POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi tecnico economica sui diversi sistemi di captazione geotermica a ciclo chiuso

Relatore
prof. Marco Carlo Masoero

Correlatore
ing. Gregorio Tosi

Candidato
Fabio Cava

Dicembre 2018

Indice

1. Introduzione 1

2. Geotermia 5

2.1 Scambio termico nel sottosuolo 5

2.2 Perforazione 10

3. Impianto geotermico 12

3.1 Tipi di impianti 13

3.1.1 Pozzi verticali 13

3.1.2 Geotermia orizzontale 14

3.1.3 Canestri geotermici 15

3.2 Sonde 17

3.2.1 Materiale di ripieno 17

3.2.2 Fluido termovettore 17

4. Pompa di calore 20

4.1 I dispositivi interni 21

4.2 Fluido refrigerante 22

5. Analisi costi benefici 24

6. Simulazioni Matlab tramite Differenze Finite 29

6.1 Dati Simulazione 32

6.2 Perdite di carico 58

6.3 Simulazioni Energy Earth Designer 62

7. Conclusioni 70

Bibliografia 71

Ringraziamenti 73

Indice figure

Figura 1. Andamento del consumo mondiale di energia nel decennio 2004-2014 1
Figura 2. Categoria qualità casaclima 2
Figura 3. Combinazioni di interventi necessari per raggiungere la classe energetica 3
Figura 4. Capacità di sfruttamento geotermico 3
Figura 5. Vendite pompe di calore nel decennio 2005-2015 in Europa 4
Figura 6. Profilo temperatura in base alla profondità nei diversi periodi dell'anno 6
Figura 7. Conducibilità termica dei vari tipi di terreno 9
Figura 8. Potenza di estrazione specifica in funzione di tipo di terreno e ore di funzionamento 10
Figura 9. Fasi di perforazione del terreno 11
Figura 10. Sonda Haka Gerodur 11
Figura 11. Srotolatore sonda verticale 11
Figura 12. Sonda a inserimento verticale 11
Figura 13. Sonda a U e sonda coassiale 13
Figura 14. Tipologia di sonda 13
Figura 15. Giunzione sonda 14
Figura 16. Le disposizioni degli scambiatori geotermici - *a)* In serie; *b)* In parallelo a ritorno 15
Figura 17. Diverse configurazioni impianto geotermico 15
Figura 18. Schema impianto a canestri geotermici 16
Figura 19. Funzionamento estivo e invernale impianto geotermico 17
Figura 20. Sonda verticale 18
Figura 21. Resistenza termica materiali di riempimento 19
Figura 22. Schema funzionale pompa di calore 21
Figura 23. Ciclo termodinamico ideale della pompa di calore 22
Figura 24. Configurazione a serpentina del riscaldamento a pavimento 24
Figura 25. Configurazione a chiocciola del riscaldamento a pavimento 25
Figura 26. Investimenti iniziali 25
Figura 27. Costi di esercizio 26
Figura 28. Confronto sonda orizzontale e sonda verticale 27
Figura 29. Potenza termica estratta in funzione della profondità 28
Figura 30. Confronto dei costi delle tipologie di sonda 28
Figura 31. Dati simulazione 32
Figura 32. Dati simulazione 33
Figura 33. Temperatura iniziale 35
Figura 34. Dati del fluido 58
Figura 35. Perdite di Carico 59
Figura 36. Andamento numero di Reynolds in funzione del diametro 59
Figura 37. Andamento perdite di carico J in funzione del diametro 59
Figura 38. Dati del fluido 60
Figura 39. Perdite di Carico 60
Figura 40. Andamento numero di Reynolds in funzione del diametro 61
Figura 41. Andamento perdite di carico J in funzione del diametro 61
Figura 42. Andamento nel tempo sonda 30 metri, diametro 20 mm 62
Figura 43. Andamento nel tempo sonda 120 metri, diametro 20 mm 63
Figura 44. Andamento nel tempo due sonde 30 metri, diametro 20 mm 64
Figura 45. Andamento nel tempo due sonde 120 metri, diametro 20 mm 65
Figura 46. Andamento nel tempo sonda 30 metri, diametro 40 mm 66

Figura 47. Andamento nel tempo sonda 120 metri, diametro 40 mm 67
Figura 48. Andamento nel tempo due sonde 30 metri, diametro 40 mm 68
Figura 49. Andamento nel tempo due sonde 120 metri, diametro 40 mm 69

1. Introduzione

Lo scopo di questa tesi è quello di analizzare il funzionamento di un sistema a captazione geotermica dal punto di vista energetico e dal punto di vista economico, al fine di confrontare le diverse configurazioni di impianto.
Lo studio è avvenuto tramite un modello costruito sul software Matlab e tramite il software EED (Energy Earth Designer).
Il risparmio energetico è un tema di attualità e strettamente collegato col riscaldamento globale: come sostiene Francesco Tinti, autore del libro "Geotermia per la climatizzazione", "per quanto riguarda l'azione nociva dei gas serra, la comunità scientifica internazionale è concorde su una netta presa di posizione contro l'emissione di tali sostanze provocata in larga parte dall'utilizzo dei combustibili fossili".
Come si può notare dalla Figura 1, nel decennio 2004-2014 il consumo di energia è cresciuto in maniera netta e le fonti di energia più utilizzate sono carbone, gas naturale e petrolio.
Pertanto, la possibilità di riscaldare e raffrescare un appartamento o degli uffici senza l'utilizzo diretto di combustibili fossili rappresenta un argomento di grande importanza.

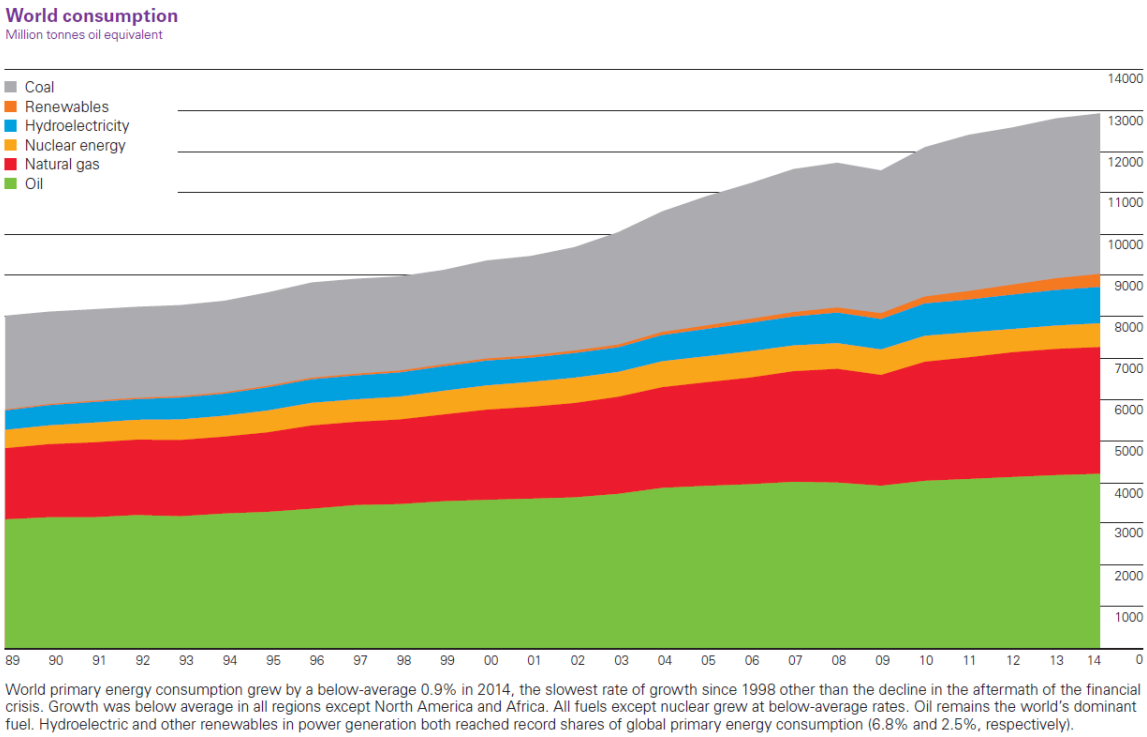


Figura 1. Andamento del consumo mondiale di energia nel decennio 2004-2014

Un sistema di captazione geotermica infatti viene abbinato a una pompa di calore geotermica: secondo la Divisione per l'energia elettrica e le energie rinnovabili del Canada, "non esiste un sistema di riscaldamento e condizionamento in grado di ridurre le emissioni di gas serra e il conseguente impatto sul riscaldamento globale così efficace come le pompe di calore geotermiche". La pompa di calore, infatti, non prevede alcun tipo di combustione, ma necessita solo di energia elettrica. Un impianto geotermico può coprire autonomamente i carichi, sia in funzionamento invernale che in quello estivo, ed è possibile combinarlo con un impianto fotovoltaico, consentendo un risparmio di energia elettrica.
Tuttavia è necessario sottolineare come i sistemi geotermici debbano essere applicati ad edifici appartenenti ad un'adeguata categoria (vedi Figura 2), ovvero con una coibentazione sufficiente per non avere dispersioni termiche eccessive.

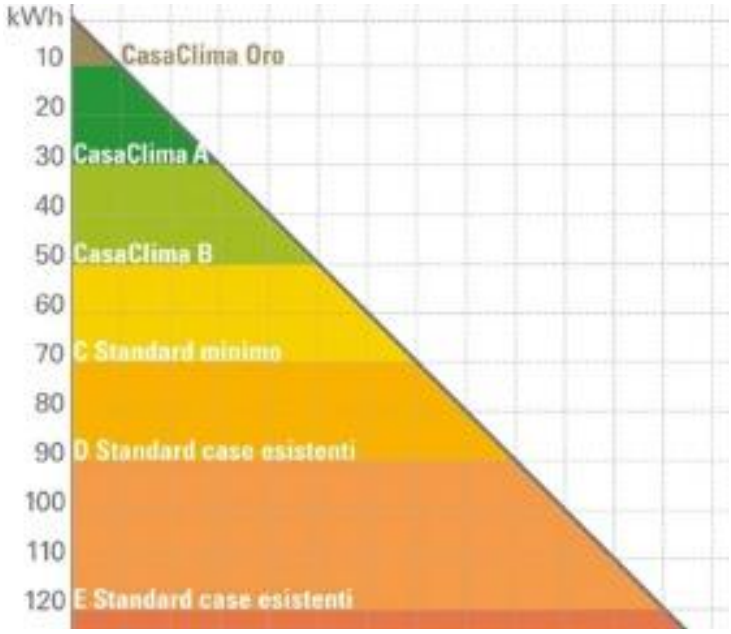


Figura 2. Categoria qualità casaclima

Nella Figura. 3 sono riportate le combinazioni per ottenere una determinata classe energetica: per ottenere una classe A occorrono investimenti iniziali elevati, con conseguenti lunghi tempi di ritorno, che fanno da deterrente per chi vuole installare un impianto con pompa di calore geotermica.

Combinazioni di Interventi necessari per raggiungere la classe energetica		
Le classi nelle diverse aree geografiche	**Riscaldamento**	**Isolamento termico**
Classe A (Alpina e Padana) - Classe B (Alpina)	Pompa di calore elettrica / Pompa di calore a gas o geotermica	Cappotto + doppi vetri / Mura isolanti + infissi alte prestazioni + cappotto
	Caldaia a condensazione + radiatori media temperatura o pannelli a pavimento	Mura isolanti + infissi alte prestazioni + cappotto
Classe A (Peninsulare e Insulare) Classe B (Padana, Insulare, Peninsulare) Classe C (Alpina e Padana)	Caldaia a condensazione + radiatori media temperatura o pannelli a pavimento	Cappotto + doppi vetri
	Caldaia 3 stelle tradizionale + Radiatori alta temperatura	Mura isolanti + infissi alte prestazioni + cappotto
Classe C (Peninsulare e Insulare) Classe D (Alpina, Padana e Insulare) Classe E (Alpina e Padana) Classe F (Alpina)	Caldaia a condensazione + radiatori media temperatura o pannelli a pavimento / Pompa di calore di qualsiasi tipo	Isolamento base
	Caldaia 3 stelle tradizionale + Radiatori alta temperatura	Cappotto + doppi vetri
Classe D (Insulare) Classe E (Insulare e Peninsulare) Classe F (Padana e Insulare) Classe G (Alpina e Padana)	Caldaia 3 stelle tradizionale + Radiatori alta temperatura	Isolamento base

Figura 3. Combinazioni di interventi necessari per raggiungere la classe energetica

È interessante notare come, nonostante i costi iniziali, negli ultimi anni ci sia stato un aumento dello sfruttamento dell'energia geotermica e un incremento delle vendite delle pompe di calore, come riportato in figura 5:

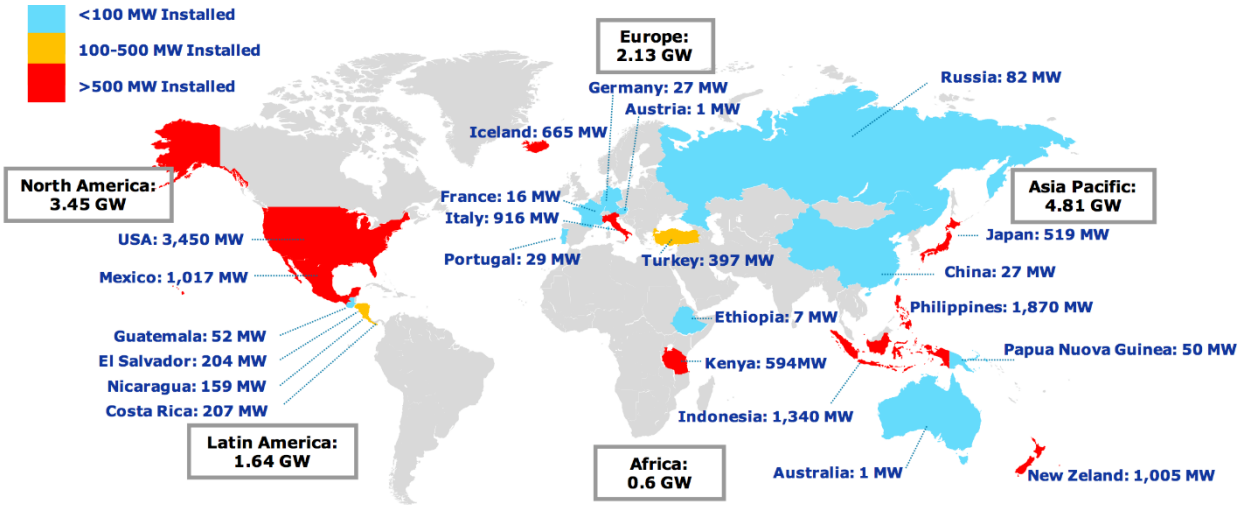


Figura 4. Capacità di sfruttamento geotermico

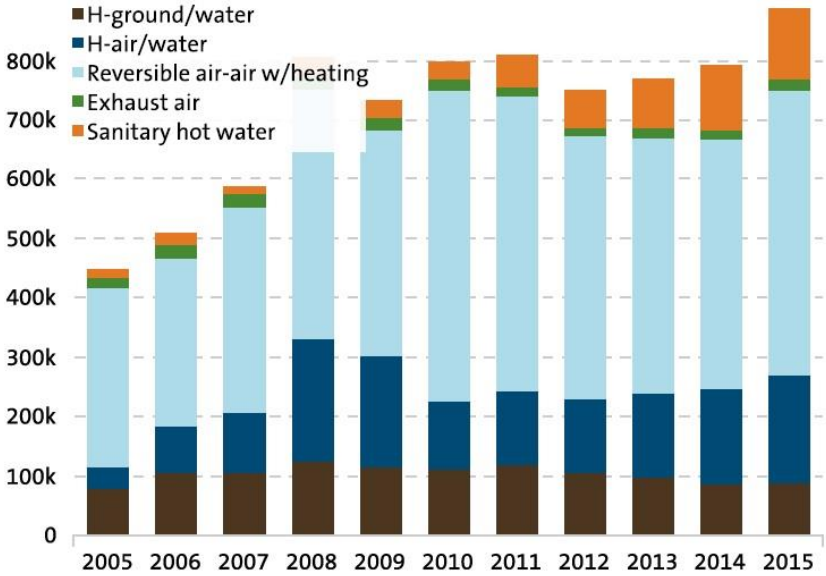


Figura 5. Vendite pompe di calore nel decennio 2005-2015 in Europa

"Il mercato europeo delle pompe di calore nel 2015 ha registrato la vendita di 890mila unità circa. Un record assoluto, pari ad otto volte il mercato del 2005 e una crescita del 12% rispetto al 2014, dopo un lungo periodo di stagnazione. Sono 8,4 milioni le pompe di calore installate in Europa."

2. Geotermia

L'energia geotermica è "quella fonte di energia dovuta al calore immagazzinato nella crosta terrestre" che si propaga fino alla superficie, tramite il terreno o fluidi vettori.
È possibile sfruttare questo calore conficcando nel terreno delle tubazioni, chiamate sonde geotermiche, nelle quali scorre un fluido termovettore, generalmente acqua con aggiunta di un anticongelante. La temperatura può essere minore o maggiore del terreno stesso, a seconda dello scopo dell'impianto: riscaldamento nel primo caso, raffrescamento nel secondo.
L'unità di misura del flusso geotermico è l'heat flow unit [hfu].

$$1\ hfu = 10^{-6}\ \frac{cal}{cm^2 \times s} = 42\ \frac{mW}{m^2} \tag{1}$$

Nel caso invernale bisogna considerare anche il fenomeno della convezione tra il fluido termovettore e il tubo in cui scorre, che genera un apporto di calore positivo, a fronte di un aumento delle perdite di carico distribuite e di conseguenza a un maggior lavoro delle pompe.
La differenza di temperatura che si riesce ad ottenere sfruttando il calore del terreno è limitata, dell'ordine di qualche grado, e non è sufficiente a coprire il fabbisogno energetico di un edificio, pertanto è necessario combinare le sonde con un altro dispositivo: le pompe di calore.

"Le risorse geotermiche si dividono in tre categorie (D. Lgs. 22/2010):
- Alta entalpia: fluidi a T>150°C, utilizzabile per la produzione di energia elettrica (es. soffioni boraciferi di Larderello, 220÷350°C);
- Media entalpia: fluidi a T=90÷150°C, utilizzabile per reti di teleriscaldamento;
- Bassa entalpia: fluidi a T<90°C, utilizzabile per teleriscaldamento, per riscaldamento diretto o con pompa di calore."

L'argomento di questa tesi riguarda la terza categoria, ovvero la bassa entalpia per il riscaldamento di edifici, abitazioni, uffici.

2.1 Scambio termico nel sottosuolo

La conduzione di calore in una sonda geotermica avviene attraverso tre strati di materiale: le pareti del collettore, la malta cementizia e il terreno.
La convezione, invece, avviene "nell'anulus, tra il fluido freddo e il tubo caldo, dove avvengono fenomeni di dispersione termica, motivo per cui il diametro delle sonde è limitato tra i 20 e i 40 millimetri".
Il trasporto conduttivo è governato dalla legge di Fourier, secondo cui il flusso è proporzionale al gradiente di temperatura.

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial \phi}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q=\ \rho c\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (2)$$

Legge di Fourier per un cilindro

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q=\ \rho c\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (3)$$

Legge di Fourier per oggetti con assi simmetrici

z = altezza [m]

r = raggio [m]

Φ = angolo longitudinale

λ = conducibilità termica [W/(m·K)]

ρc = capacità termica [J/(m^3·K)]

q = potenza termica scambiata per unità di volume [W/ m^3]

T = temperatura [K]

t = tempo [s]

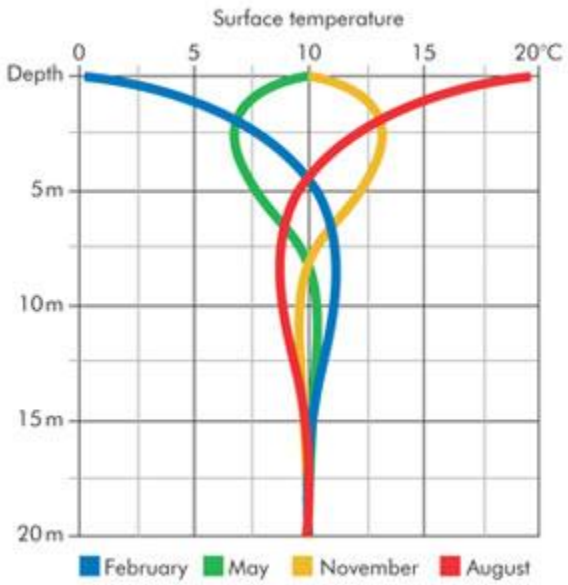


Figura 6. Profilo temperatura in base alla profondità nei diversi periodi dell'anno

L'andamento della temperatura in funzione della profondità viene descritto dall'equazione (4) e si nota in Figura. 6 una dipendenza dal periodo dell'anno. Già intorno ai 10 metri si ha una perdita di influenza delle oscillazioni stagionali e al di sotto di una determinata profondità, generalmente 15 metri, la temperatura si assesta attorno a un valore costante, indipendente dalla stagione.
La profondità a cui la temperatura rimane costane dipende da diversi fattori: tipologia di terreno, zona geografica, presenza di falde acquifere.

$$T(z,t) = T_0 + dT_0 \times e^{\left(-\frac{z}{\delta}\right)} \times \cos\left[\omega(t - t_0) - \frac{z}{\delta}\right] \qquad (4)$$

T(z,t) = temperatura del terreno [°C] alla profondità z [m] e al tempo t [s]

T_0 = temperatura media del terreno [°C]

dT_0 = variazione dell'ampiezza dell'onda di calore in superficie [°C]

t_0 = tempo per il quale la temperatura resta massima in superficie [s]

$\delta = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} = \sqrt{\frac{aT}{\pi}}$ = profondità di penetrazione [m]

T = periodo dell'onda di calore [s]

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ = frequenza dell'onda [s^{-1}]

a = diffusività termica del mezzo a = $\frac{\lambda}{\rho c}$ [m^2/s]

Un fattore importante nel dimensionamento dell'impianto è sicuramente la conformazione e la tipologia di terreno: infatti si possono incontrare diversi strati di materiali diversi, con conducibilità e capacità termica volumetrica differenti, che possono influenzare in maniera positiva o negativa lo scambio termico con la sonda. Di seguito, sono riportati in tabella i valori medi delle conducibilità termiche dei vari materiali di cui può essere costituito il terreno.

