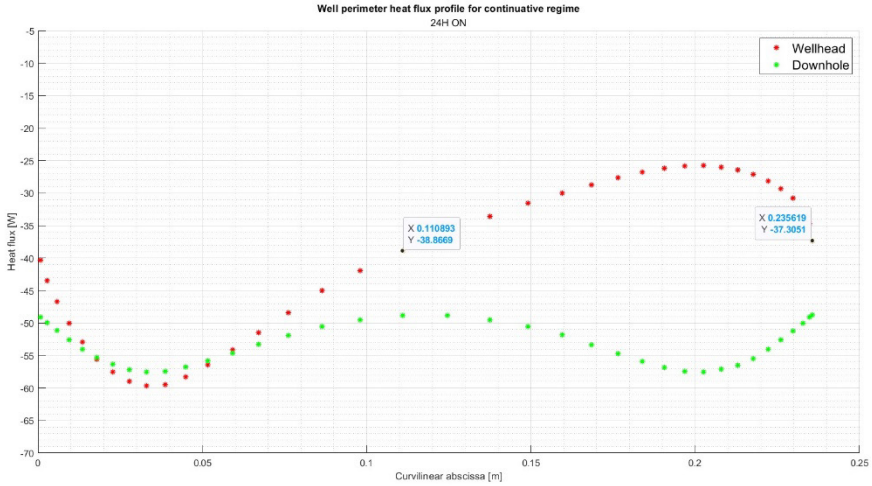

Figura 33: Distribuzione della potenza specifica sul BHE, funzionamento continuo

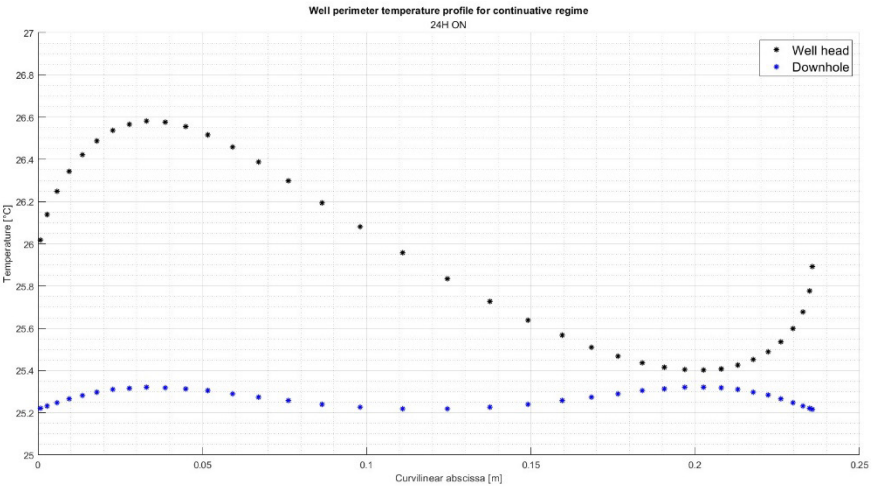

Figura 34: Distribuzione della temperatura sul BHE, funzionamento continuo

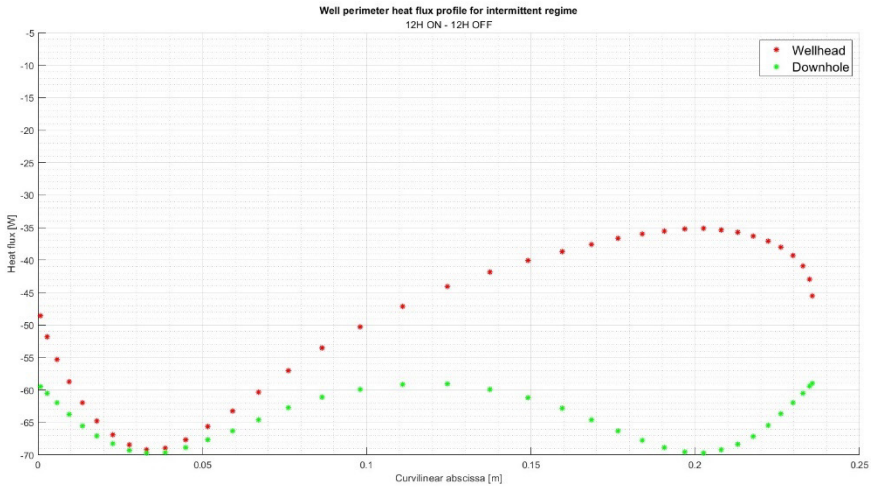

Figura 35: Distribuzione della potenza specifica sul BHE, funzionamento 12 ore ON