Tipo di sottosuolo	Conducibilità termica [W/(m K)]
Roccia mobile secca	< 1,5
Roccia dura o roccia instabile satura d'acqua	1,5 ÷ 3,0
Roccia dura a conducibilità termica elevata	3,0
Ghiaia o sabbia (secche)	0,4
Ghiaia o sabbia (acquifere)	1,8 ÷ 2,4
Argilla, limo (umidi)	1,7
Calcare massiccio	2,8
Molassa	2,3
Granito	3,4
Basalto	1,7
Gneiss	2,9

Tipo di roccia		Conducibilità termica [W/(m K)]	
		Secco	Saturo
Terreni	Argilla	0,2÷0,3	1,2÷1,6
	Limo	0,2÷0,3	1,4÷2,5
	Sabbia	0,3÷0,4	2,0÷3,2
	Ghiaia	0,3÷0,4	2,5÷3,3
Rocce compatte	Calcare (compatto)	2,8÷3,3	2,8÷3,3
	Marna	1,5÷1,8	2,3÷2,9
	Gesso	1,8÷3,5	2,3÷4,0
	Dolomia	2,8÷3,8	3,5÷4,5

Tipo di roccia	k_{minimo} [W/(m K)]	k_{medio} [W/(m K)]	$k_{massimo}$ [W/(m K)]	ρc [J/(m³ K)]
Magmatiche				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3÷2,6
Diorite	2,0	2,6	2,9	2,9
Gabbro	1,7	1,9	2,5	2,6
Diorite	2,1	3,4	4,1	2,1÷3,0
Peridotite	3,8	4,0	5,3	2,7
Riolite	3,1	3,3	3,4	2,1
Metamorfiche				
Gneiss	1,9	2,9	4,0	1,8÷2,4
Marmo	1,3	2,1	3,1	2,0
Shale	1,5	2,1	2,1	2,2÷2,5
Sedimentarie				
Calcare	2,5	2,8	4,0	2,1÷2,4
Marna	1,5	2,1	3,5	2,2÷2,3
Quarzite	3,6	6,0	6,6	2,1÷2,2
Salgemma	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenaria	1,3	2,3	5,1	1,6÷2,8
Argilla	1,1	2,2	3,5	2,1÷2,4
Sciolte				
Ghiaia secca	0,4	0,4	0,5	1,4÷1,6
Morena	1,0	2,0	2,5	1,5÷2,5
Sabbia secca	0,3	0,4	0,8	1,3÷1,6
Sabbia umida	1,7	2,4	5,0	2,2÷2,9
Argilla secca	0,4	0,5	1,0	1,5÷1,6
Argilla umida	0,9	1,7	2,3	1,6÷3,4
Torba	0,2	0,4	0,7	0,5÷3,8

Figura 7. Conducibilità termica dei vari tipi di terreno

Sottosuolo		Potenza estrazione specifica	
		Per 1800 ore	Per 2400 ore
Valori generali di riferimento	Terreno termicamente "povero" (sedimenti secchi) (conducibilità termica < 1.5 W/(m K)	25 W/m	20 W/m
	Valori medi per ammassi rocciosi o terreni saturi (conducibilità termica = 1.5-3.0 W/(m K)	60 W/m	50 W/m
	Rocce consolidate con elevata conducibilità (conducibilità termica > 3.0 W/(m K)	84 W/m	70 W/m
Valori specifici per litotipo	Ghiaie e sabbie, secche	< 25 W/m	< 20 W/m
	Ghiaie e sabbie, sature	65-80 W/m	55-65 W/m
	Ghiaie e sabbie con elevati flussi idraulici	80-100 W/m	80-100 W/m
	Argille, limi, umido	35-50 W/m	30-40 W/m
	Calcari massicci	55-70 W/m	45-60 W/m
	Arenarie	65-80 W/m	55-65 W/m
	Graniti	65-85 W/m	55-70 W/m
	Basalti	40-65 W/m	35-55 W/m
	Gneiss	70-85 W/m	60-70 W/m

Figura 8. Potenza di estrazione specifica in funzione di tipo di terreno e ore di funzionamento

2.2 Perforazione

"L'installazione di una o più sonde geotermiche nel terreno segue le modalità operative della perforazione di pozzi artesiani". Il metodo più utilizzato è la "perforazione a rotazione": la testa dell'utensile, ruotando attorno al proprio asse, avanza tramite la spinta contro il terreno.
In alternativa si può utilizzare la rotopercussione, cioè lo sgretolamento della roccia dovuto ai colpi dell'utensile. In entrambi i metodi si ha una batteria di aste in cui scorre il fluido di perforazione che porta in superficie i detriti dello scavo. Il fluido di perforazione può essere costituito da acqua, fanghi bentonici o aria compressa e ha il compito di "favorire l'avanzamento della perforazione, trasportare all'esterno i frammenti di terra e roccia, mantenere stabili le pareti del pozzo, lubrificare e raffreddare la trivella di perforazione e contenere la fuoriuscita dei fluidi di strato".
Lo scavo di pozzi geotermici ha un costo non trascurabile e ha limitato la diffusione di questi impianti. In alternativa alla configurazione verticale, si può scegliere una disposizione orizzontale di sonde: non è prevista una perforazione ma uno sbancamento, meno costoso rispetto al pozzo artesiano. Esistono altri metodi di installazione dei collettori orizzontali in fase di studio: si sta sviluppando anche nel settore geotermico la tecnologia no-dig, o trench-less, che prevede la posa di tubi senza smuovere grosse quantità di terra e senza manomettere la superficie del terreno, accorciando così i tempi di lavoro e riducendo i costi. Esempi di tecnologia no-dig sono l'HDD (horizzontal directional drilling), il pipe-jacking, il microtunneling, lo spingitubo, il pipe-ramming.

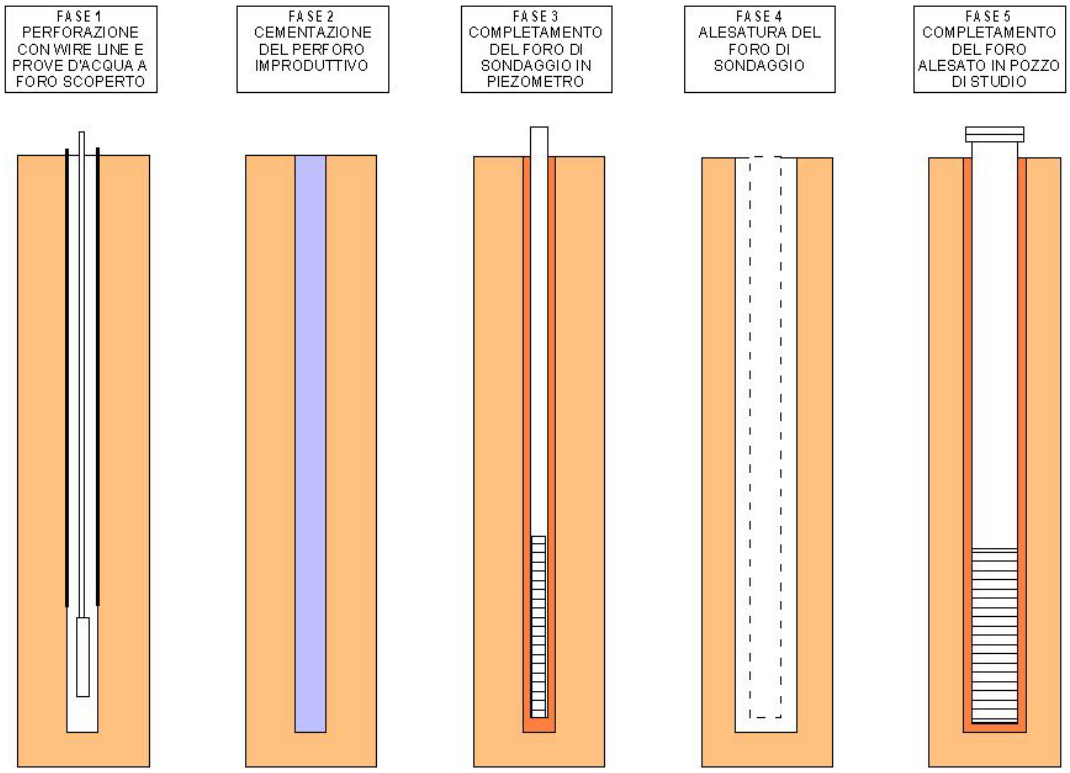


Figura 9. Fasi di perforazione del terreno

Figura 11. Srotolatore sonda verticale

Figura 10. Sonda Haka Gerodur

Figura 12. Sonda a inserimento verticale

3. Impianto geotermico

Le sonde geotermiche sono tubi che scambiano calore col terreno, fornendo un piccolo ΔT al fluido termovettore.
La pompa di calore è una macchina che sfrutta questo limitato gradiente di temperatura, prelevando energia dal fluido e "restituendo un valore di temperatura inferiore a quanto accadrebbe normalmente con uno scambio nell'atmosfera e ciò aumenta notevolmente l'efficienza del processo".
Nel caso di riscaldamento, gli strati del suolo cedono calore al fluido freddo che scorre nelle sonde, in modo da raggiungere un livello termico sufficiente ai fini dell'evaporazione.
Esistono diverse tecniche di installazione, tuttavia la più comune è quella di eseguire diverse perforazioni per la creazione dei pozzi geotermici, il cui numero dipende dalla richiesta termica dell'edificio. La profondità di scavo, generalmente, è di 100 metri, ma è possibile installare sonde di lunghezza compresa tra gli 80 e i 150 metri, a seconda delle necessità.
Durante l'inverno, il terreno subisce una riduzione di temperatura locale, intorno alla sonda. È possibile sfruttare questo gradiente di temperatura anche in estate, usando il terreno come "serbatoio di stoccaggio" e facendo circolare nei tubi acqua più calda. Questo procedimento viene denominato "free-cooling": in luoghi dove le estati non sono eccessivamente calde, per edifici con un isolamento termico adeguato, è possibile raffrescare un ambiente con dei pannelli radianti, che funzionano a una temperatura di 13 – 17 °C.

La potenza termica ceduta dal fluido è pari a

$$P = C_p \times Q \times \Delta T \tag{5}$$

con

P = potenza termica scambiata [Kcal/h]

C_p = calore specifico del fluido [Kcal/(°C·l)]

Q = portata [l/h]

ΔT = variazione di temperatura [°C]

Dalla formula (5) risulta evidente che la potenza è direttamente proporzionale alla portata di fluido. A meno di anomalie geotermiche, in genere non si eseguono perforazioni profonde, poiché risulterebbero sconvenienti dal punto di vista economico e si avrebbero troppe dispersioni termiche durante il percorso di risalita. Inoltre risulterebbe svantaggioso anche nel caso di funzionamento estivo, a causa delle alte temperature che abbasserebbero l'efficienza dell'impianto.
Il metodo più comune è quello di utilizzare diverse sonde dell'ordine del centinaio di metri, quindi un piccolo gradiente di temperatura, ma di sfruttare grandi portate.

3.1 Tipi di impianti

3.1.1 Pozzi verticali

La configurazione più comune, come detto in precedenza, consiste in perforazioni in cui si annegano le tubazioni in miscele bentoniche. Queste possono essere a singolo U, a doppio U, coassiale, riportate in Figura. 13 e Figura. 14.

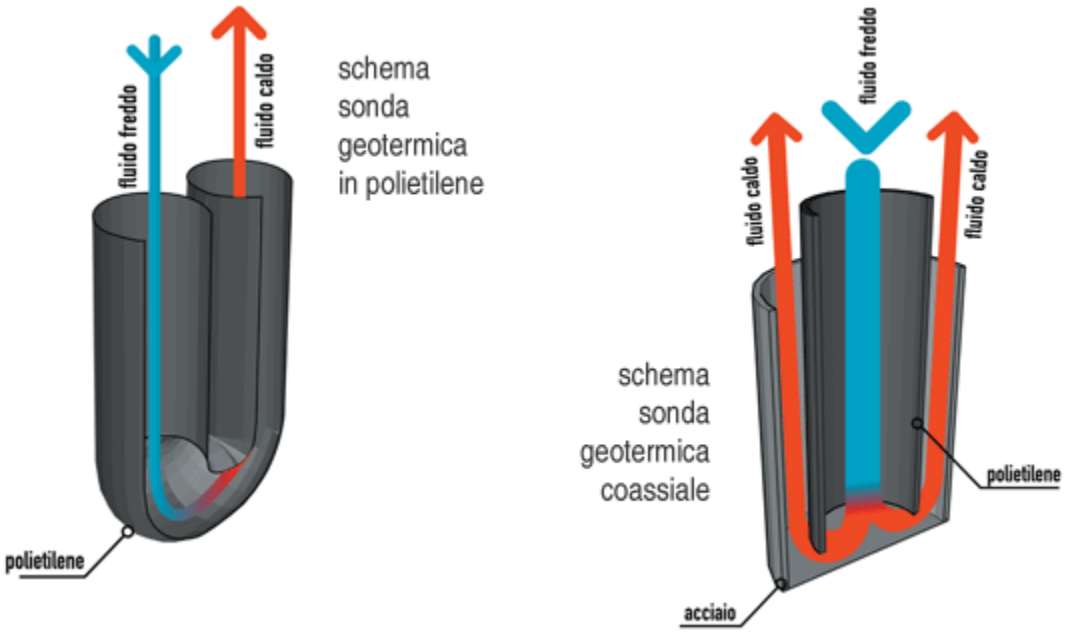


Figura 13. Sonda a U e sonda coassiale

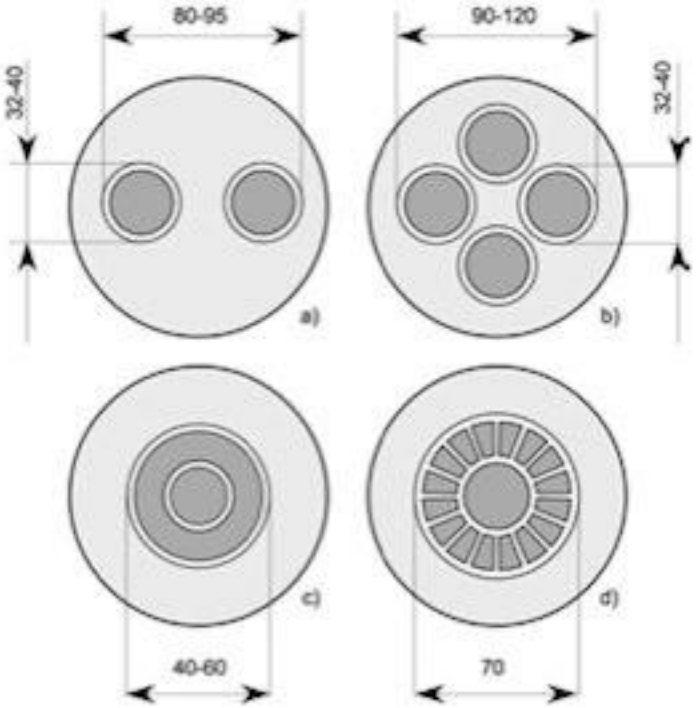


Figura 14. Tipologia di sonda

Nella Figura 14 sono presenti le seguenti tipologie di sonde:

a) sonda singola U (simplex)
b) sonda a doppia U (duplex)
c) sonde a tubi coassiali semplici
d) sonde a tubi coassiali complessi

Tra le varie tipologie di sonda si preferisce la configurazione a doppio U, sia nel raro caso di occlusione di un tubo, sia perché migliora lo scambio termico col terreno, a parità di portata con la sonda a singola U.
Gli scambiatori coassiali, meno utilizzati rispetto ai simplex e duplex, possono essere di tipo chiuso, come i tubi a U, o aperto, in cui il fluido è a diretto contatto con il terreno. I primi hanno costi maggiori ma rese termiche maggiori e in genere vengono preferiti ai secondi. Tuttavia, il grosso inconveniente delle sonde aperte è che comunicano direttamente con l'ambiente: il rivestimento in plastica non costituisce una separazione adeguata e impedisce l'utilizzo dell'additivo anticongelante, che inquinerebbe il suolo. Questo complica le condizioni di utilizzo ottimale del sistema e pone grossi vincoli su temperature, profondità e portate, rendendo meno flessibile la configurazione a circuito aperto: le profondità infatti sarebbero di 250-450 metri, si avrebbero alti costi di perforazione, si correrebbe il rischio di congelamento e non avrebbe un funzionamento ottimale nel caso estivo.

Figura 15. Giunzione sonda

3.1.2 Geotermia orizzontale

Un'alternativa allo scavo di pozzi verticali è "un campo di sonde a sviluppo orizzontale: può avere diverse configurazioni, differenti a seconda del numero di tubi impiegati e della connessione tra i rami. Il flusso termico scambiato col terreno dipende dai seguenti parametri: la lunghezza della tubazione, la profondità di installazione e il passo tra i tubi". Per soddisfare un maggior fabbisogno termico dell'edificio, è necessaria una "maggiore estensione della superficie del terreno dedicato alla posa del campo di sonde", pari a circa il doppio della superficie dell'edificio da riscaldare.
I tubi vengono posati a una profondità di 1,5-2,5 metri, risentendo ancora della variazione termica stagionale. Questo tipo di sistema utilizza il flusso termico proveniente dalla superficie, "determinato dalla radiazione solare e dallo scambio con l'aria stessa", rendendo quasi trascurabile l'apporto dovuto allo scambio col terreno.
Una configurazione orizzontale prevede costi di scavo minori rispetto ai pozzi verticali generalmente. Tuttavia, i costi possono incrementarsi nel caso in cui il terreno presenti delle falde acquifere, rendendo necessario l'uso di un impianto di pompaggio e allungando i tempi di scavo. La geotermia orizzontale presenta un altro inconveniente: la superficie sotto cui sono stati posati i tubi deve rimanere libera, soprattutto nel caso in cui la profondità sia ridotta: la presenza di alberi e oggetti pesanti (per esempio una macchina parcheggiata) potrebbe compromette il corretto scambio termico.

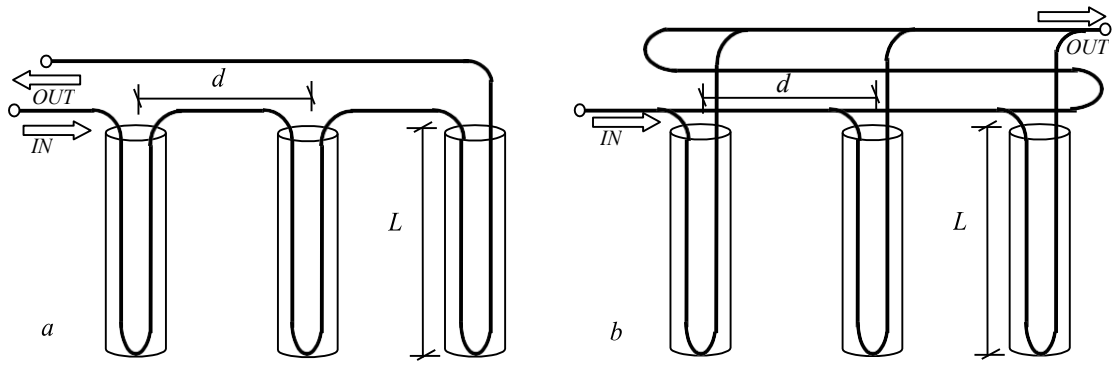


Figura 16. Le disposizioni degli scambiatori geotermici - *a)* In serie; *b)* In parallelo a ritorno

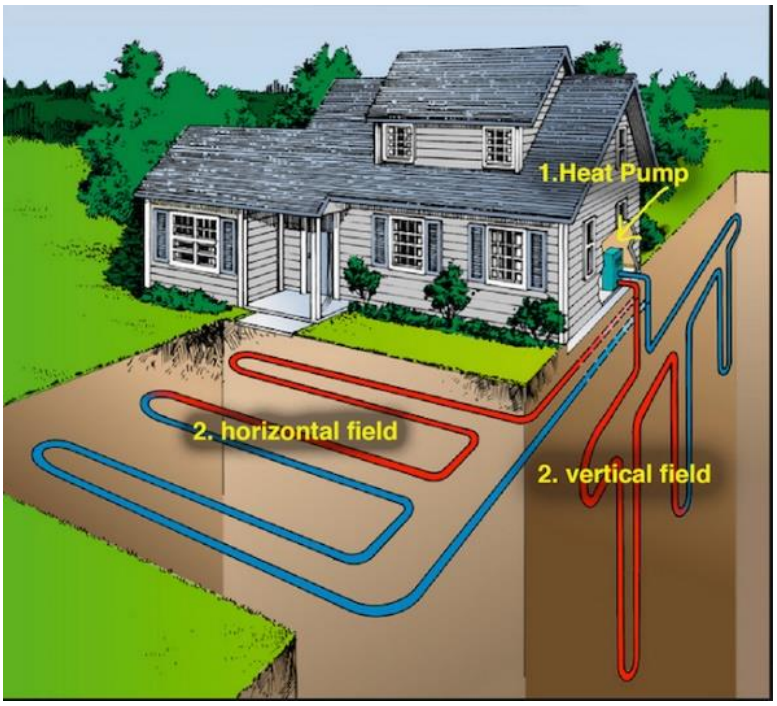


Figura 17. Diverse configurazioni impianto geotermico

3.1.3 Canestri geotermici

I canestri geotermici sono costituiti da un tubo a spirale che scambia flusso termico col terreno, seguendo lo stesso procedimento delle sonde geotermiche.
"Vengono installati ad una profondità da 1 a 4 metri e vengono posati in scavi quadrati a seconda del modello tra i 2,5 ed i 4 metri di profondità e riempiti con la terra disponibile sul posto, innaffiata e pressata."
Il primo vantaggio consiste in una maggiore semplicità dello scavo, l'assenza di perforazioni profonde e un minor spazio occupato ("fino al 60% in meno rispetto ai collettori orizzontali"). Inoltre si può escludere il pericolo di congelamento e quello di contaminazione del terreno.
A differenza delle sonde orizzontali, il terreno in cui vengono installati è utilizzabile senza effetti negativi.
La forma a spirale del canestro permetti di prelevare calore da strati più profondi del terreno rispetto ai collettori orizzontali.

Figura 18. Schema impianto a canestri geotermici

1. Canestri geotermici
2. Collegamento all'abitazione,
3. Raccoglitori e collettori,
4. Tubi PE, manicotti elettrici o
5. Geo-press
6. Pompa di calore

3.2 Sonde

3.2.1 Materiale di ripieno

Per assicurare un buon contatto termico col terreno viene aggiunto un materiale di ripieno tra i tubi e la parete del pozzo. Viene comunemente usata una "boiacca cemento-bentonica", ma esistono casi di pozzi riempiti con "sabbia e sedimenti del terreno". Il materiale serve anche a prevenire la fuoriuscita del fluido termovettore, in modo da evitare l'inquinamento del suolo.
Il materiale deve possedere determinate caratteristiche:

- Solubilità: non deve essere in grado di mescolarsi con la falda;
- Elasticità: deve resistere a urti, vibrazioni, sollecitazioni.

La malta di riempimento, nonostante presenti una conducibilità termica non elevata (0,6-0,7 W/(m·K), viene preferita alla sabbia perché quest'ultima potrebbe lasciare interstizi vuoti, senza rendere impermeabile il terreno.
"La soluzione ottimale sarebbe quella di ridurre al minimo la malta bentonica e riempire il resto con sabbia e materiale di scavo, curandosi di non lasciare interstizi vuoti".

3.2.2 Fluido termovettore

Il fluido termovettore è costituito da acqua, a cui può essere aggiunto un anticongelante, nel caso in cui le temperature possano scendere sotto gli 0 °C. L'anticongelante più utilizzato è il glicole propilenico, che soddisfa i requisiti di scambio termico del sistema e la salvaguardia dell'ambiente. La percentuale può variare dal 10% al 30%, raggiungendo così temperature di esercizio di -15 °C. L'aggiunta di glicole determina un abbassamento delle proprietà termiche del fluido e di conseguenza l'efficienza dello scambio, tuttavia è un provvedimento necessario. Nonostante il glicole abbia un costo non trascurabile, i danni che si potrebbero verificare alle pompe in caso di congelamento, lo rendono un componente necessario in quasi tutti gli impianti.

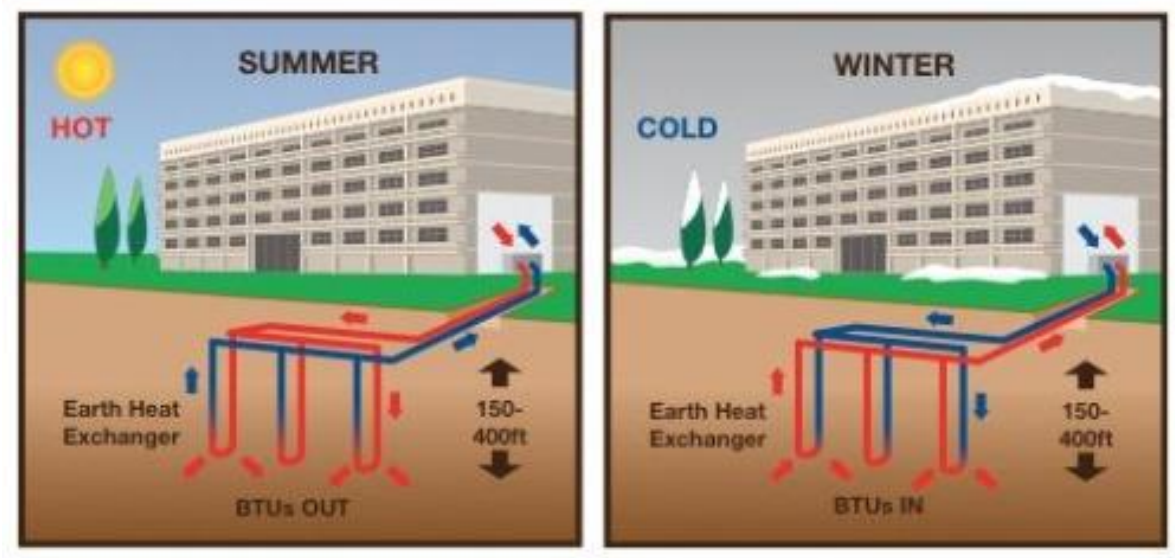


Figura 19. Funzionamento estivo e invernale impianto geotermico

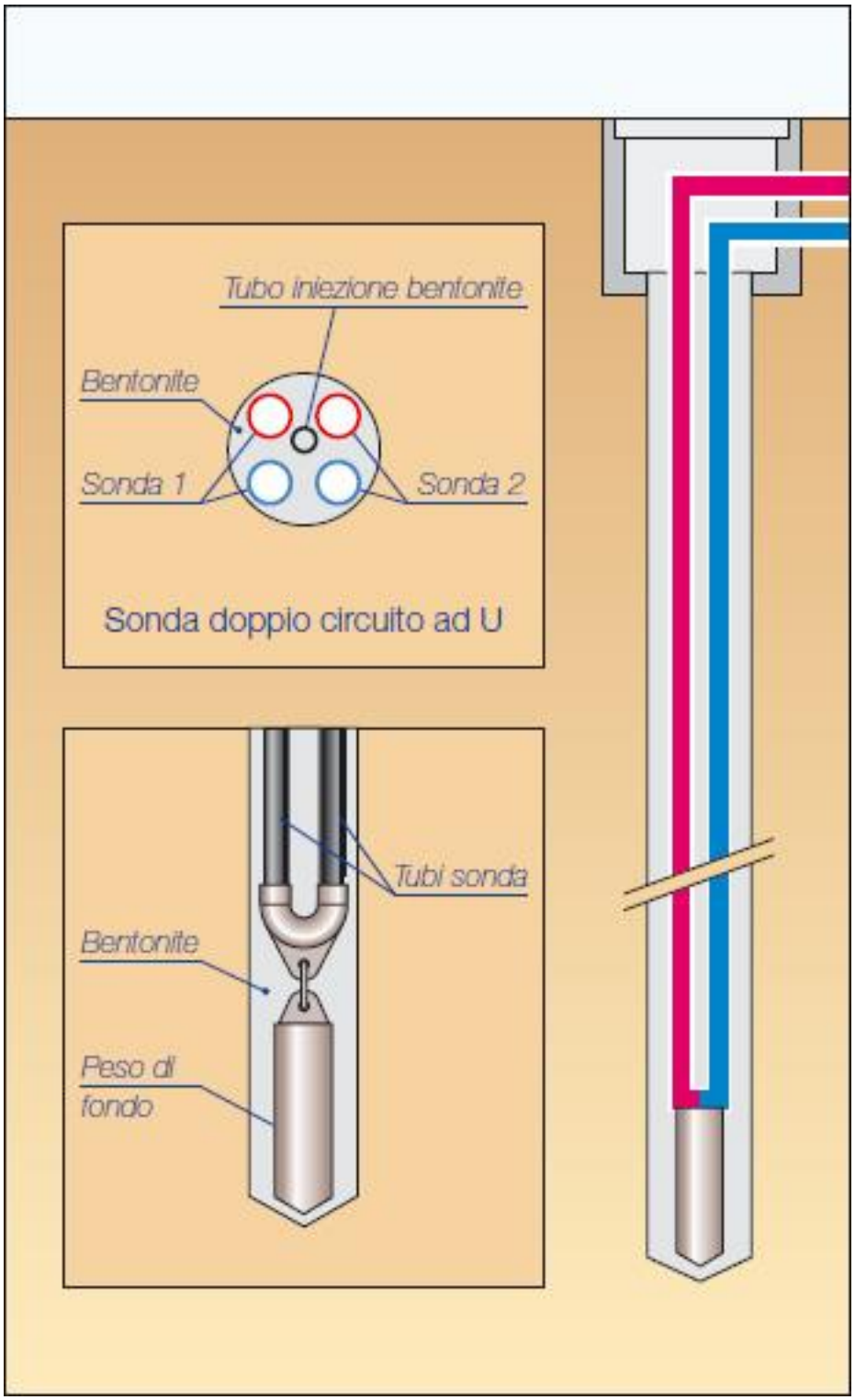


Figura 20. Sonda verticale

Le sonde che attraversano il terreno hanno dimensioni ridotte (dai 20 ai 40 millimetri) e sono generalmente in "polietilene ad alta densità termosaldato, collegate alla base attraverso un raccordo a V tramite saldatura effettuata in fabbrica". Le sonde in acciaio sono state le prime a essere realizzate, possiedono buone proprietà di conducibilità termica, tuttavia sono facilmente soggette a corrosione e a correnti elettriche parassite.
Alla base della sonda è agganciato un peso ("dai 12 ai 25 kg"), in modo da semplificare la discesa nel pozzo.
"In condizioni normali (pressione 16 bar e temperatura 15°C) le sonde hanno una vita di 100 anni", tuttavia "all'aumentare di pressione e temperatura, essa si abbassa notevolmente". Nel caso la temperatura e la pressione raggiungano livelli eccessivi, il polietilene espanso è sostituito dal "polietilene reticolato ad alta pressione, stabilizzato ai raggi ultravioletti", caratterizzato da resistenze maggiori e da un costo raddoppiato rispetto al polietilene espanso.

Miscela (% in materiale solido)	**k_c [W/(m °C)]**
20÷30% bentonite	0,73÷0,75
20% bentonite + 80% quarzite (sabbia SiO_2)	1,0÷1,10
15% bentonite + 85% quarzite	1,47÷1,64
10% bentonite + 90% quarzite	2,08÷2,42
30% cemento + 70% sabbia + plasticizzante	2,08÷2,42
cemento	0,69÷0,78

Figura 21. Resistenza termica materiali di riempimento

4. Pompa di calore

"Il numero di sistemi a pompa di calore geotermica è elevato in alcuni Paesi europei come la Svizzera, la Svezia e la Germania e all'interno degli Stati Uniti. Qui le installazioni sono aumentate in maniera stabile negli ultimi 5 anni. Nel 1997 la loro presenza era stimata in 45000 unità, di capacità media pari a 12kW. Oggi la loro presenza si incrementa di circa 50000 unità all'anno."
Gli impianti geotermici sfruttano un piccolo gradiente di temperatura (2-4 gradi) del fluido termovettore. Questo ΔT non è però sufficiente a riscaldare un edificio: infatti le sonde geotermiche vengono integrate con dei dispositivi che riescono a trasferire calore da un sistema a una certa temperatura a un sistema a temperatura maggiore. La temperatura viene innalzata attraverso "lo scambio termico tra tre fluidi distinti: due termovettori, esterni alla macchina, che collegano la pompa all'ambiente esterno e a quello da climatizzare e uno refrigerante, interno, che permette lo scambio termico tra i precedenti".
Il ciclo termodinamico è molto simile a quello di un frigorifero domestico e, a differenza dei sistemi di riscaldamento tradizionali, non si ha una combustione (olio, gas naturale) ma viene sfruttata l'energia presente nell'ambiente.
La pompa di calore necessità di energia elettrica per i suoi componenti interni, le pompe di ricircolo e gli ausiliari.
Con il termine pompa di calore si indicano diverse tipologie di sistema. "L'ASHRAE ha individuato una nomenclatura standard per differenziare i vari tipi di sistemi geotermici a pompa di calore. Questi sono: pompe di calore accoppiate al terreno (Ground-Coupled Heat Pumps – GCHPs), pompe di calore ad acqua di falda (Ground Water Heat Pumps – GWHPs) e pompe di calore ad acqua di superficie (Surface Water Heat Pumps – SWHPs)."
"Per gli scambiatori verticali sono possibili due differenti circuitazioni:

a) A collettore centrale di alimentazione di una batteria di scambiatori disposti su di una grande area;
b) A disposizione diffusa con piccoli sistemi a pompe di calore indipendenti al servizio delle diverse zone di un edificio.

	Disposizioni in serie	**Disposizione in parallelo**
Vantaggi	1. Percorso singolo e senza incertezze per il bilanciamento 2. Unica misura di diametro delle tubazioni; 3. Migliori prestazioni di scambio termico per il maggior diametro 4. Facile spurgo dell'aria intrappolata (con l'utilizzo di getti di acqua ad alta pressione)	1. Minori costi di installazione (di scavo) 2. Minore quantitativo di liquido antigelo 3. Minore costo di installazione legato alla manodopera 4. Maggiore estensione di tubazioni di minore diametro
Svantaggi	1. Maggiore quantità di fluido coinvolto e conseguente maggiore quantità di antigelo 2. Costo di installazione più alto 3. Installazione più cara (si legga manodopera: maggior peso e minore maneggevolezza di tubi di maggior diametro) 4. Perdite di carico maggiori	1. Attenzione speciale nello spurgo dell'aria 2. Difficoltà di bilanciamento dei circuiti. (Lunghezze eguali tra i vari tratti entro il 10% di errore e ritorno inverso) 3. Approvvigionamento di tubazioni di diametro differente (collettori centrali di mandata e di ritorno)"

4.1 I dispositivi interni

La pompa di calore è costituita da un circuito chiuso, percorso da uno speciale fluido che può trovarsi in condizioni di liquido o di vapore, a seconda di temperatura e pressione.

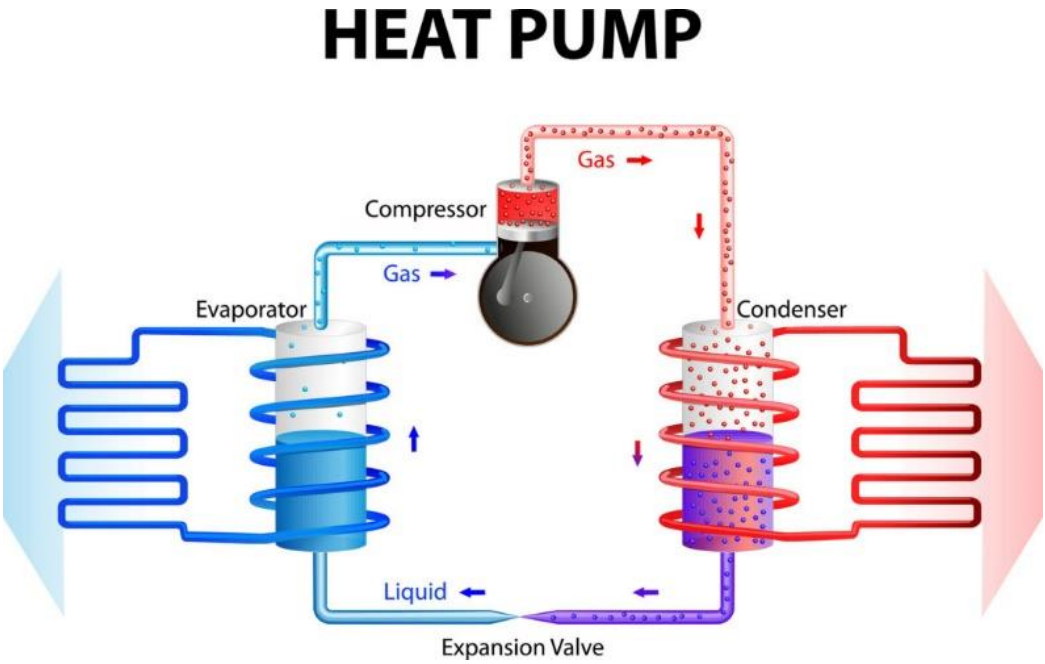


Figura 22. Schema funzionale pompa di calore

Il circuito è costituito da:

- Evaporatore, in cui il fluido, allo stato liquido, assorbe calore proveniente dalla sonda geotermica;
- Compressore, dove il fluido, allo stato gassoso e a bassa pressione, viene portato a pressione e temperatura maggiore, assorbendo ulteriore quantità di calore dal lavoro del compressore;
- Condensatore, il fluido, sempre allo stato gassoso, cede calore all'ambiente da riscaldare;
- Valvola di espansione, in cui il fluido viene riportato alle condizioni di partenza.

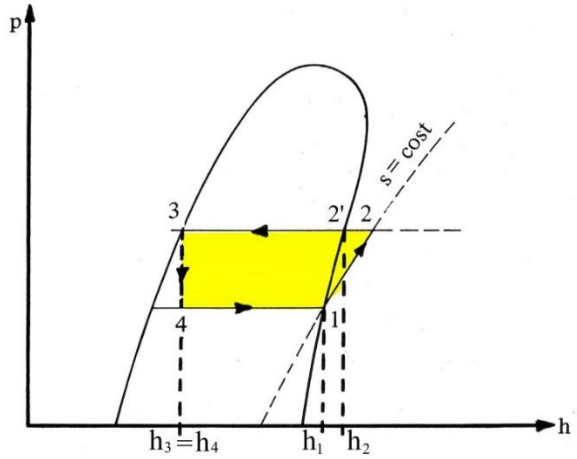


Figura 23. Ciclo termodinamico ideale della pompa di calore

I capisaldi del ciclo termodinamico in Figura. 23 sono i seguenti:

- Punto 3, uscita dal condensatore, liquido saturo
- Tratto 3-4, passaggio nella valvola di laminazione
- Tratto 4-1, passaggio nell'evaporatore
- Tratto 1-2, passaggio nel compressore
- Tratto 2-3, passaggio nel condensatore

4.2 Fluido refrigerante

"Le caratteristiche generali che un fluido deve avere sono: elevato calore di vaporizzazione, pressioni di lavoro moderate, modesto calore specifico allo stato liquido, ridotto volume specifico in fase di vapore."
Il fluidi maggiormente utilizzati sono miscele di HFC (idrofluorocarburi), che hanno sostituito i clorofluorocarburi (CFC), altamente inquinanti e fuorilegge, e l'R22, responsabile dell'allargamento del buco dell'ozono.
Per esempio, viene utilizzata "la miscela R407C, composta da R32, R125 e R134a, che non contenendo cloro non danneggia l'ozono e presenta un potenziale effetto serra inferiore all'R22".
"Un'ulteriore alternativa è rappresentata dai refrigeranti naturali: ammoniaca (R717), idrocarburi propano (R290), propilene (R1270) e isobutano (R600), l'acqua (R718) e l'anidride carbonica (R744).
Per valutare le prestazioni di una pompa di calore si utilizzano due coefficienti. Nel caso invernale, si usa il COP (coefficient of performance), nel caso estivo invece l'EER (Energy Efficiency Ratio).

$$COP = \frac{Q_1}{L} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} \tag{8}$$

$Q_1 = quantità\ di\ calore\ ottenuta\ [kJ]$
$L = lavoro\ fornito\ [kJ]$
$T_0 = temperatura\ della\ sorgente\ calda\ [K]$
$T_1 = temperatura\ della\ sorgente\ fredda\ [K]$

$$EER = \frac{Q_1}{L} = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \tag{9}$$

$Q_1 = quantità\ di\ calore\ ottenuta\ [kJ]$
$L = lavoro\ fornito\ [kJ]$
$T_0 = temperatura\ della\ sorgente\ calda\ [K]$
$T_1 = temperatura\ della\ sorgente\ fredda\ [K]$

5. Analisi costi benefici

"Una sonda geotermica verticale costa mediamente attorno ai 40 €/mt, mentre i costi di installazione di un impianto geotermico a pompa di calore sono un po' variabili perché dipendono dal tipo di edificio (dimensioni e grado di isolamento termico) e dalla natura dei terreni. Volendo fare un esempio tipico di una villetta singola di circa 150 mq, costruita con moderne concezioni e nel rispetto delle normative, il costo è indicativamente di 15÷20.000 € "chiavi in mano". Consente un risparmio economico annuo sui costi di esercizio rispetto ad un sistema tradizionale (caldaia a metano e condizionatore split) di circa il 50% e di circa il 70÷80% rispetto ad un impianto a caldaia alimentata a gpl o a gasolio".
Per poter analizzare il costo complessivo di un impianto geotermico di climatizzazione occorre stabilire i costi di installazione, di esercizio e di mantenimento.
La scarsa diffusione di questi impianti è causata dagli elevati costi iniziali: gli oneri della macchina e delle apparecchiature ausiliarie, la perforazione del pozzo hanno infatti costi elevati. "La perforazione del pozzo ha un costo di 50-60 €/m, a seconda del terreno. Le sonde variano, a seconda di diametro, materiale, tipo di raccordo, ma presentano un prezzo al metro inversamente proporzionale alla lunghezza del tubo: una sonda di 100 metri ha un costo di 9-29 €/m, a cui bisogna aggiungere il costo dell'inserimento della sonda nel pozzo, di 112-144 €/m".
Non bisogna inoltre tralasciare il costo del materiale di riempimento, la pompa di calore (il prezzo è simile a quello di una caldaia a condensazione) e dei terminali: infatti generalmente si utilizzano pannelli radianti. I più diffusi sono i sistemi a pavimento o a parete, che oltre a garantire benessere e comfort al corpo umano, sono i più efficienti: sfruttando un piccolo gradiente termico riescono a mantenere la temperatura costante nei vari locali, evitando così la nascita di moti convettivi dell'aria. La diminuzione di correnti d'aria elimina anche il problema degli spifferi e del sollevamento di polveri. Grazie a questa soluzione, l'aria sarà meno secca, rendendo quindi la temperatura percepita maggiore di quella reale. Esistono diverse configurazioni di pannelli radianti, ma le più diffuse sono a serpentina e a chiocciola

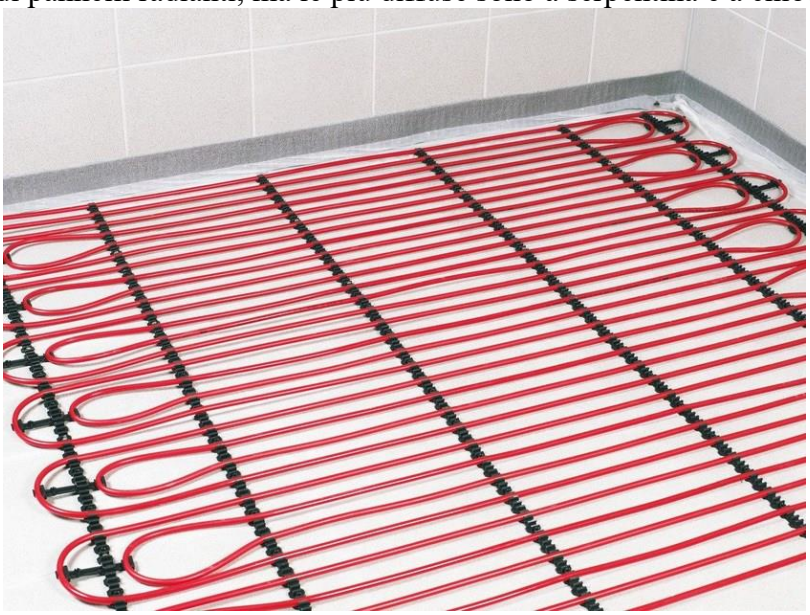


Figura 24. Configurazione a serpentina del riscaldamento a pavimento

Figura 25. Configurazione a chiocciola del riscaldamento a pavimento

Di seguito viene riportato un esempio di impianto geotermico.
"Un edificio residenziale, una villetta unifamiliare di nuova costruzione con una superficie di circa 260 m2 situata nel Nord Italia. La potenza termica richiesta è di 8,5 kW, mentre quella frigorifera è di 6,2 kW.

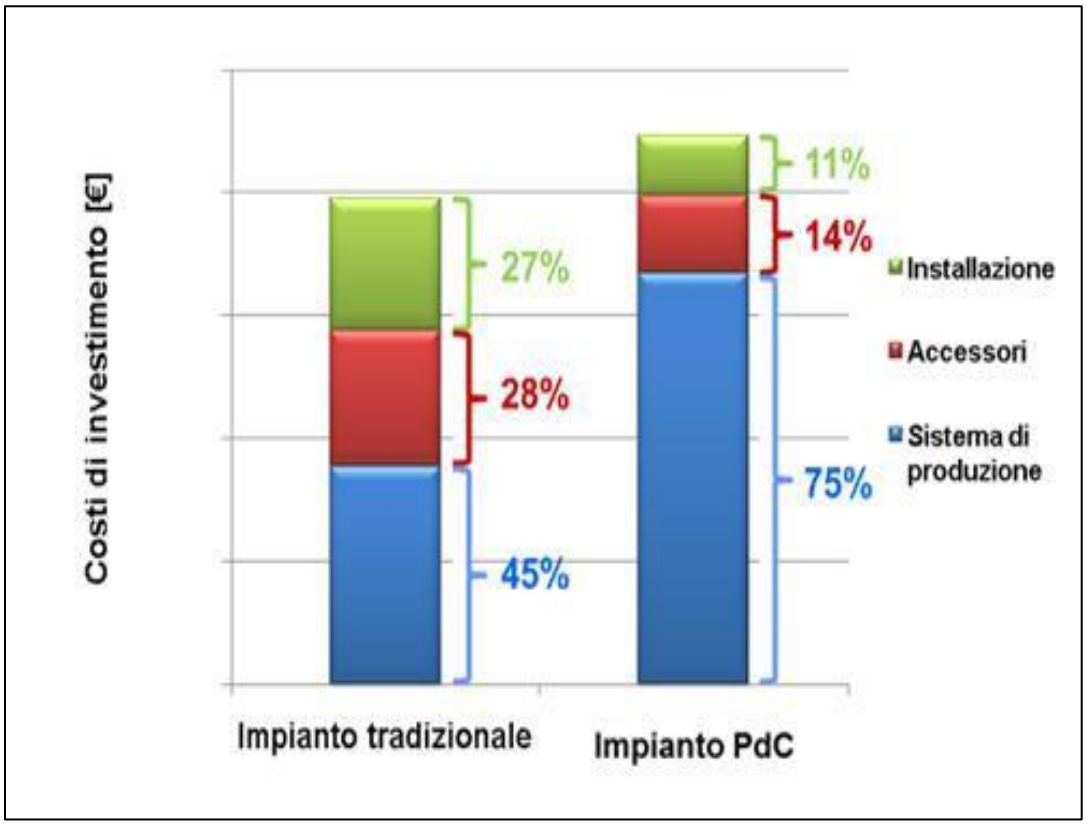


Figura 26. Investimenti iniziali

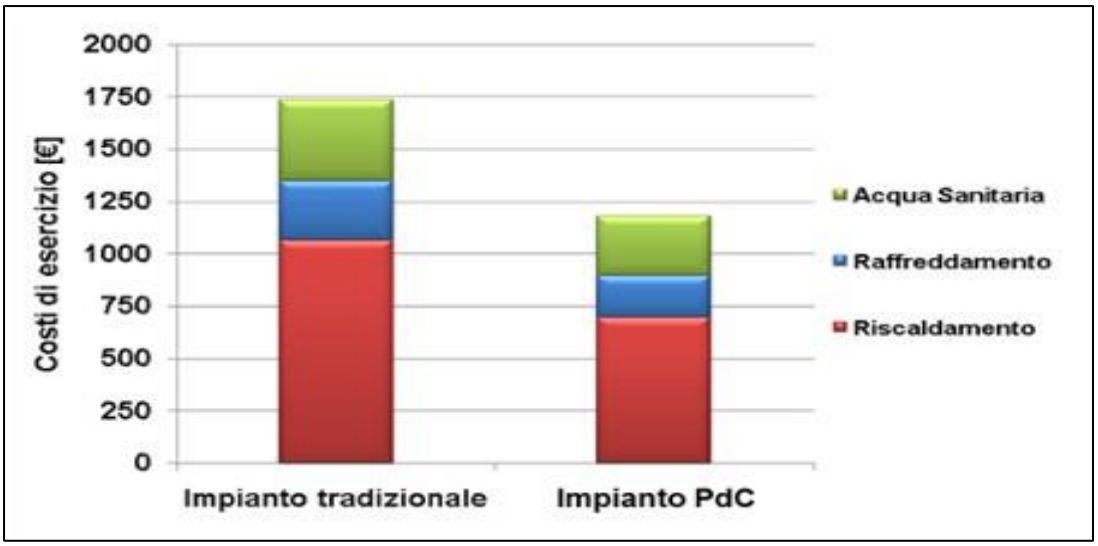


Figura 27. Costi di esercizio

In questo caso si è scelto di installare un unico impianto a pompa di calore elettrica aria/acqua per il raffrescamento, il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria. Il sistema di distribuzione per la climatizzazione è stato realizzato con pannelli radianti a soffitto, mentre il rinnovo e la purificazione dell'aria avvengono con recupero di calore. È stato poi integrato un impianto solare termico.
Riguardo ai costi di investimento si osserva che, rispetto ai costi di un impianto tradizionale costituito da una caldaia abbinata a un condizionatore split, il costo della pompa di calore come apparecchio è maggiore anche se i costi di accessori e di installazione si riducono poiché si tratta di un unico impianto. In ogni caso rimane un maggior costo di investimento, pari a circa 2.600 euro.
Tuttavia, se si analizzano i costi di esercizio dell'impianto installato, si riscontra un risparmio di circa 1.200 euro/anno rispetto al sistema tradizionale. I maggiori risparmi si hanno nella fase invernale di riscaldamento. Ciò significa che, nonostante un maggiore investimento iniziale di 2.600 euro rispetto all'impianto tradizionale, i risparmi annui di 1.166 euro consentono di avere un ritorno dell'investimento in soli 3 anni e di risparmiare, per tutti gli altri anni di vita dell'impianto, un importo di 1.166 euro/anno."
Risulta evidente come, a fronte di un elevato investimento iniziale, sia possibile ottenere un tempo di ritorno relativamente basso, rispetto ai classici sistemi a caldaia.
È possibile anche una comparazione tra i sistemi con sonde verticali e orizzontali.
"Un edificio di 300 m^3, adibito a ufficio, potendo quindi trascurare il consumo di acqua sanitaria, presenta una richiesta di riscaldamento invernale di 22,05 kWh e una di raffrescamento estivo di 4900 kWh. La potenza estraibile dal terreno è di 50 W/m. il costo dell'energia elettrica è di 0,18 €/kWh, mentre quello del metano è di 0,6 €/m^3".
Nell'ipotesi di sonde orizzontali, si suppone una resa termica di 25 W/m^2, necessitando così di uno sbancamento del terreno di circa 500 m^2. I tubi vengono posati a 2 metri di profondità, sono lunghi 100 metri e il passo è di 0,33 m. Occorrono quindi 15 sonde, il cui costo al metro è di 0,86 €, per un totale di 1.290 €, a cui vanno aggiunti i costi di sbancamento pari a 4 €/m^3, per un totale di 5.290 €.
Gli altri costi iniziali sono di 21.600 €, che comprendono pompa di calore, centralina, deumidificatori e pannelli a pavimento.
Questi ultimi costi sono uguali nel caso di geotermia verticale, mentre la spesa per gli scavi e le sonde è differente. Infatti, avendo ipotizzato una potenza termica di 50 W/m, saranno

sufficienti due sonde da 100 metri. Avendo queste un costo di 55 €/m, la spesa totale è di 11.000 €.
Andando a sommare le spese totali, per la configurazione orizzontale, si avrà un investimento iniziale di 26.890 €, mentre per il verticale il costo sarà di 32.600 €.
A parità di efficienza, risulta evidente come i collettori orizzontali siano più convenienti, poiché le spese di gestione (e di conseguenza il risparmio rispetto a un sistema a caldaia) sono identiche. Tuttavia, il rendimento del sistema orizzontale è inferiore e presenta un andamento non costante, causato dalla stagionalità. Inoltre occorrerebbero 500 m^2 di terreno liberi, non sempre disponibili.