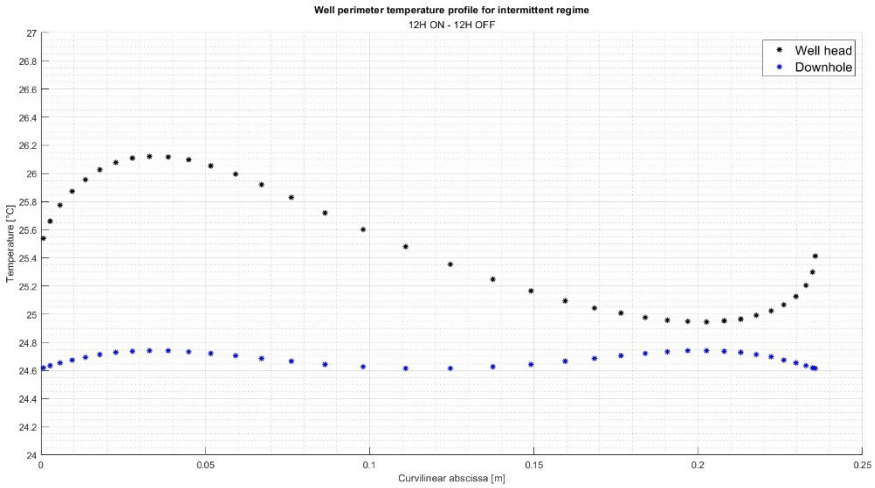

Figura 36: Distribuzione della temperatura sul BHE, funzionamento 12 ore ON

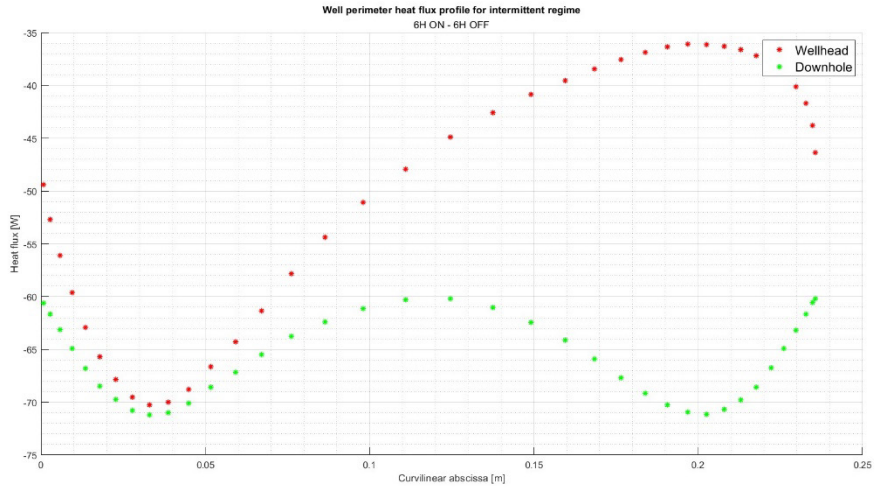

Figura 37: Distribuzione della potenza specifica sul BHE, funzionamento 6 ore ON

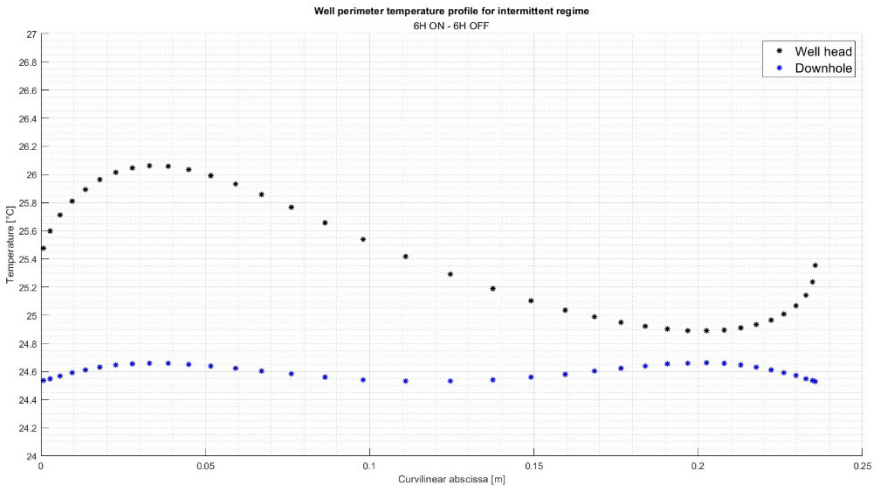

Figura 38: Distribuzione della temperatura sul BHE, funzionamento 6 ore ON

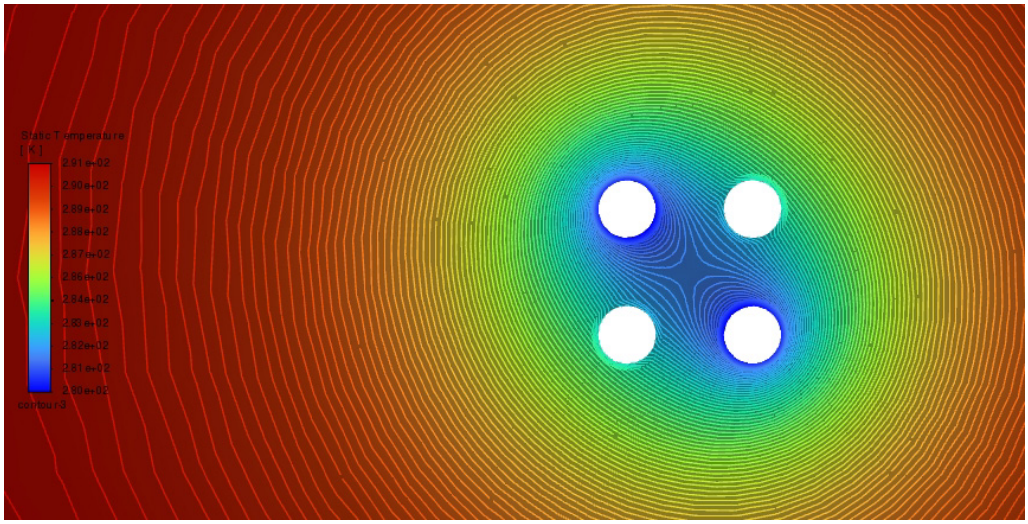

Figura 39: Campo di temperatura in testa al pozzo, funzionamento 12 ore ON

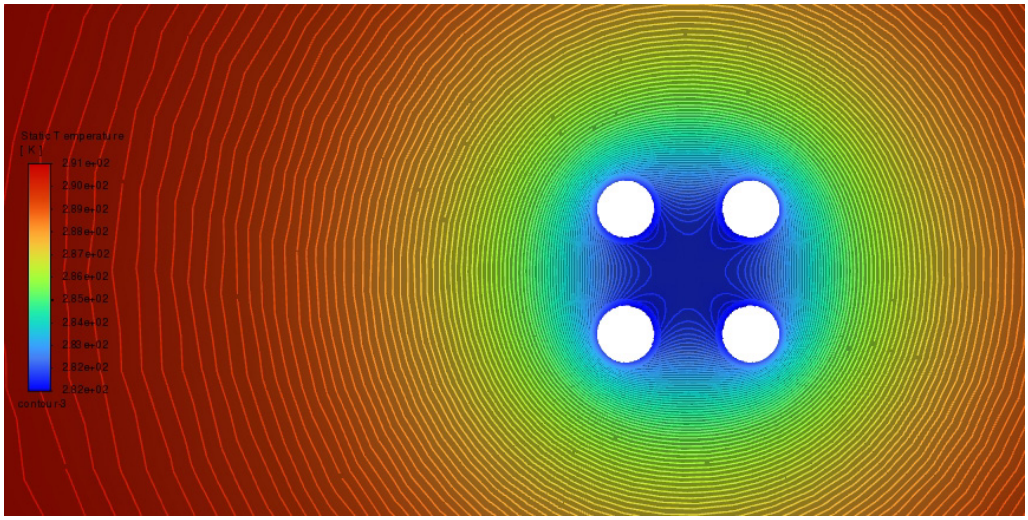

Figura 40: Campo di temperatura in fondo al pozzo, funzionamento 12 ore ON

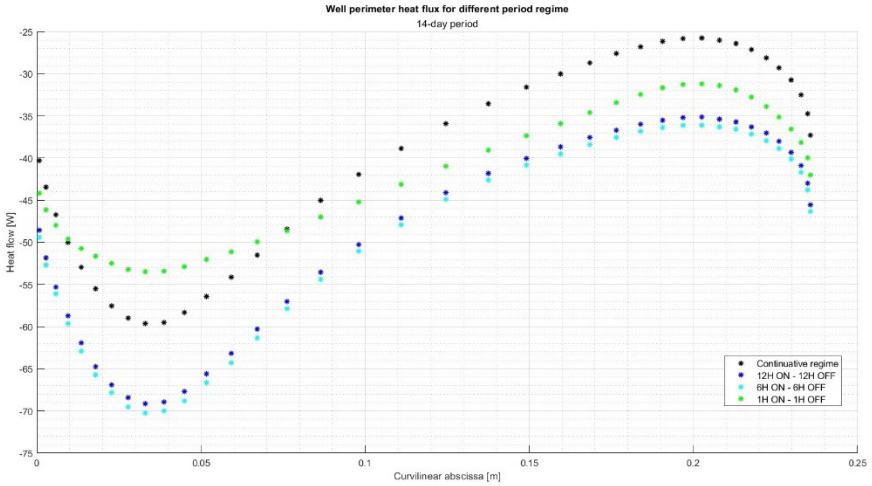

Figura 41: Distribuzione della potenza specifica sul BHE, in testa al pozzo, per diversi regimi di funzionamento

7.5.3 Simulazione di esercizio con scambio medio nullo

Le simulazioni sono state sviluppate con modalità simili al caso precedente ma ciascun periodo di esercizio in cessione o assorbimento di calore termina con un periodo di inattività di 1 ora. Nei periodi di cessione di calore al terreno la temperatura media è 10 K al di sopra di quella del terreno indisturbato, nei periodi di assorbimento di calore dal terreno la temperatura media è 10 K al di sotto di quella del terreno indisturbato. I coefficienti di scambio sono determinati con le medesime espressioni utilizzate al paragrafo precedente.
Sono state simulate diverse alternanze simmetriche del BHE con periodo 6 ore (3 ore ON), 12 ore (6 ore ON) e 24 ore (12 ore ON). Trascorsi 14 giorni non vi erano variazioni apprezzabili del campo di temperatura. I risultati sono stati analizzati con riferimento al comportamento in testa al pozzo (profondità 2 m), dove sono apprezzabili gli effetti della trasmissione verso la superficie e le temperature delle tubazioni di mandata e ritorno sono significativamente differenti, e sul fondo, dove le tubazioni di mandata e ritorno hanno la medesima temperatura. Dalle distribuzioni radiale della temperatura (figure 42 e 43) si osserva che la sollecitazione interessa porzioni più ampie di terreno all'aumentare del periodo, come atteso. La potenza specifica presenta il massimo sulla superficie del BHE, di intensità maggiore per sollecitazioni con periodo inferiore, come illustrato in figure 44 e 45.