Per quanto riguarda il confronto con la soluzione tradizionale a metano, vengono analizzati i seguenti indici:

- VAN, valore attuale netto
- TR, tempo di ritorno
- TRA tempo di ritorno attualizzato (tempo che annulla il VAN)
- IP indice di profitto

$$\mathrm{VAN} = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{V_t}{(1+k)^t} \tag{10}$$

Dove :

V_t *Rappresenta i flussi di cassa in t*

I_0 *Rappresenta il valore dell'investimento iniziale*

n *= numero dei periodi considerati*

k *= costo del capitale utilizzato*

TR = Investimento iniziale/VAN

IP = VAN/I_0

VAN [€]	TR [anni]	TRA [anni]	IP
9.058	4	5	3,13
3.343	12	14	0,38

Figura 28. Confronto sonda orizzontale e sonda verticale

Ancora una volta, risulta migliore dal punto di vista economico la soluzione a collettori orizzontali.
Non bisogna escludere però l'utilizzo di un sistema geotermico combinato con un impianto tradizionale con caldaia a condensazione, per poter coprire i picchi di richiesta invernali.

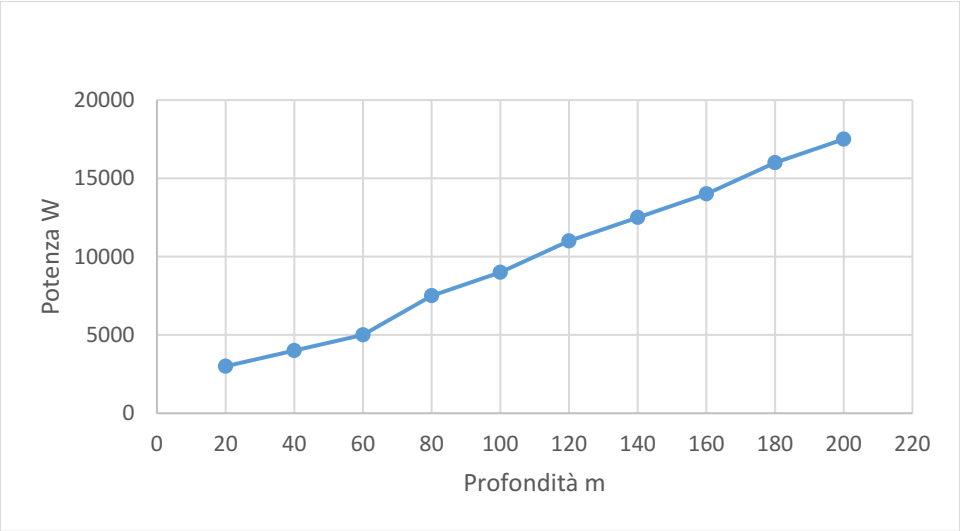


Figura 29. Potenza termica estratta in funzione della profondità

In questa tesi sono state analizzate anche sonde verticali di 30 metri, una lunghezza minore rispetto a quelle usate solitamente. Dalle simulazioni è stato possibile calcolare una potenza termica di circa 4 kW per una sonda di 30 metri.

Come detto in precedenza, gli investimenti per un campo di sonde verticali sono piuttosto onerosi, soprattutto per quanto riguarda lo scavo del pozzo e la posa dei tubi. Tuttavia, la possibilità di poter sfruttare sonde più corte potrebbe ridurre significativamente i costi di scavo dei pozzi, dovendo raggiungere profondità minori.

Prezzo unitario [€/m]	Profondità [m]	Costo sonda [€]	kW	Sonde	Costo totale
50	100	5000	10	4	20000
66,7	30	2000	4	10	20000

Figura 30. Confronto dei costi delle tipologie di sonda

Nella tabella in Figura. 30 è stato riportato il prezzo unitario massimo di una sonda di 30 metri affinché i costi iniziali non superino quelli di un impianto di sonde di 100 metri di profondità.

6. Simulazioni Matlab tramite Differenze Finite

Equazione del calore
Nelle simulazioni effettuate sul software Matlab è stato costruito un ambiente governato dall'equazione del calore:

$$\frac{\partial T}{\partial t}(x,y,z,t) = \propto (x,y,z) \times \nabla^2 T(x,y,z,t) \tag{11}$$

Per semplicità è stato considerato il problema bidimensionale:

$$\frac{\partial T}{\partial t}(x,y,t) = \propto (x,y) \times (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x,y,t) + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}(x,y,t)) \tag{12}$$

L'equazione è risolvibile date le e condizioni al contorno e quelle iniziali, che in questo caso sono:

$$T(x=0,y,t) = T_{AMB} + (T_0 - T_{AMB}) \times e^{\frac{-y}{H_0/3}} \tag{13}$$

$$T(x=0,y,t) = T_{AMB} + (T_0 - T_{AMB}) \times e^{\frac{-y}{H_0/3}} \tag{14}$$

$$T(x=x_{MAX},y,t) = T_{AMB} + (T_0 - T_{AMB}) \times e^{\frac{-y}{H_0/3}} \tag{15}$$

$$T(x,y=0,t) = T_{AMB} \tag{16}$$

$$T(x,y=y_{MAX},t) = T_0 \tag{17}$$

$$T(x,y,t=0) = T_{AMB} + (T_0 - T_{AMB}) \times e^{\frac{-y}{H_0/3}} \tag{18}$$

$$T(x,y,t=0) = T_{acqua} \tag{19}$$

Il campo di diffusività termica è noto ed è stato considerato costante nel tempo in base al materiale presente, ipotizzato omogeneo:

$$\propto (x, y) = \propto_{ACQUA} \tag{20}$$

$$\propto (x, y) = \propto_{SONDA} \tag{21}$$

$$\propto (x, y) = \propto_{TERRA} \tag{22}$$

$$\propto (x, y) = \propto_{ARIA} \tag{23}$$

Per risolvere il sistema dello studio è stato usato il metodo delle differenze finite.

Il metodo delle differenze finite è uno dei metodi usati per risolvere le equazioni differenziali. Questo prevede l'approssimazione delle derivate a partire dalla loro definizione:

$$\frac{df(t)}{dt} = \lim_{dt \to 0} \frac{f(t + dt) - f(t)}{dt} \tag{24}$$

In prima approssimazione si può considerare solo il +st termine dello sviluppo in serie di Taylor (approssimazione lecita, visto che gli incrementi utilizzati dalla simulazione sono sufficientemente piccoli):

$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{f(t + dt) - f(t)}{dt} \tag{25}$$

Le derivate seconde vengono approssimate nello stesso modo:

$$\frac{d^2 f(t)}{dt^2} = f(t + dt) - \frac{2f(t) + f(t - dt)}{dt^2} \tag{26}$$

Sostituendo queste approssimazioni nell'equazione del calore si ottiene:

$$\begin{aligned} \frac{T(x, y, t + dt) - T(x, y, t)}{dt} = \\ \propto (x, y) \\ \times \left(\frac{T(x + dx, y, t) - 2T(x, y, t) + T(x - dx, y, t)}{dx^2} \right) \\ + \left(\frac{T(x, y + dy, t) - 2T(x, y, t) + T(x, y - dy, t)}{dy^2} \right) \end{aligned} \tag{27}$$

L'equazione così approssimata può essere semplicemente risolta usando un algoritmo numerico.
In questa tesi è stato sviluppato un codice Matlab riassumibile nel seguente script:

```
for i=1:t_max
        for j=1:x_max
                for k=1:ymax
  T(j,k,i+1)=T(j,k,i)+dt+alpha(j,k)[(T(j+1,k,i)-2*T(j,k,i)+T(j-1,k,i))/dx^2+(T(j,k+1,i)-
2*T(j,k,i)+T(j,k-1,i))/dy^2]
                end
        end
end
```

In letteratura è possibile trovare altri metodi per ovviare ai problemi riscontrati utilizzando il metodo delle differenze finite.
Le approssimazioni usate possono essere migliorate: in questo studio è stato usato il metodo esplicito, tuttavia esistono altri metodi come quello implicito, Crank-Nicholson.
Nel caso della tesi è stato usato il metodo delle differenze finite, quindi una mesh quadrata. Nel caso di elementi finiti si sarebbe ottenuta una mesh "irregolare" e di conseguenza una precisione migliore.
Nelle simulazioni le condizioni esterne sono rimaste uguali: temperatura fluido termovettore, temperatura esterna dell'aria, temperatura del terreno (stesso andamento), conformazione del terreno. Anche per le sonde acciaio, copertura plastica e materiale bentonico sono rimasti gli stessi.
Il confronto è avvenuto con diametri dei tubi diversi (D_1 e D_2) ma a parità di portata, da cui ne risulta che le velocità saranno diverse.
Nel sistema in questione l'acqua è ferma, tuttavia è stato possibile riprodurre le condizioni di acqua in moto modificando la diffusività α dell'acqua stessa, calcolata tramite software EED (Earth Energy Designer).

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_P} \tag{28}$$

6.1 Dati Simulazione

Nelle tabelle seguenti sono riportati i dati delle variabili utilizzate nei due casi di simulazione:

t_max	1500			
x_max	5			
y_max	130			
T_max	16	°C	289,15	K
T_min	0	°C	273,15	K
dt	1,5			
ds	0,05			
H_0	15	m		
h	1	m		
D	0,2	m		
d	0,005	m		
L	0,05	m		
x_in	0,01	m		
y_fin	120	m		
T_aria	0	°C	273,15	K
T_0	14	°C	287,15	K

Materiale	α [m^2/s]
Acqua	1,20E-07
Aria	1,90E-06
Terra	1,15E-06
Sonda	2,50E-05

Figura 31. Dati simulazione

t_max	1500			
x_max	5			
y_max	130			
T_max	16	°C	289	K
T_min	0	°C	273	K
dt	1,5			
ds	0,05			
H_0	15	m		
h	1	m		
D	0,4	m		
d	0,009	m		
L	0,06	m		
x_in	0,01	m		
y_fin	120	m		
T_aria	0	°C	273	K
T_0	14	°C	287	K

Materiale	α [m^2/s]
Acqua	1,20E-07
Aria	1,90E-06
Terra	1,15E-06
Sonda	2,50E-05

t_max	Variabile temporale
x_max	Coordinata x
y_max	Coordinata y
T_max	Temperatura massima
Temperatura minima	0
Dt	Incremento temporale
ds	Incremento spaziale
H_0	Profondità a temperatura costante
h	Strato aria
D	Diametro sonda
d	Distanza tubo mandata-tubo ritorno
L	Profondità a cui si misura la temperatura
x_in	Limite coordinata x
y_fin	Limite coordinata y
T_aria	Temperatura aria
T_0	Temperatura terreno oltre 15 metri

Figura 32. Dati simulazione

Nel caso di sistema con due sonde accoppiate, la distanza tra esse cambia: per le sonde verticali da 30 metri la distanza è di 3 metri, per le sonde verticali da 120 metri e per le orizzontali, la distanza è 6 metri.
Sono stati studiati sei casi diversi:

- Una sonda verticale da 30 metri
- Una sonda verticale da 120 metri
- Una sonda orizzontale da 120 metri
- Due sonde verticali da 30 metri
- Due sonde verticali da 120 metri
- Due sonde orizzontali da 120 metri

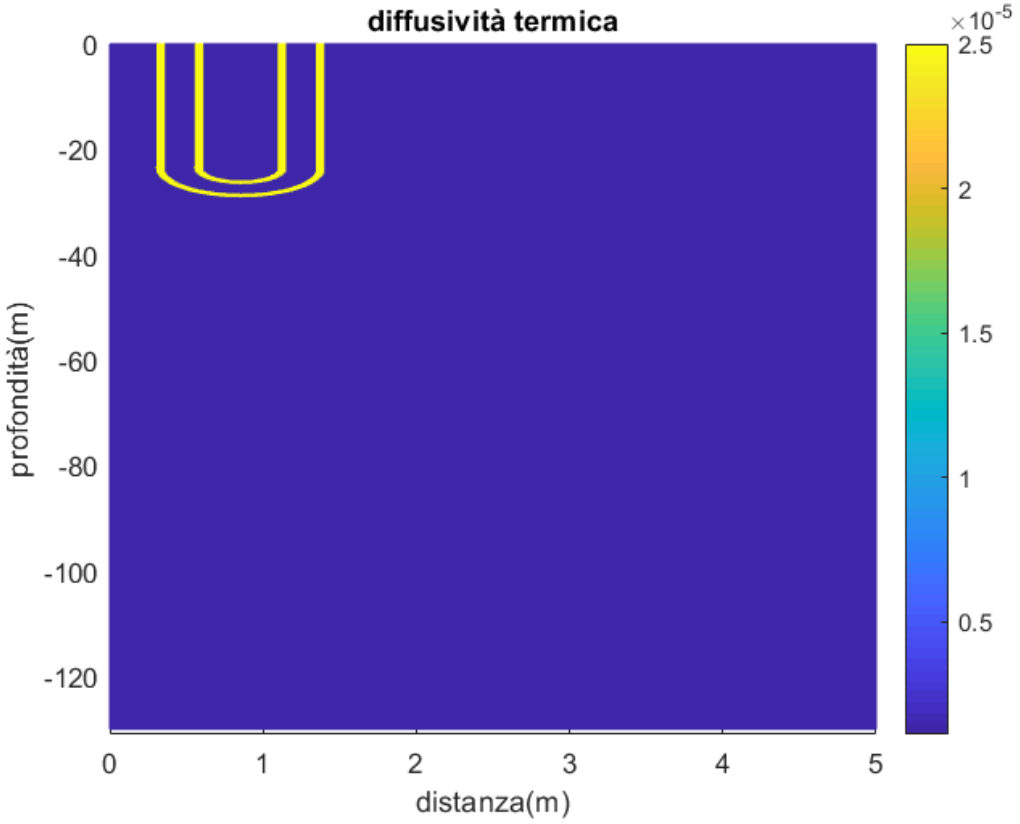
Per ogni caso si è simulato il comportamento con due diametri diversi, D_1= 20 mm e D_2=40 mm.

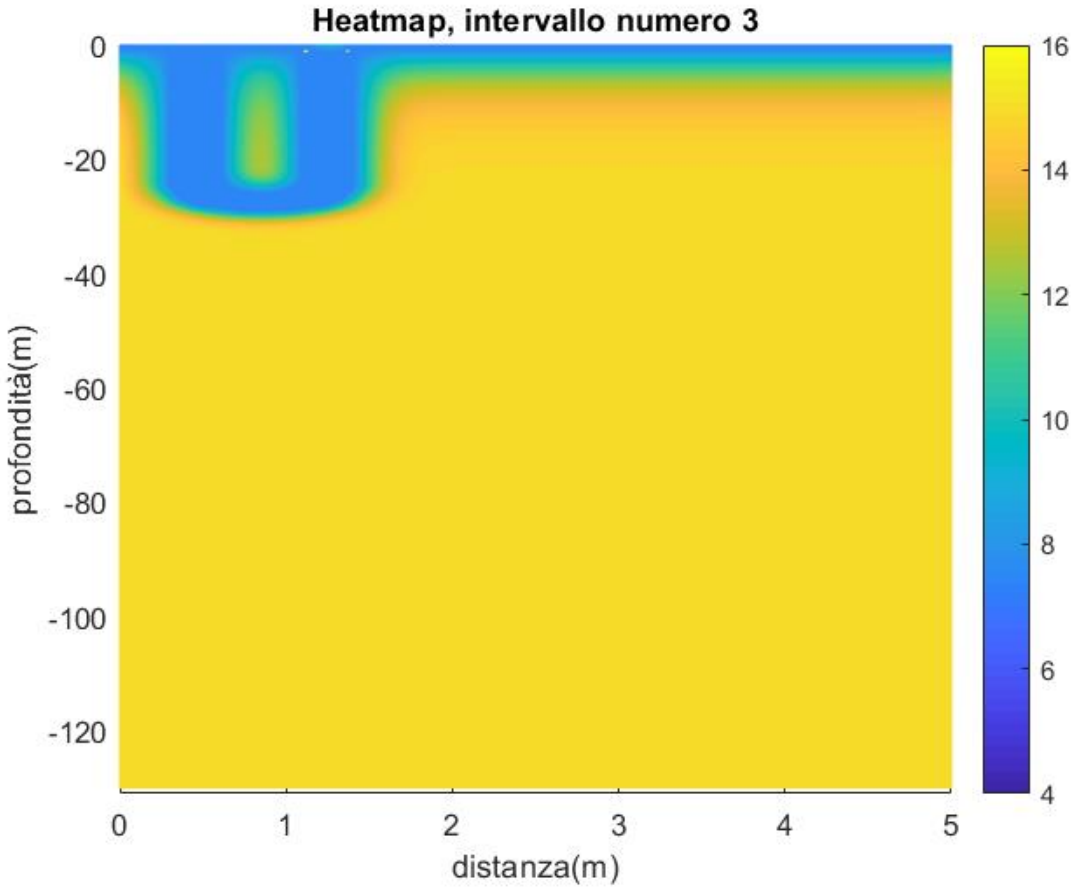
Di seguito vengono riportati i seguenti grafici:

- Diffusività del sistema;
- Heatmap;
- Andamento temperatura-tempo;
- Temperatura iniziale;

Nel caso di due sonde accoppiate, l'obiettivo è studiare come interagiscono tra loro, pertanto non sono riportati i grafici con l'andamento della temperatura nel tratto di uscita della sonda.

I seguenti grafici riportano i risultati relativi alla sonda verticale di lunghezza 30 metri e diametro D_1 = 20 mm





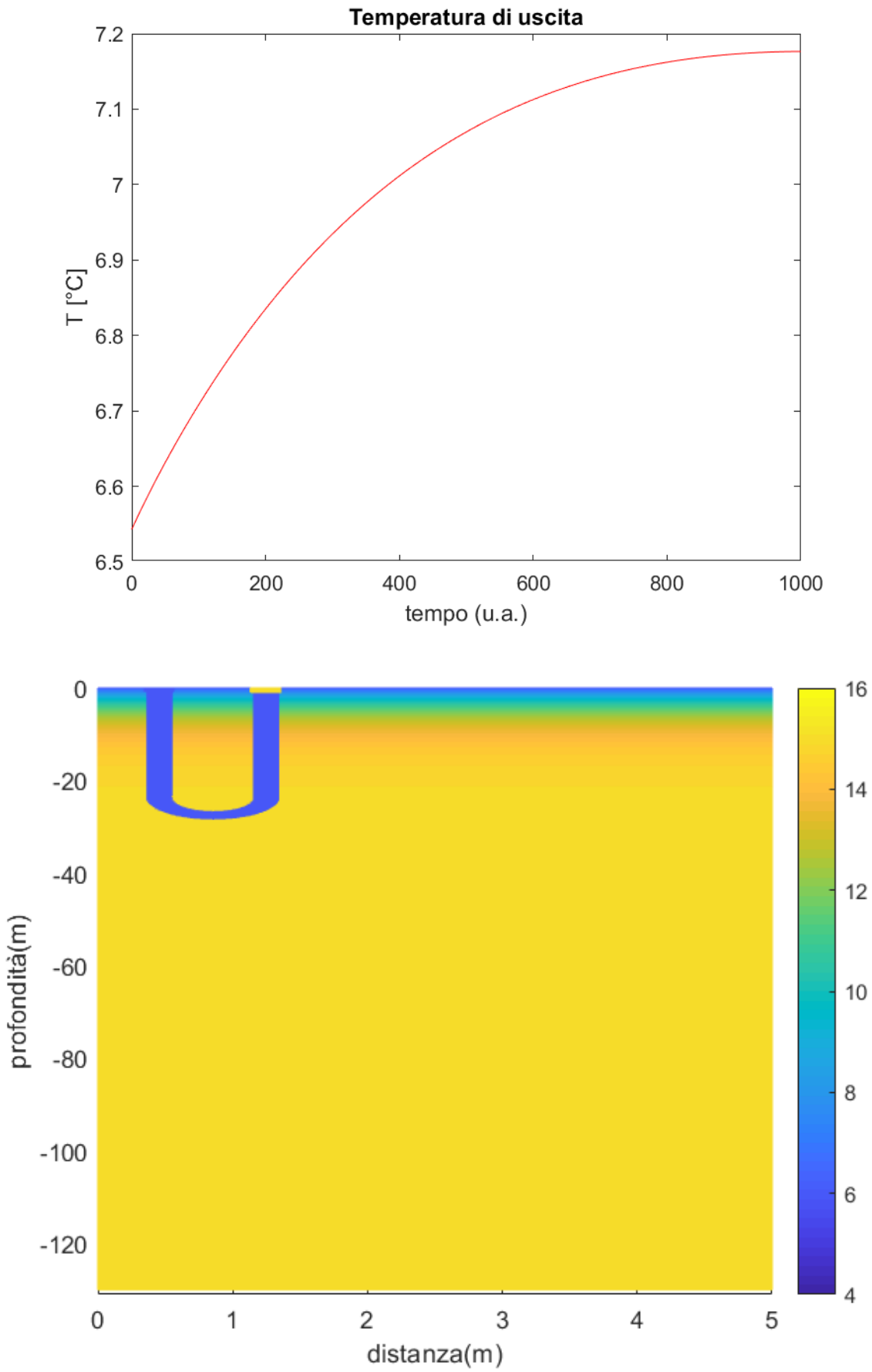
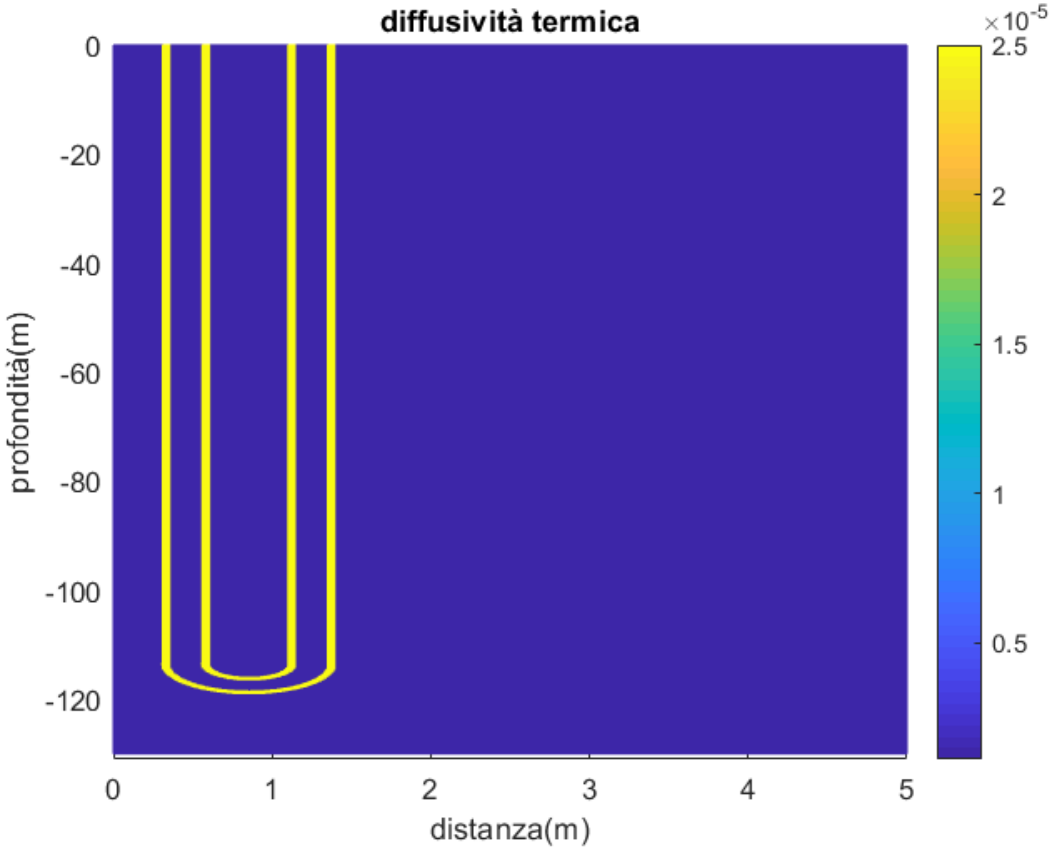
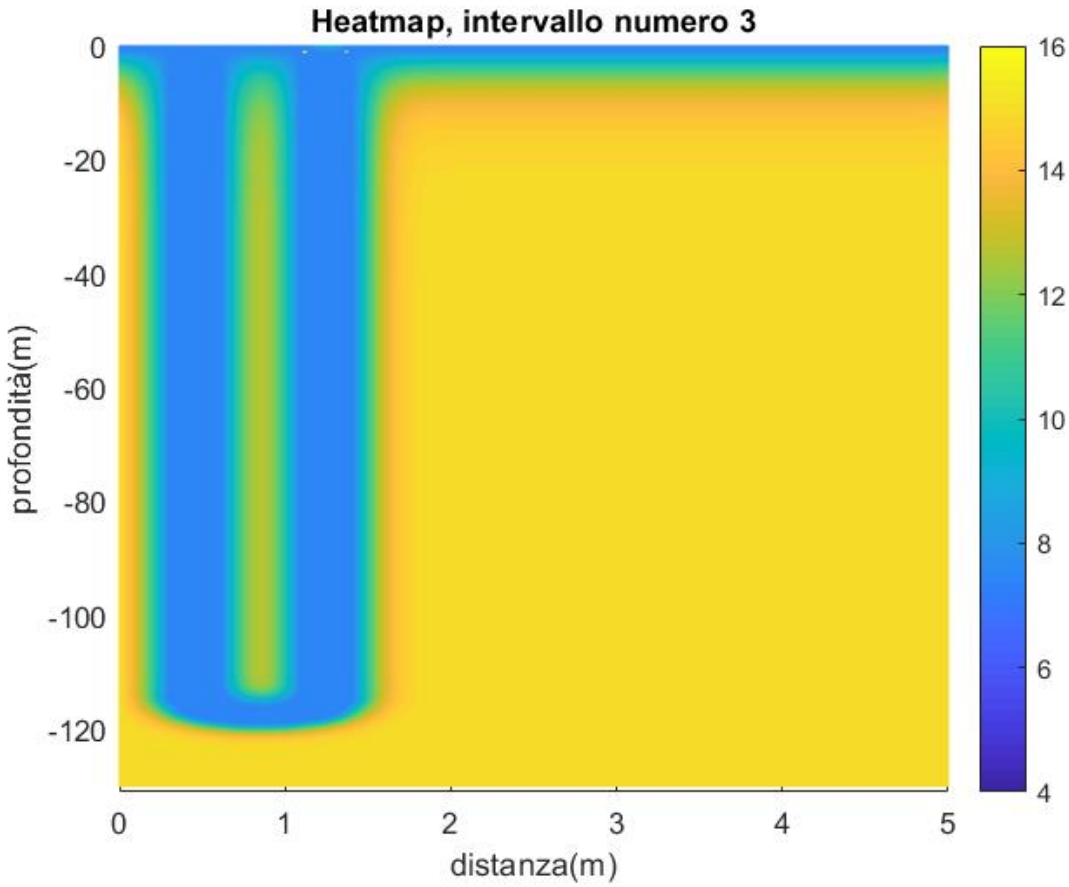
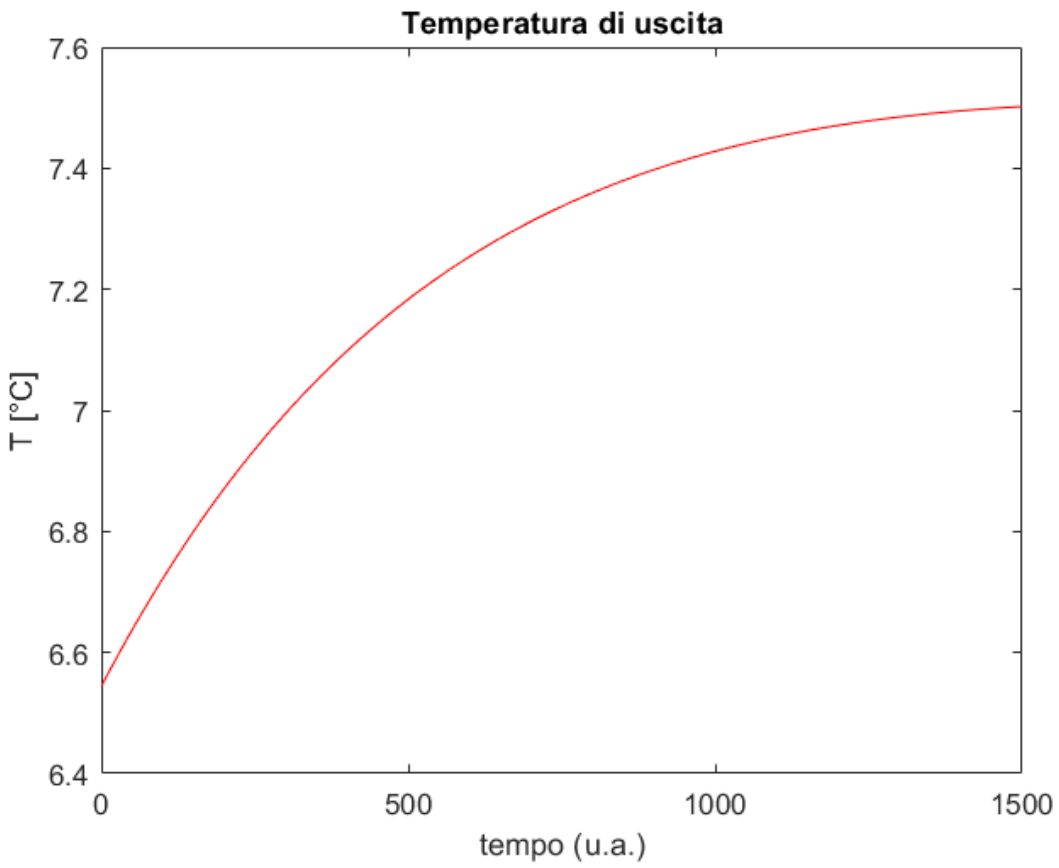


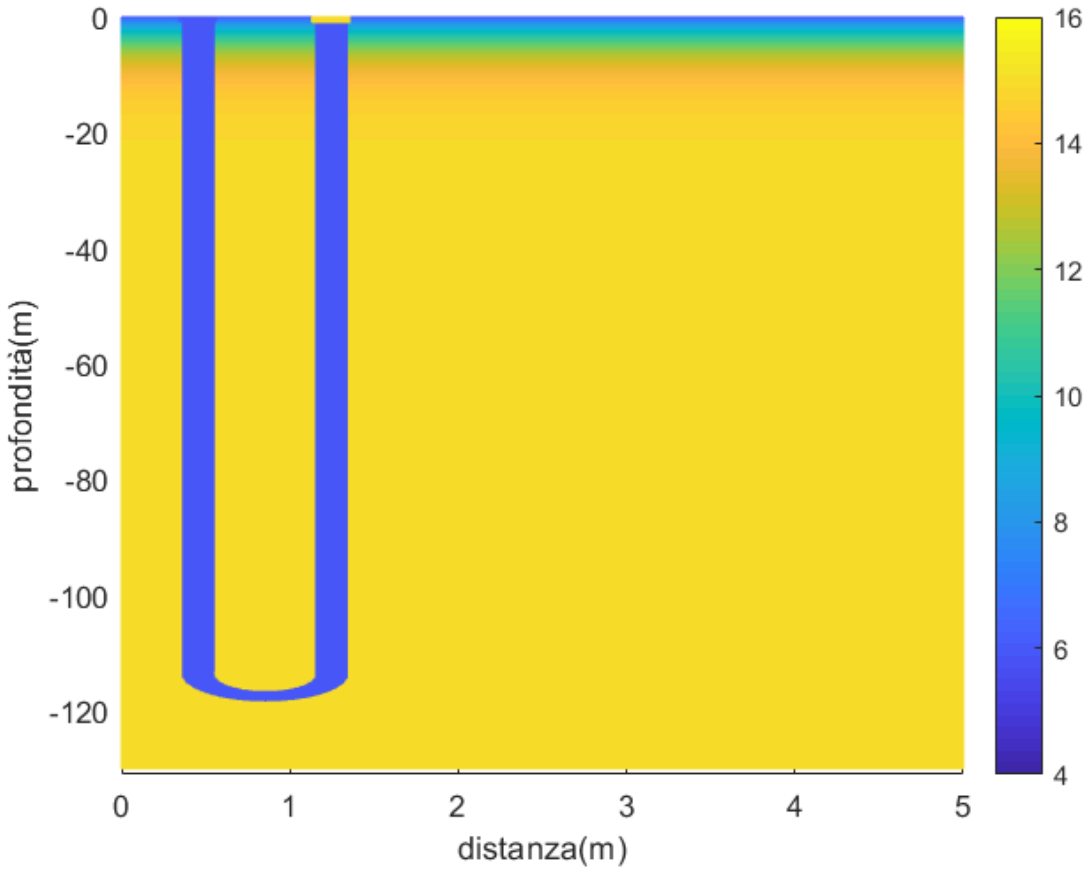
Figura 33. Temperatura iniziale

I seguenti grafici riportano i risultati relativi alla sonda verticale di lunghezza 120 metri e diametro D_1 = 20 mm

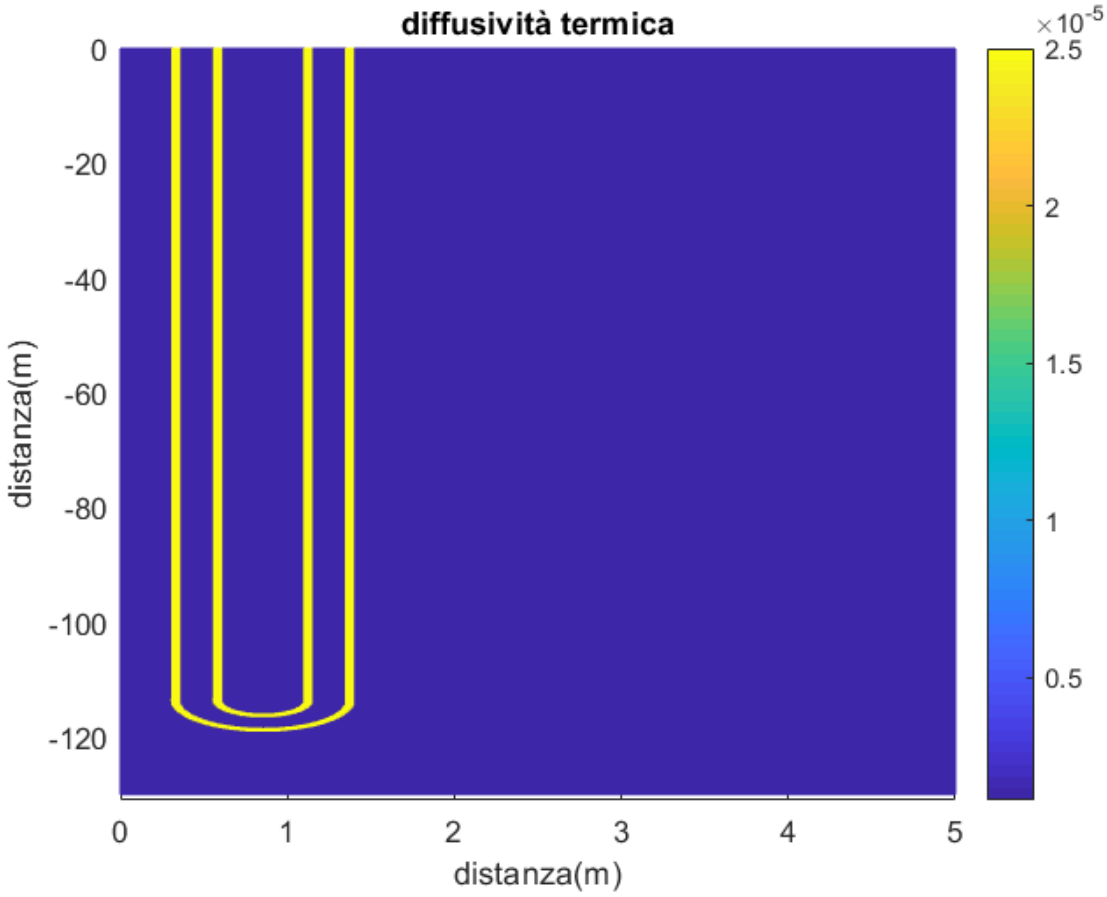


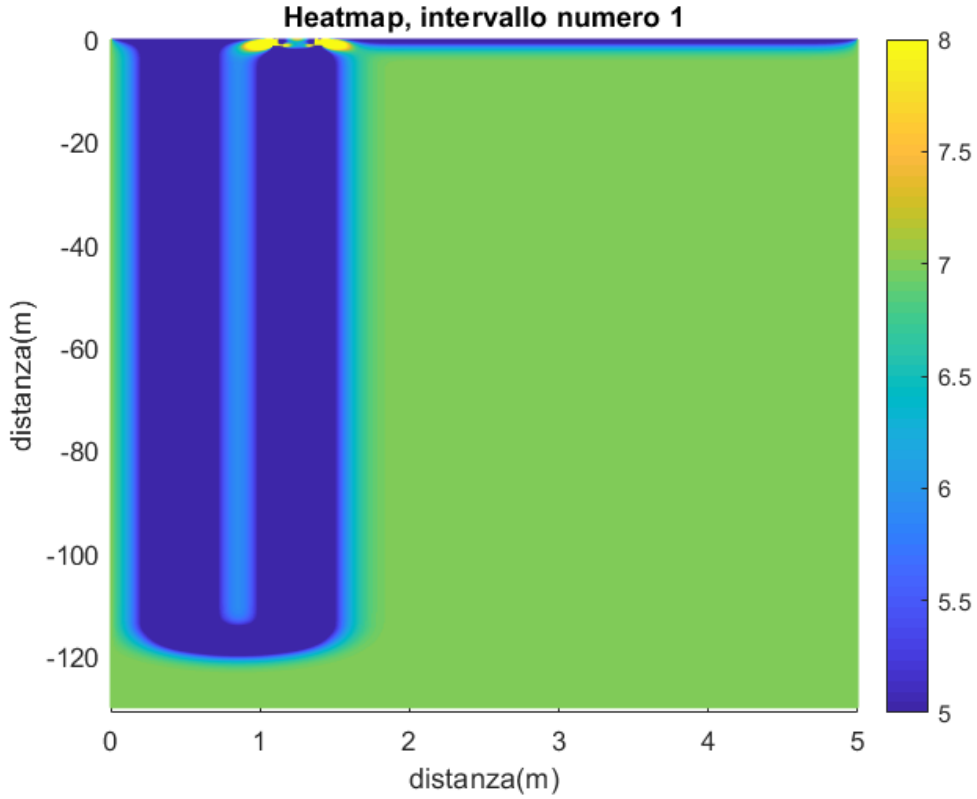


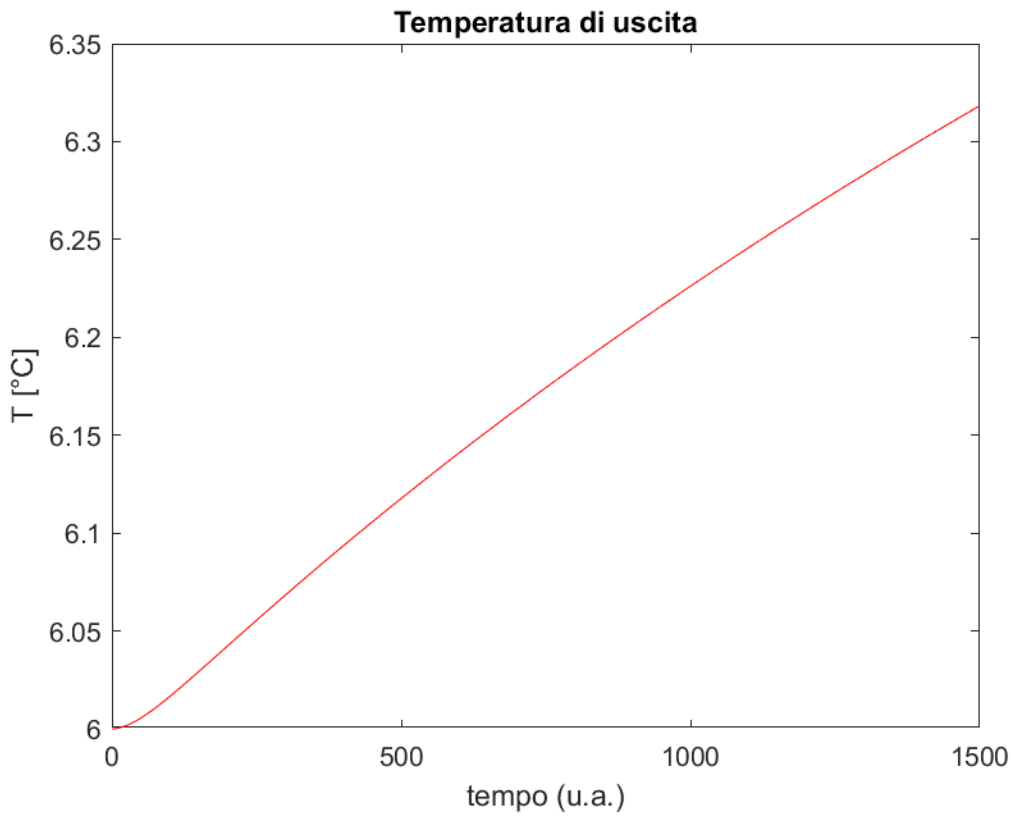

Temperatura di uscita
7.6
7.4
7.2
7
6.8
6.6
6.4
T [°C]
0
500
1000
1500
tempo (u.a.)

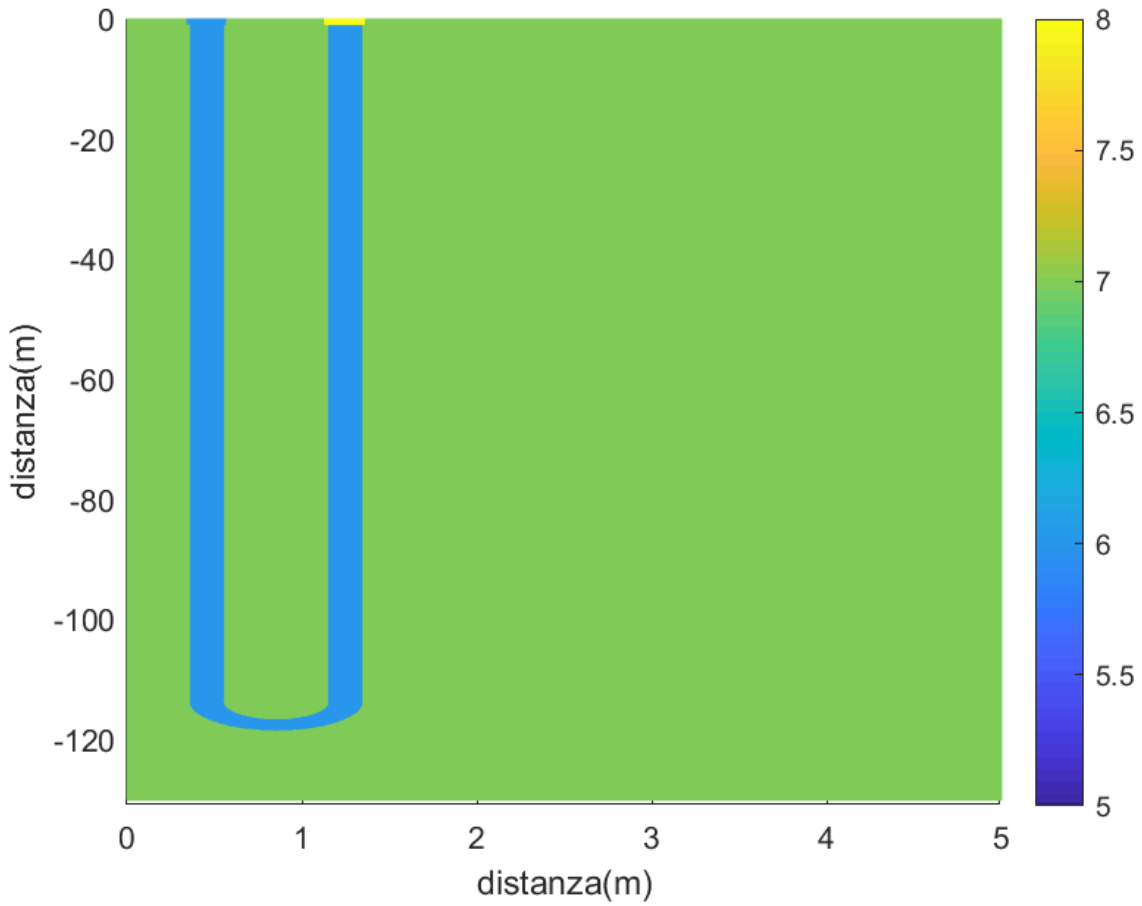

0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
profondità(m)
0
1
2
3
4
5
distanza(m)
16
14
12
10
8
6
4

I seguenti grafici riportano i risultati relativi alla sonda orizzontale di lunghezza 120 metri e diametro $D_1 = 20$ mm