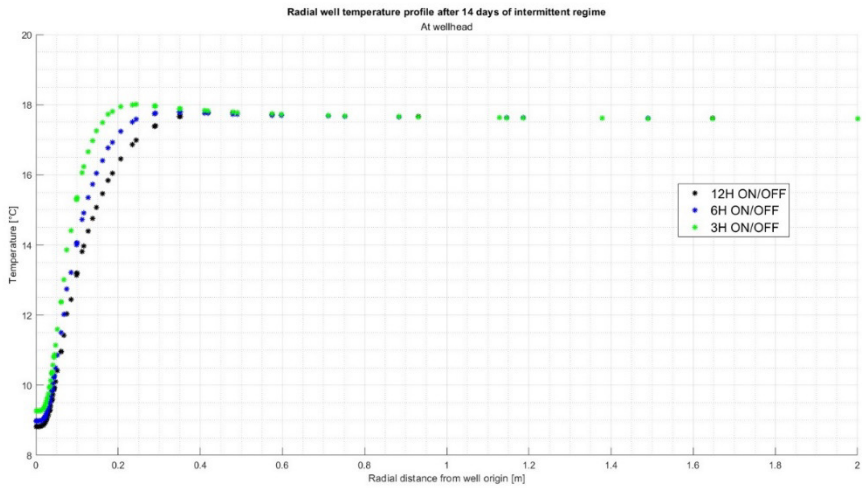

Figura 42: Distribuzione radiale della temperatura per diversi periodi di esercizio

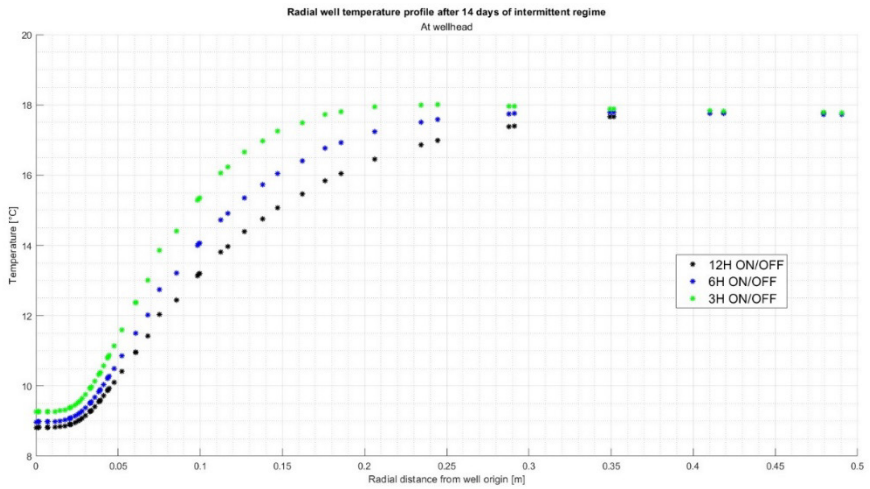

Figura 43: Distribuzione radiale della temperatura per diversi periodi di esercizio, ingrandimento della porzione circostante il BHE

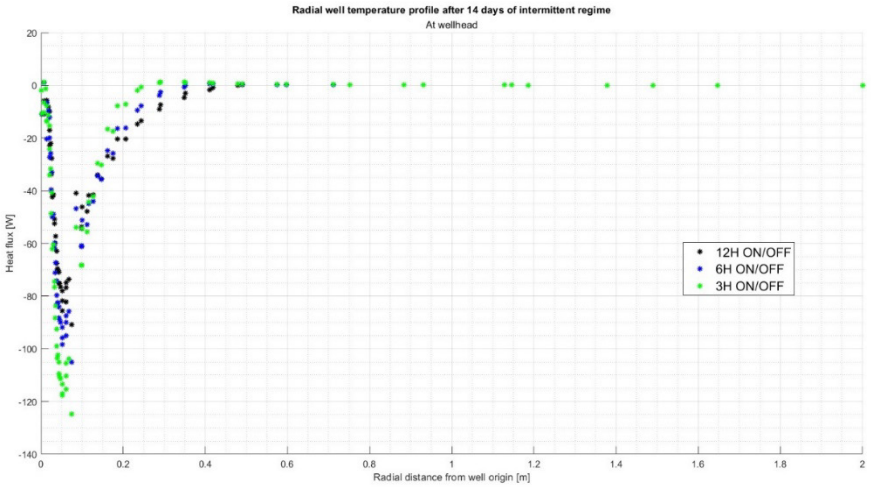

Figura 44: Distribuzione radiale della potenza specifica per diversi periodi di esercizio

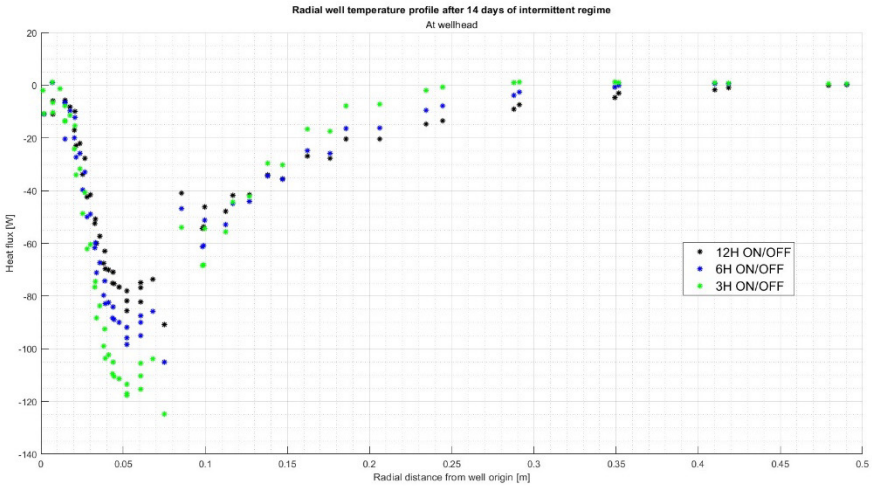

Figura 45: Distribuzione radiale della potenza specifica per diversi periodi di esercizio, ingrandimento della porzione circostante il BHE

I campi di temperatura in testa e in fondo al pozzo presentano distribuzioni equivalenti a quelle già osservato nel funzionamento in solo assorbimento di calore, come illustrato nelle figure 46 e 47.