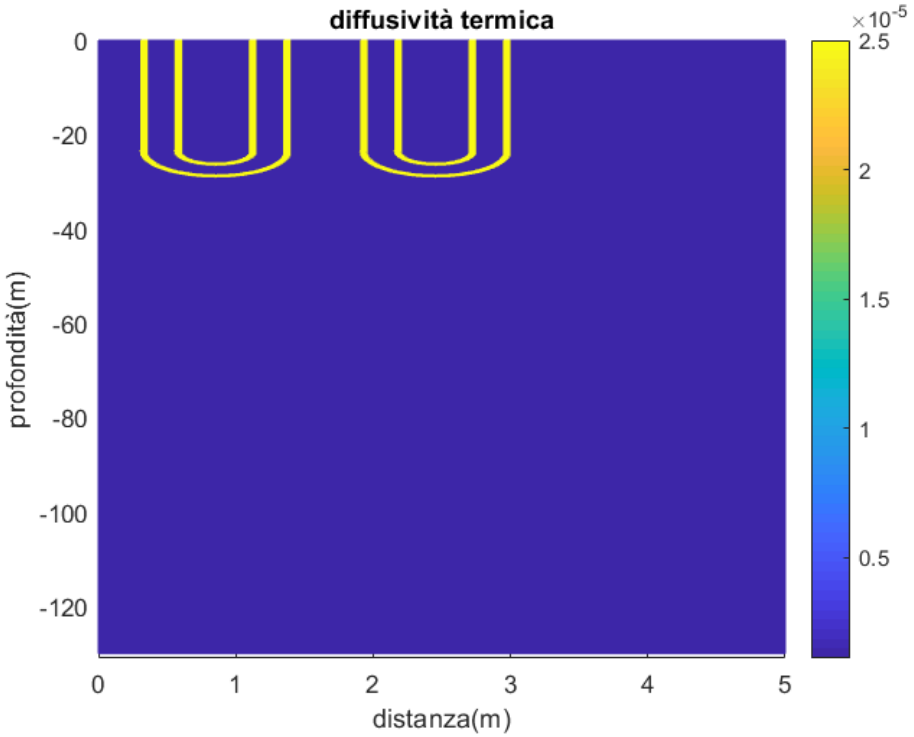


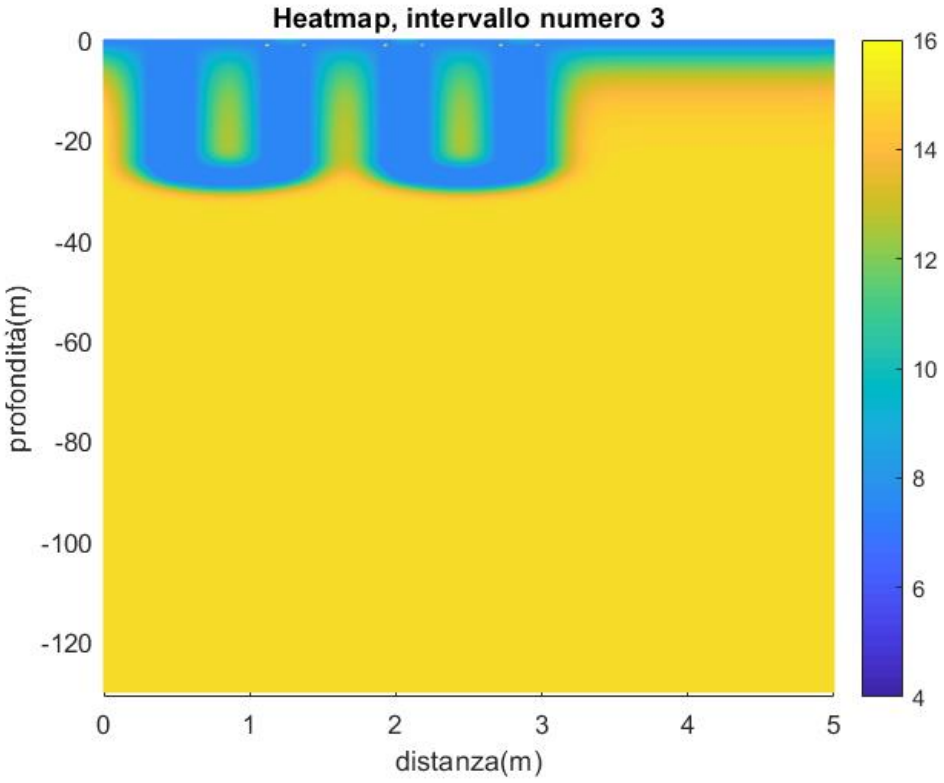


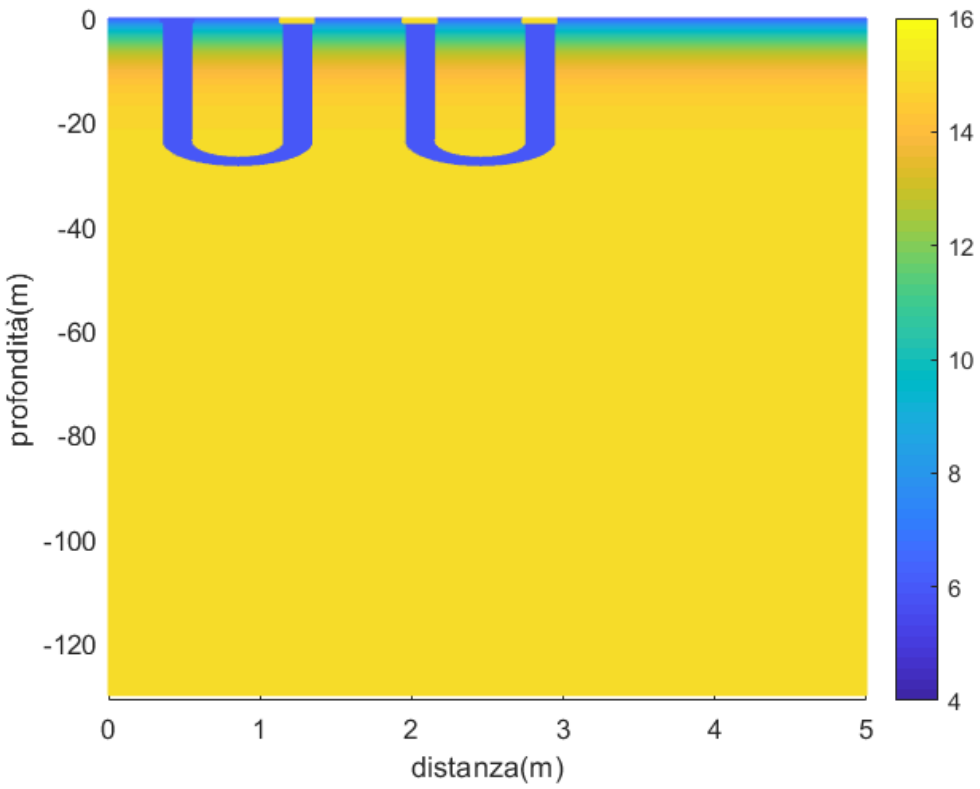

Temperatura di uscita
6.35
6.3
6.25
6.2
6.15
6.1
6.05
6
T [°C]
0
500
1000
1500
tempo (u.a.)


0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
distanza(m)
0
1
2
3
4
5
distanza(m)
8
7.5
7
6.5
6
5.5
5

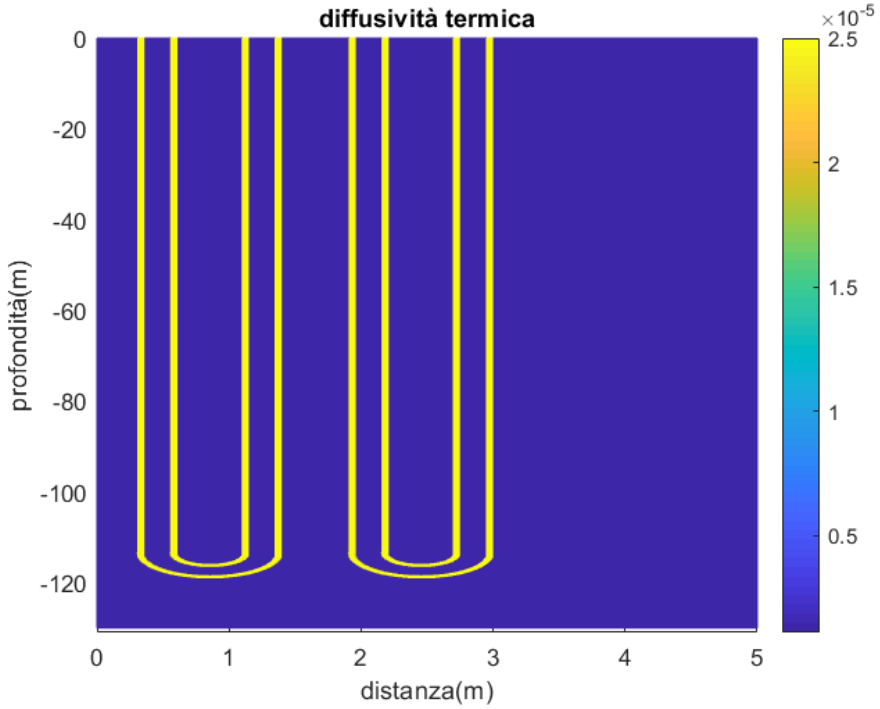
I seguenti grafici riportano i risultati relativi alle sonde verticali accoppiate di lunghezza 30 metri e diametro $D_1 = 20$ mm

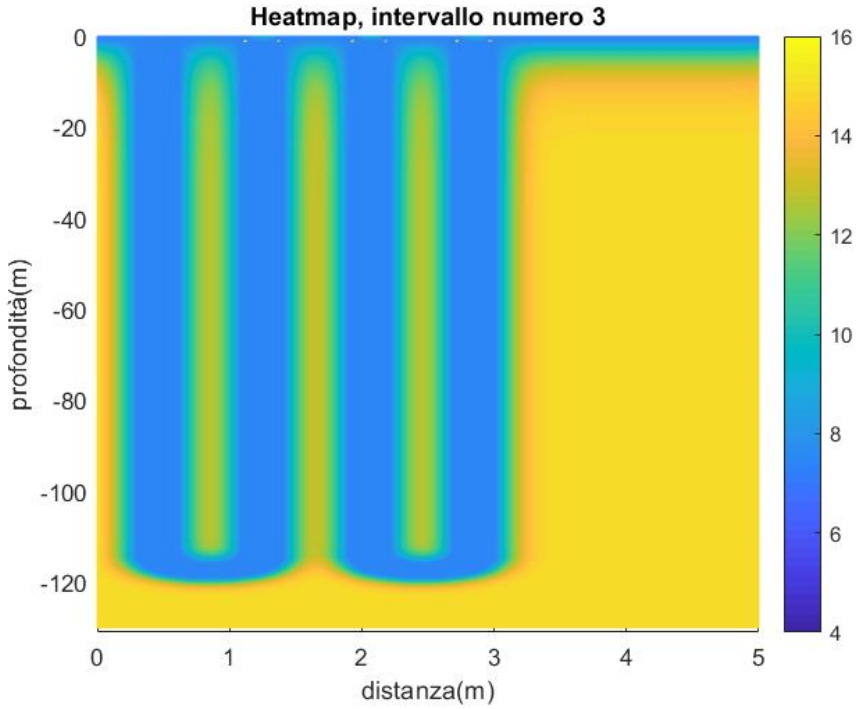


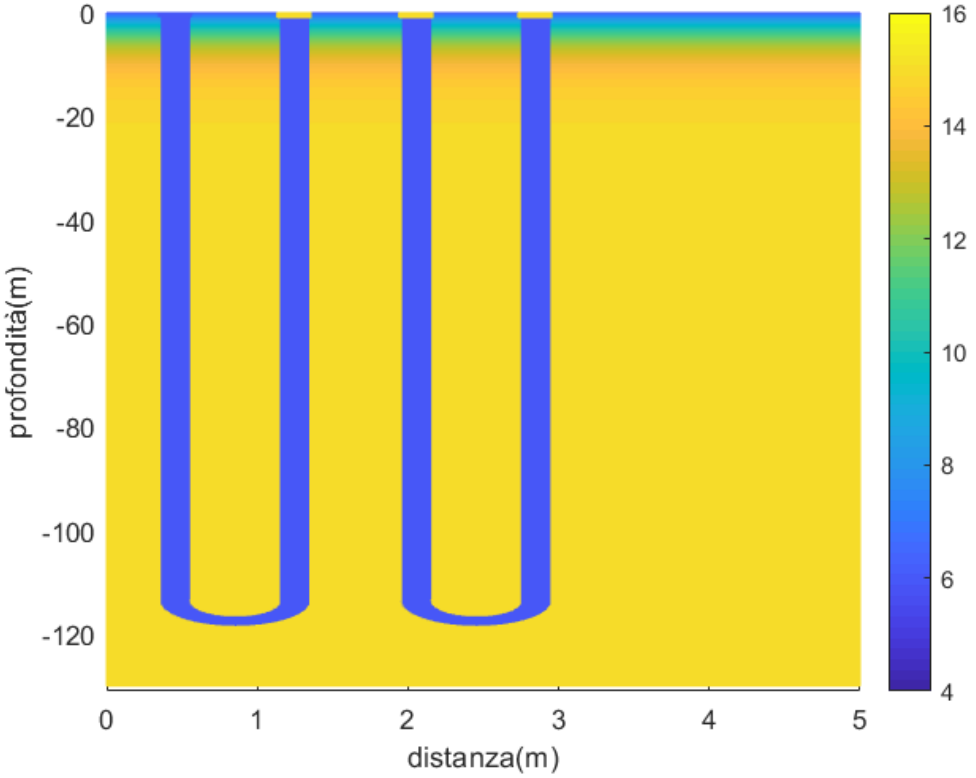



0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
profondità(m)
0
1
2
3
4
5
distanza(m)
16
14
12
10
8
6
4

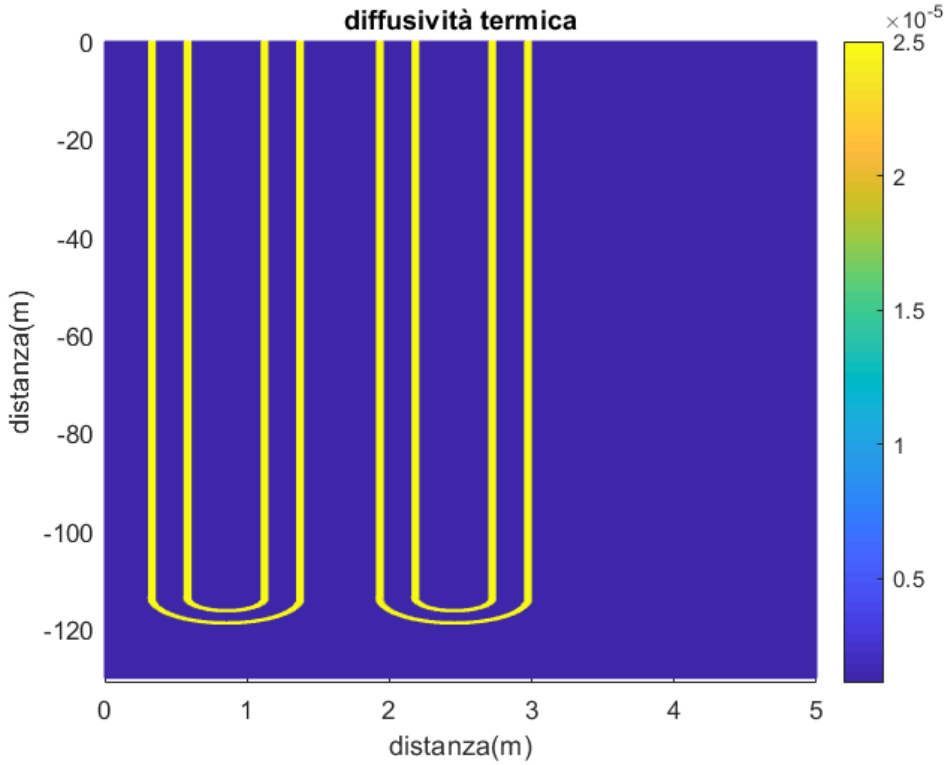
I seguenti grafici riportano i risultati relativi alle sonde verticali accoppiate di lunghezza 120 metri e diametro $D_1 = 20$ mm

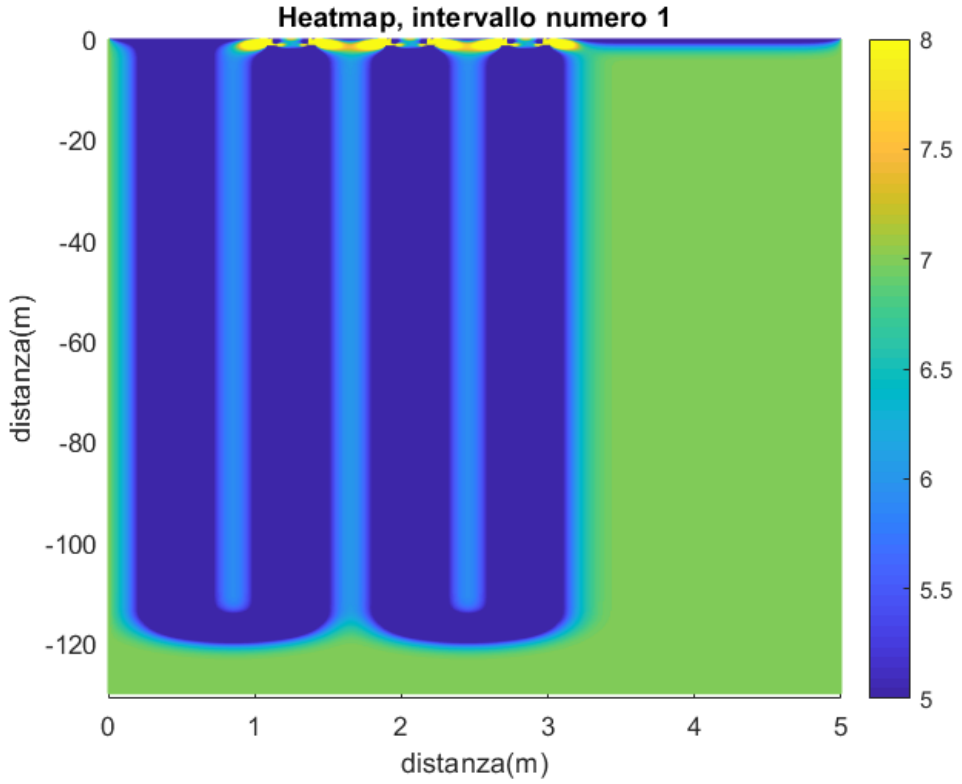


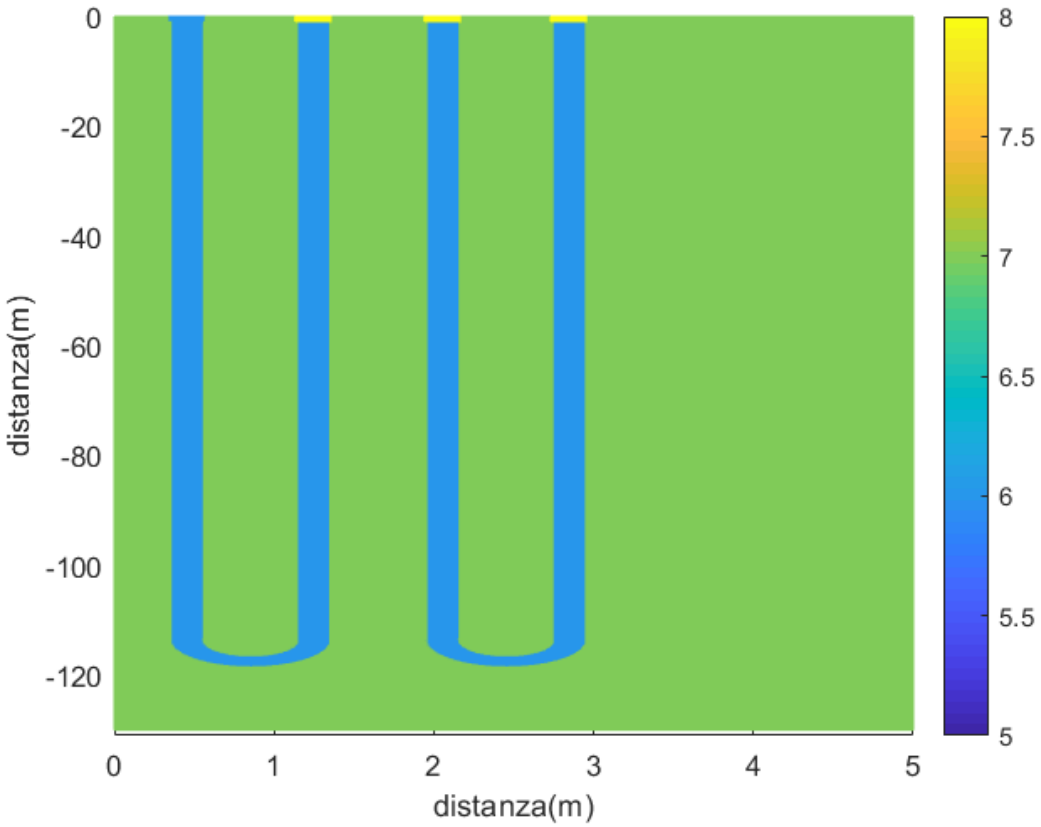



0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
profondità(m)
0
1
2
3
4
5
distanza(m)
16
14
12
10
8
6
4

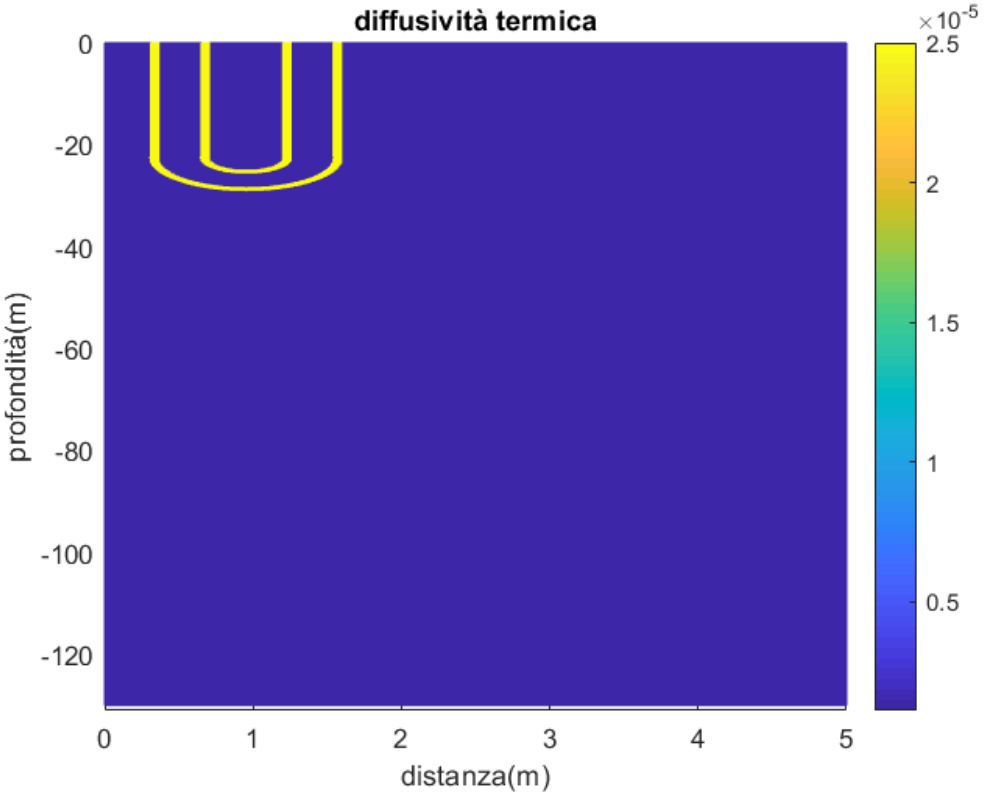
I seguenti grafici riportano i risultati relativi alle sonde orizzontali accoppiate di lunghezza 120 metri e diametro $D_1 = 20$ mm