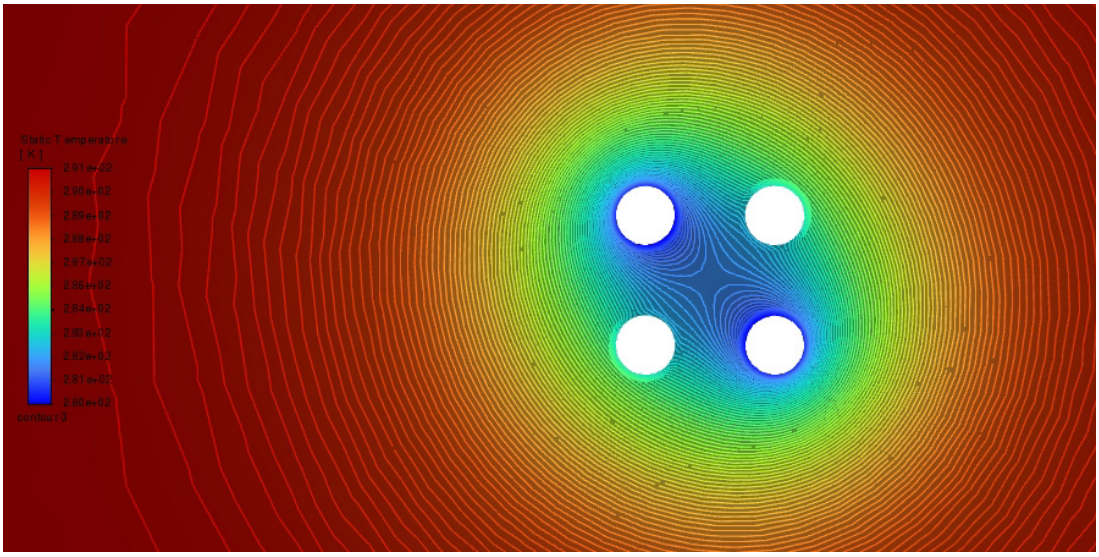

Figura 46: Campo di temperatura in testa al pozzo, funzionamento 6 ore ON

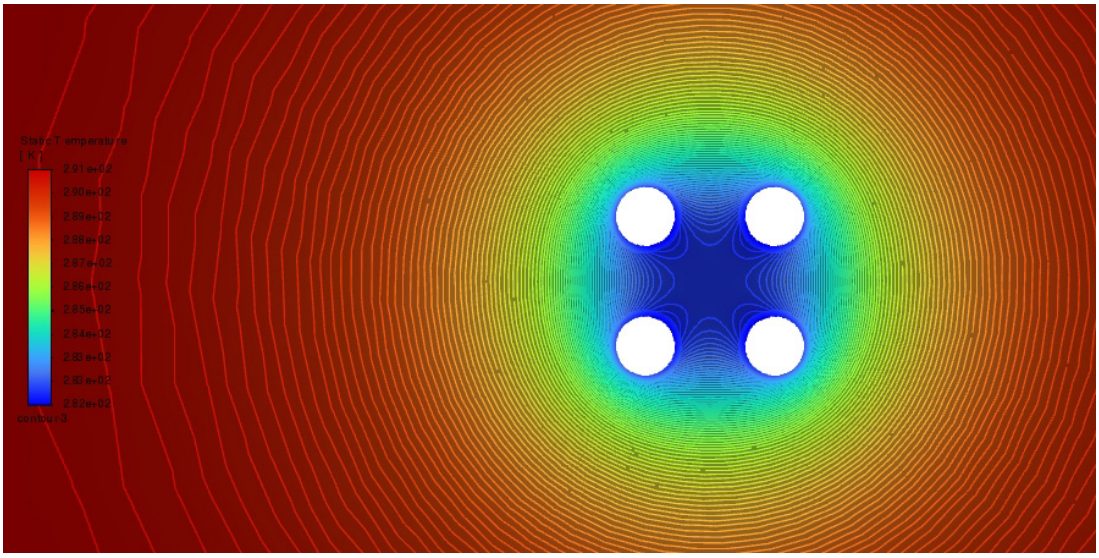

Figura 47: Campo di temperatura in testa al pozzo, funzionamento 6 ore ON

7.6 Bibliografia

[1] Casasso A., Sethi R., *Sensitivity analysis on the performance a ground source heat pump equipped with double U-pipe borehole heat exchanger*, Energy Procedia 59, 2014, pp. (302-304)

[2] Lamarche L., Pasquier P., *Higher-order temporal scheme for ground heat exchanger analytical models*, Geothermics 78, 2019, pp. (111-117)

[3] Behzadmehr, A., Galanis, N., & Laneville, A. (2003). Low Reynolds number mixed convection in vertical tubes with uniform wall heat flux. *International journal of heat and mass transfer*, *46*(25), 4823-4833.

[4] Jackson, J. D., Cotton, M. A., & Axcell, B. P. (1989). Studies of mixed convection in vertical tubes. *International journal of heat and fluid flow*, *10*(1), 2-15.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

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

9 Pubblicazioni scientifiche

Non sono scaturite pubblicazioni scientifiche nel periodo di svolgimento dalla presente attività.

10 Eventi di disseminazione

Non sono scaturiti eventi di disseminazione nel periodo di svolgimento dalla presente attività.