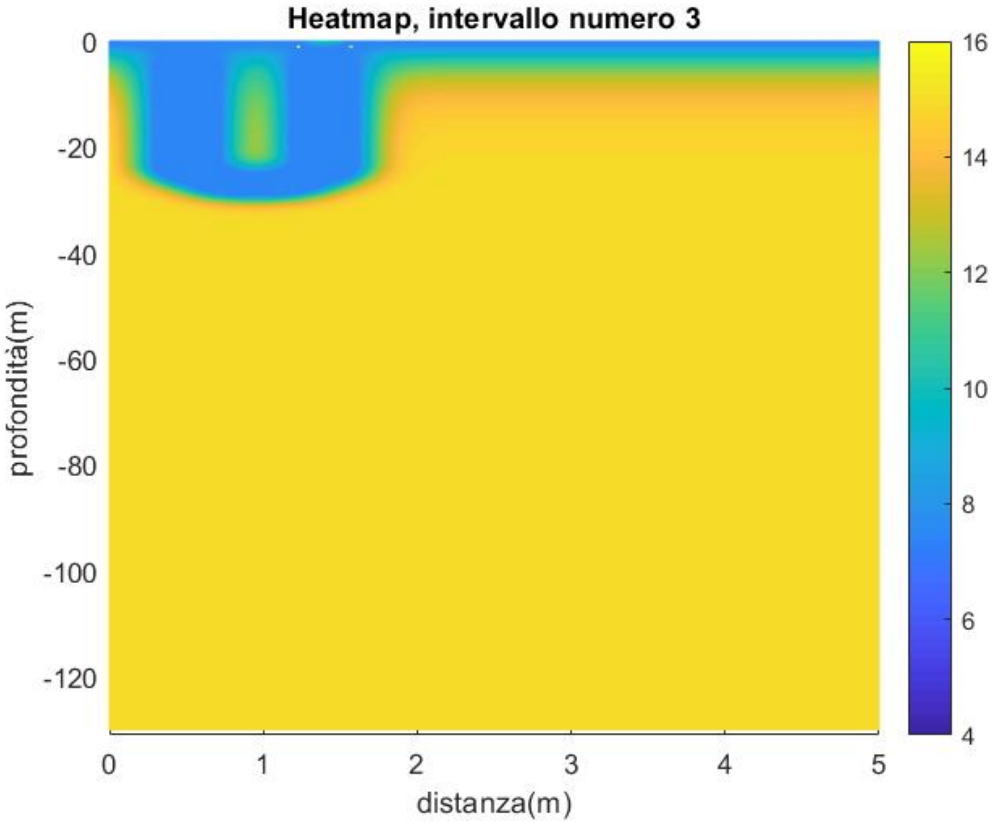


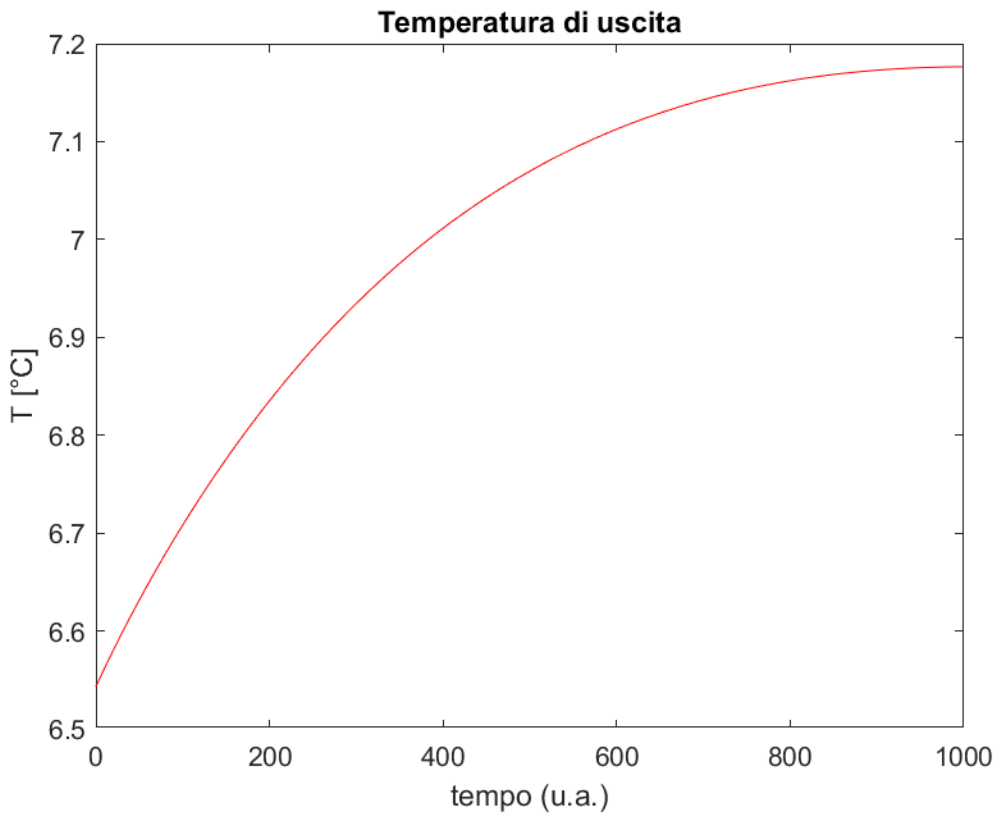


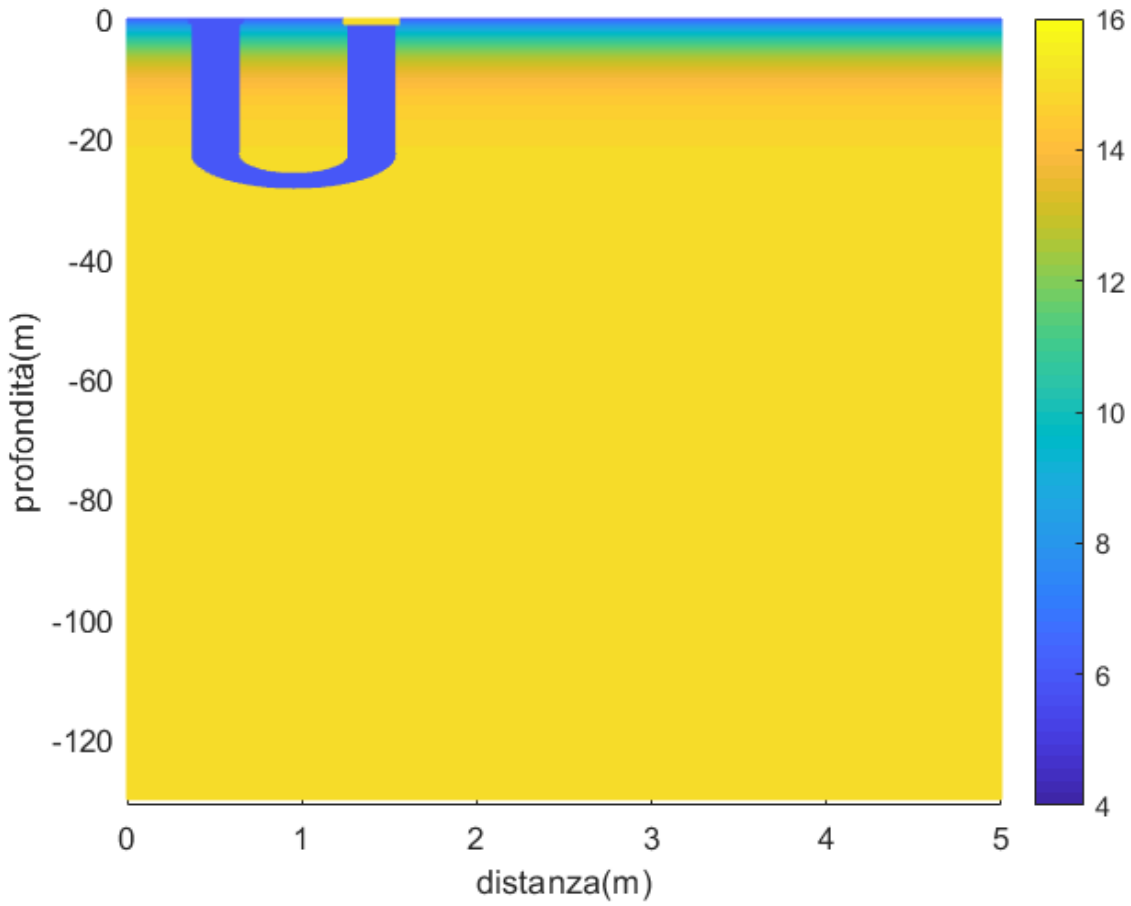

0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
distanza(m)
0
1
2
3
4
5
distanza(m)
8
7.5
7
6.5
6
5.5
5

I seguenti grafici riportano i risultati relativi alla sonda verticale di lunghezza 30 metri e diametro $D_2 = 40$ mm

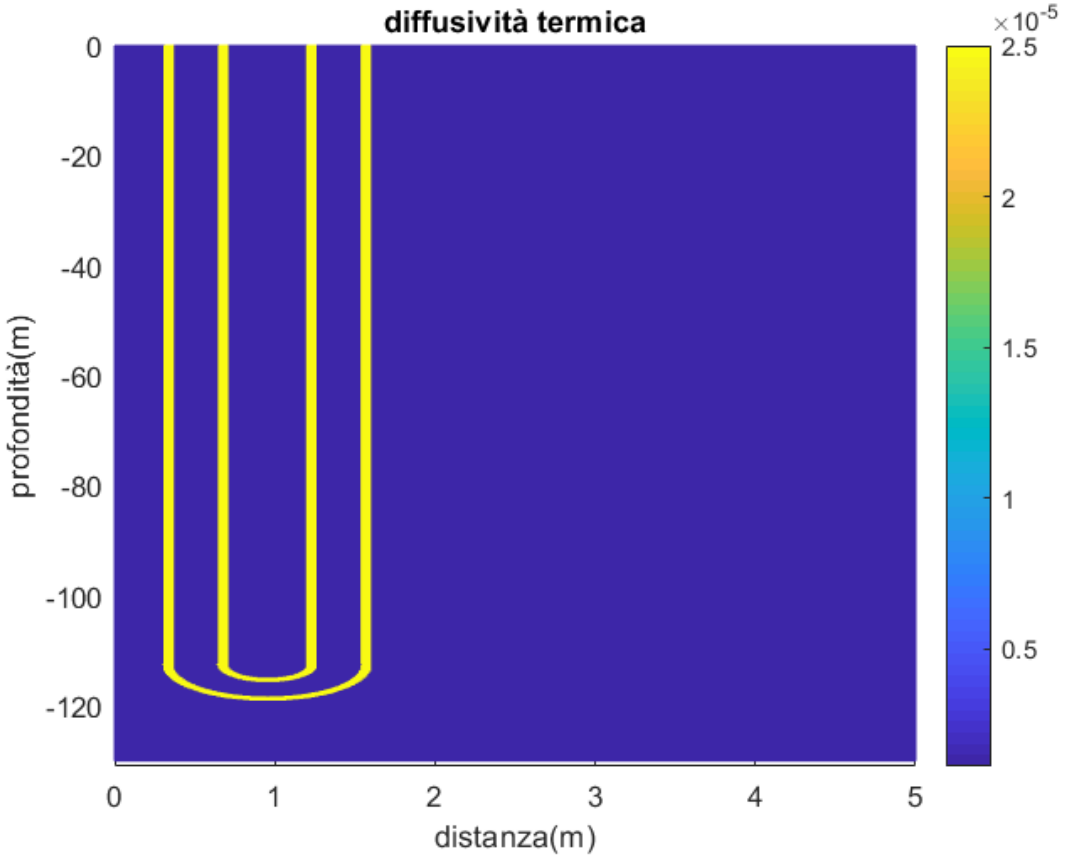


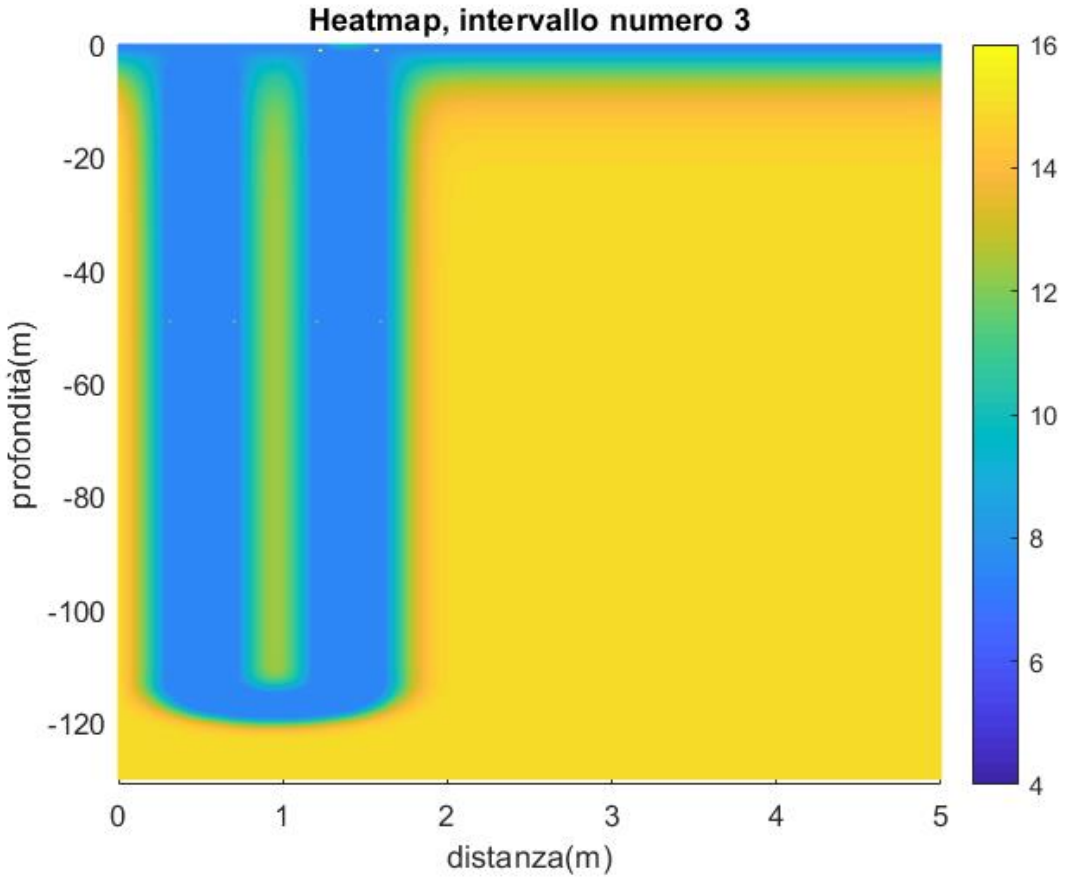


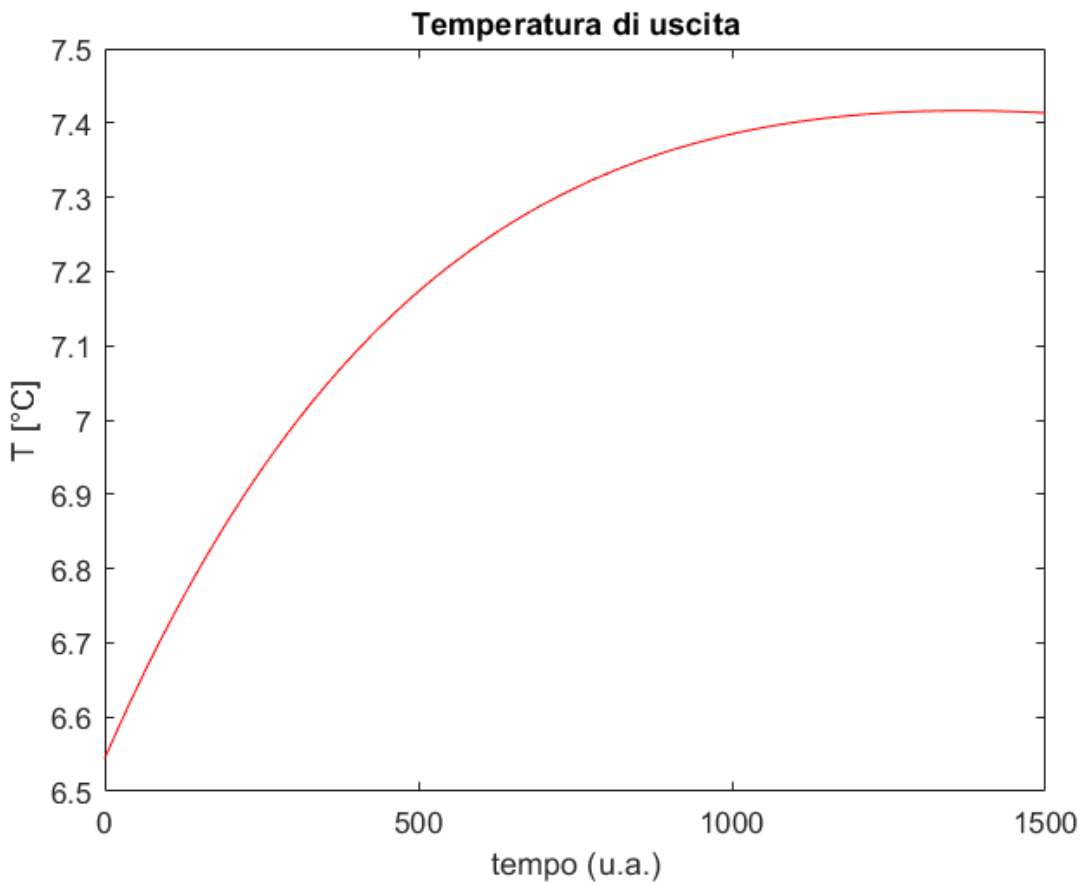

Temperatura di uscita
T [°C]
7.2
7.1
7
6.9
6.8
6.7
6.6
6.5
0
200
400
600
800
1000
tempo (u.a.)

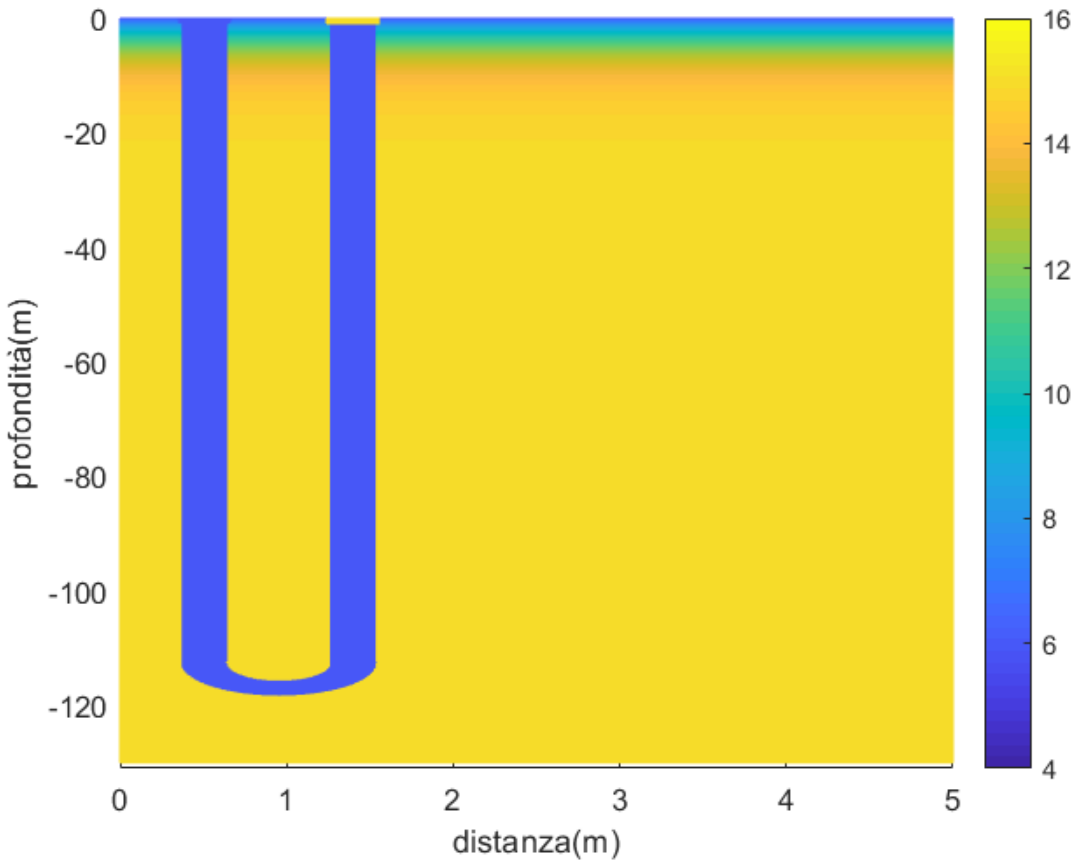

profondità(m)
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
0
1
2
3
4
5
distanza(m)
16
14
12
10
8
6
4

I seguenti grafici riportano i risultati relativi alla sonda verticale di lunghezza 120 metri e diametro $D_2 = 40$ mm

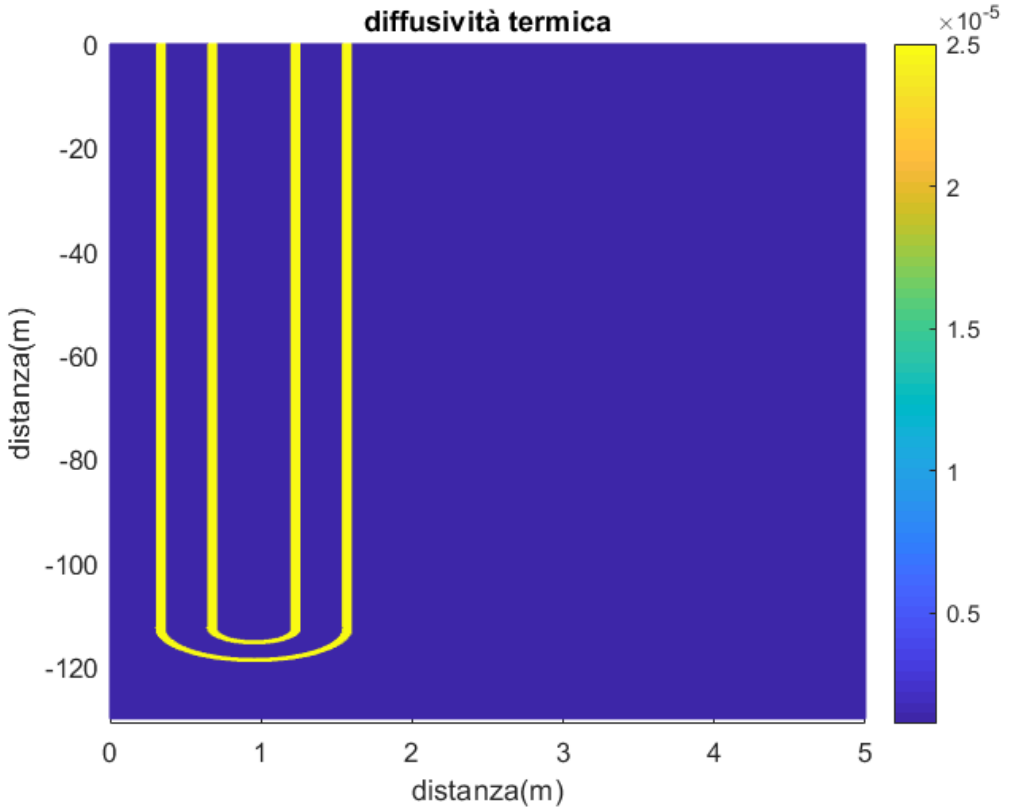


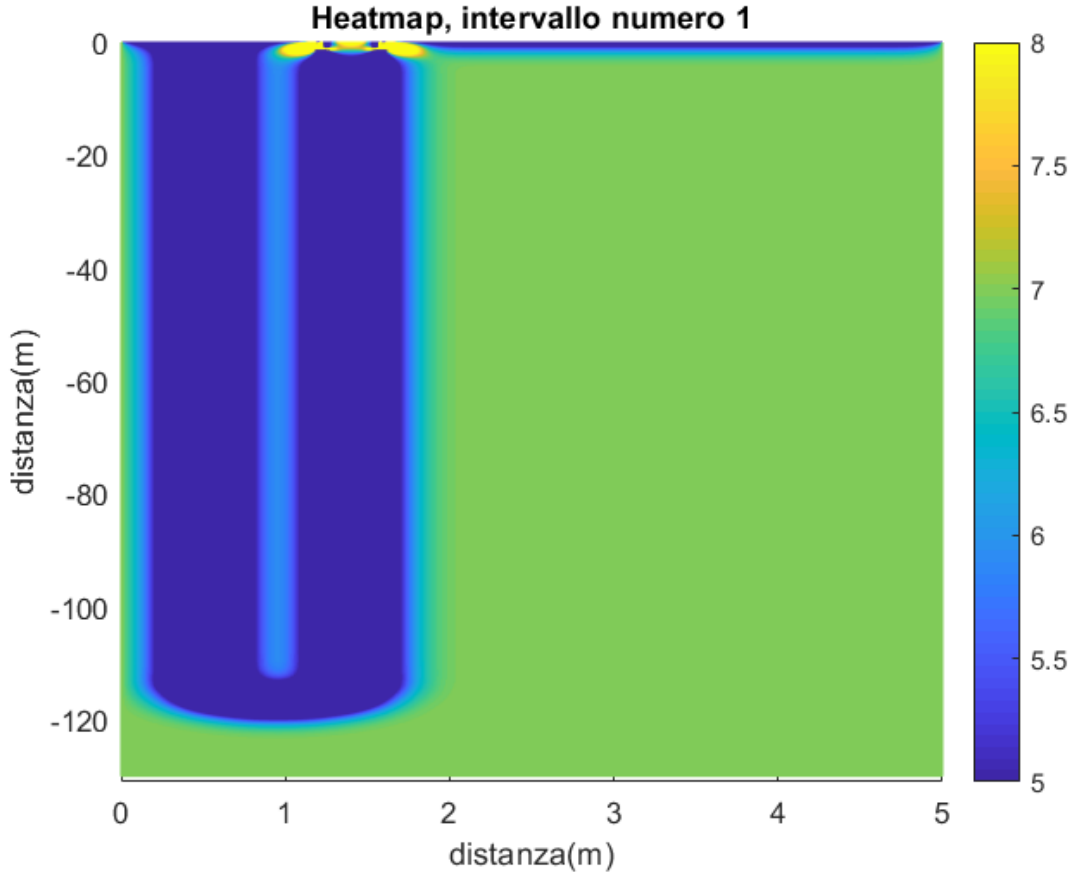


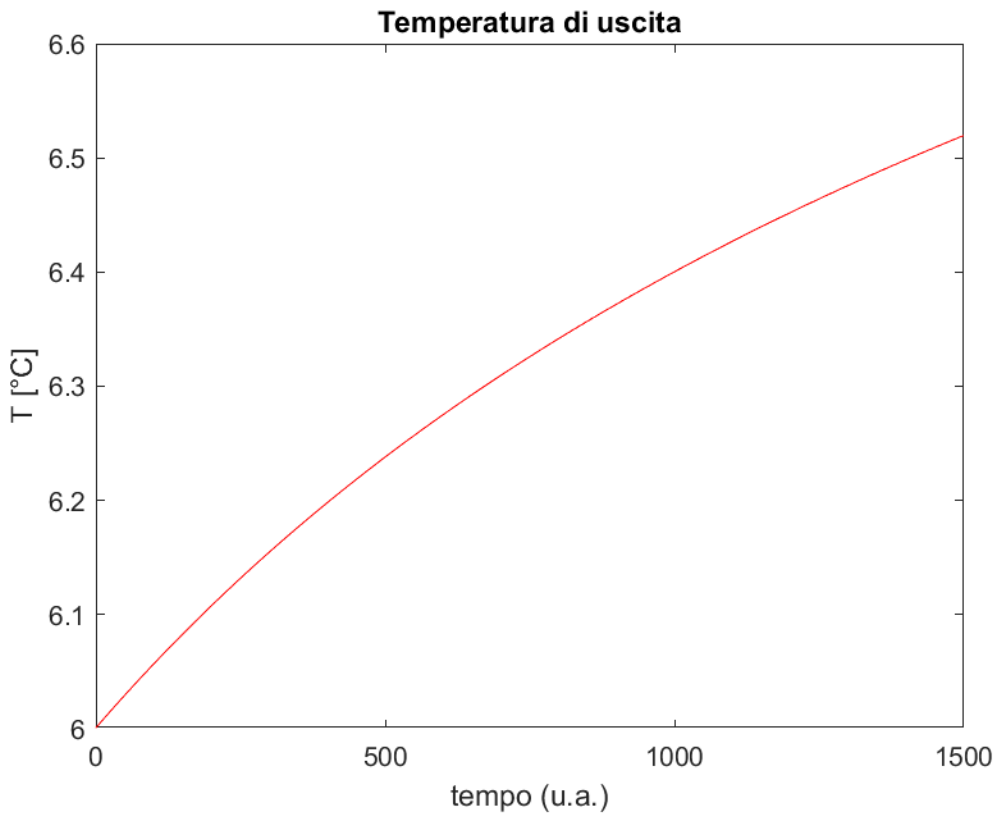

Temperatura di uscita
T [°C]
7.5
7.4
7.3
7.2
7.1
7
6.9
6.8
6.7
6.6
6.5
0
500
1000
1500
tempo (u.a.)

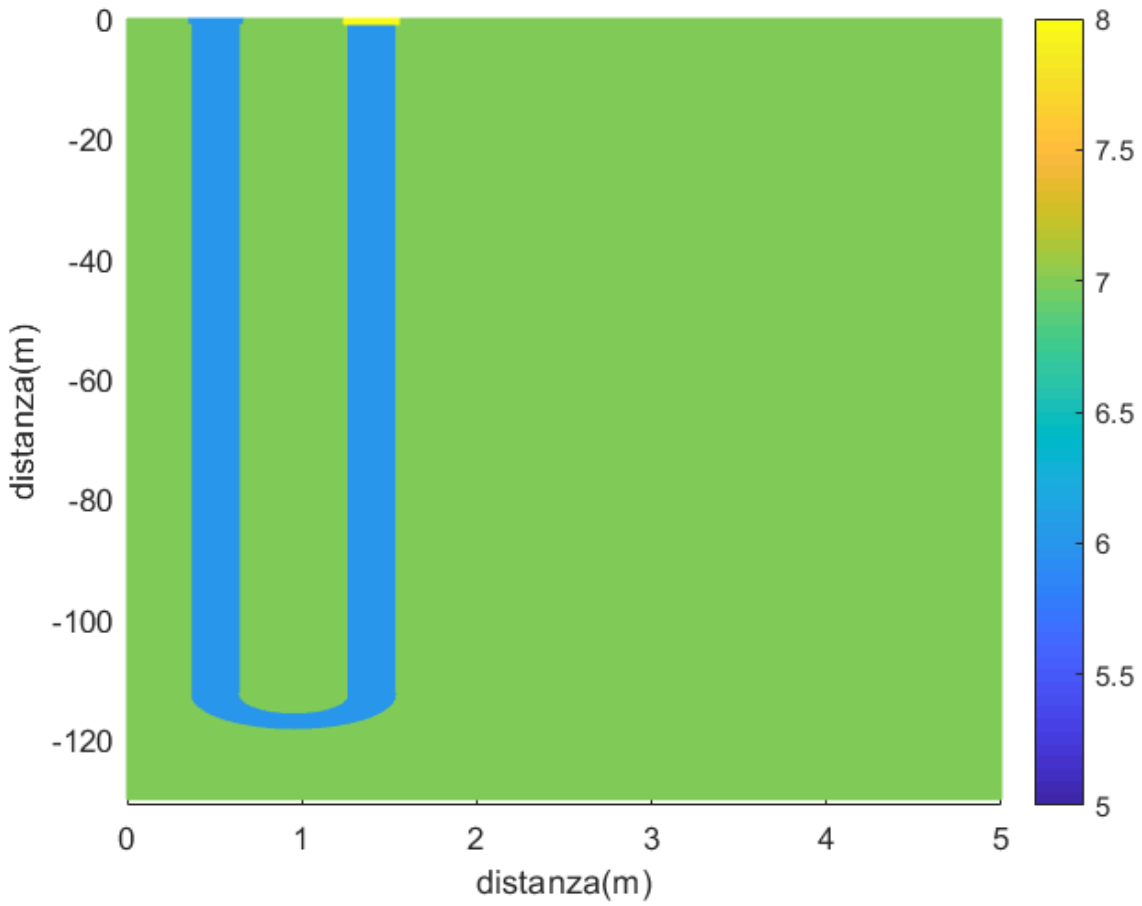

profondità(m)
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
0
1
2
3
4
5
distanza(m)
16
14
12
10
8
6
4

I seguenti grafici riportano i risultati relativi alla sonda orizzontale di lunghezza 120 metri e diametro $D_2 = 40$ mm

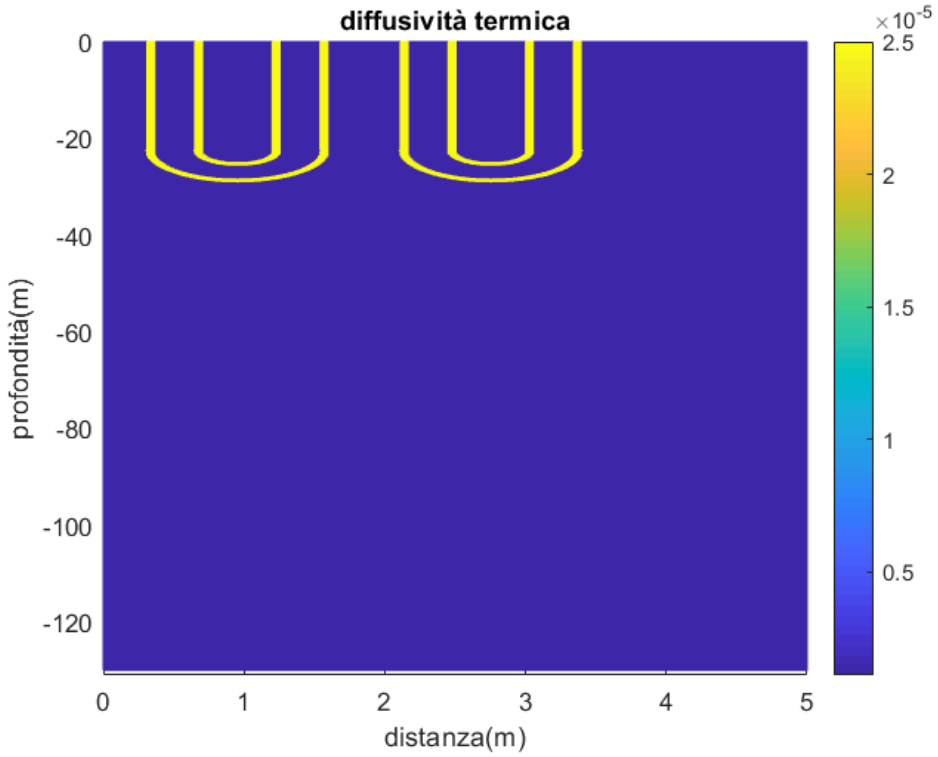


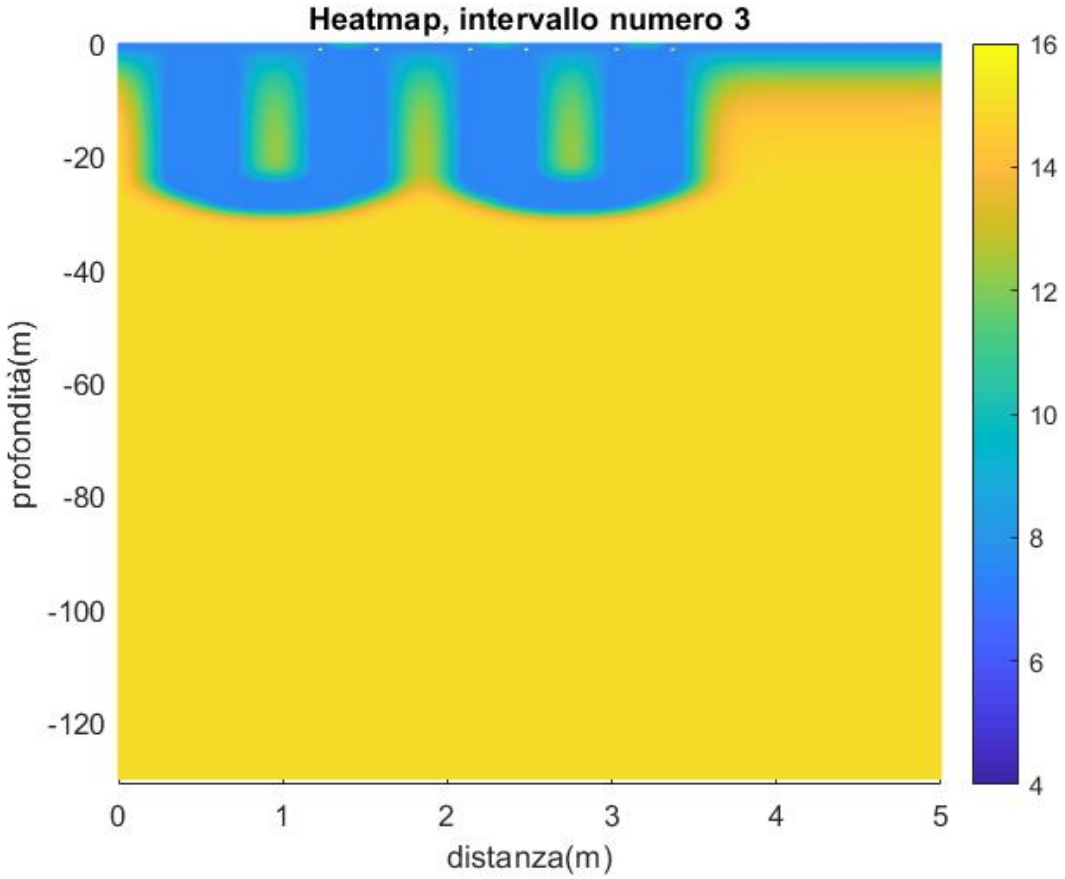


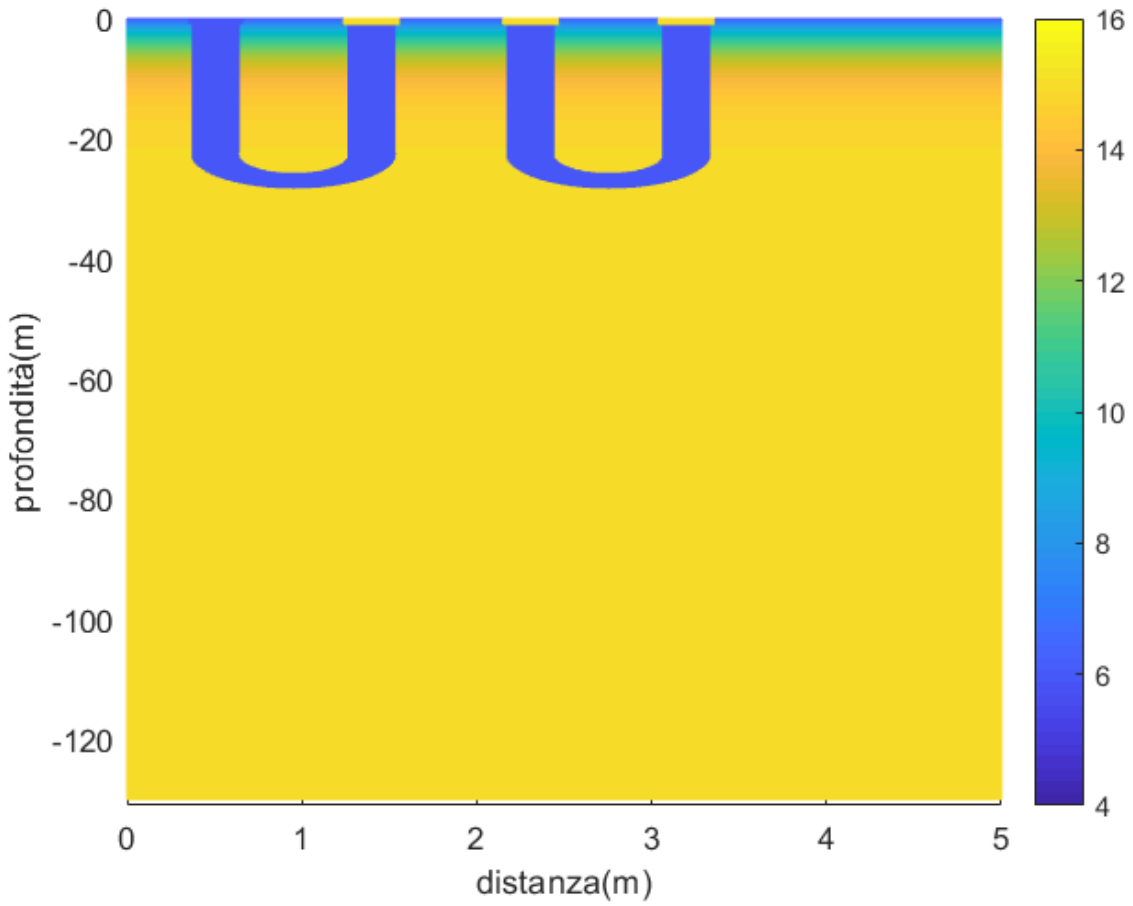

Temperatura di uscita
6.6
6.5
6.4
6.3
6.2
6.1
6
T [°C]
0
500
1000
1500
tempo (u.a.)


0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
distanza(m)
0
1
2
3
4
5
distanza(m)
8
7.5
7
6.5
6
5.5
5

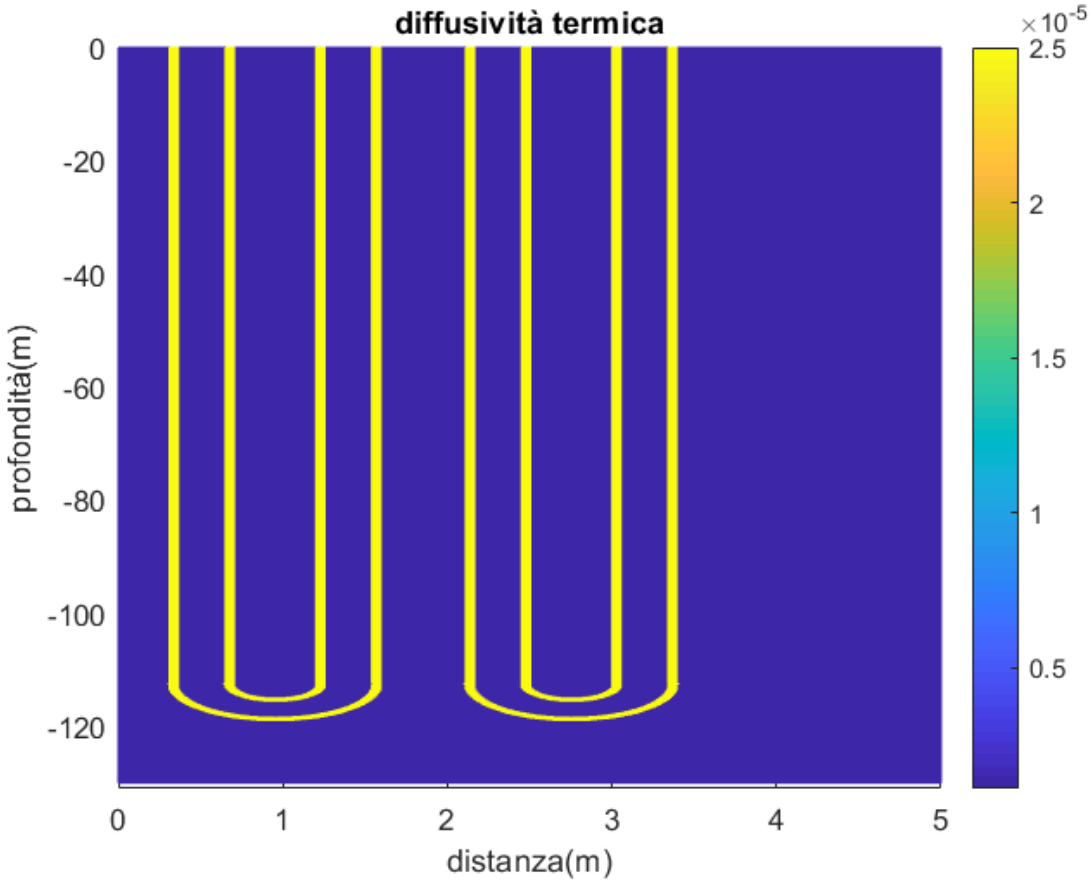
I seguenti grafici riportano i risultati relativi alle sonde verticali accoppiate di lunghezza 30 metri e diametro $D_2 = 40$ mm

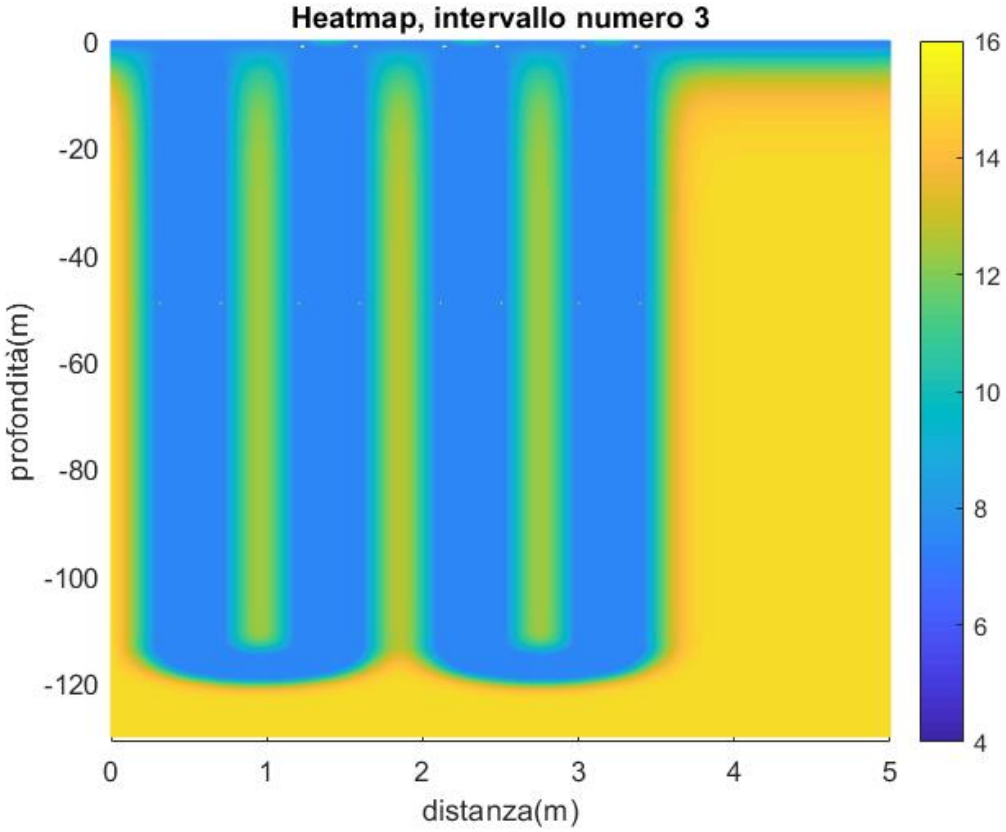


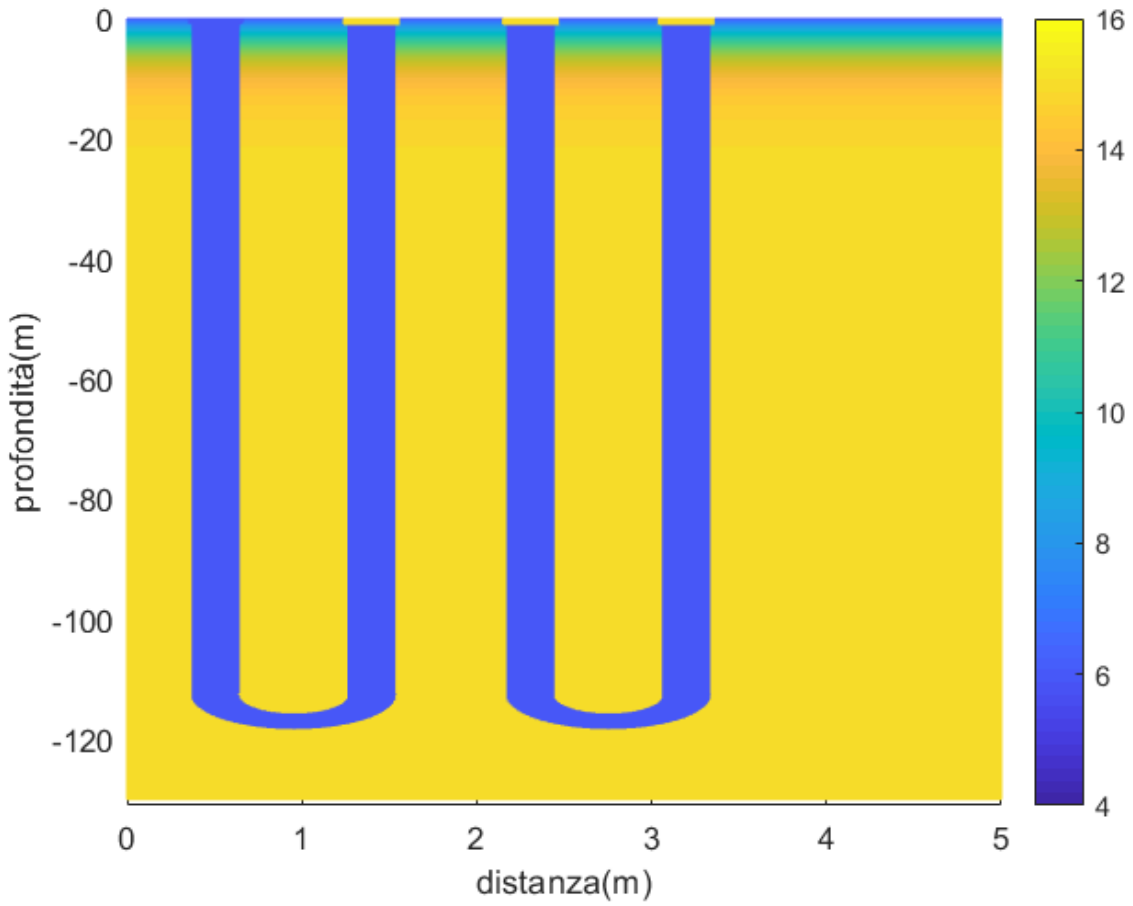



0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
profondità(m)
0
1
2
3
4
5
distanza(m)
16
14
12
10
8
6
4

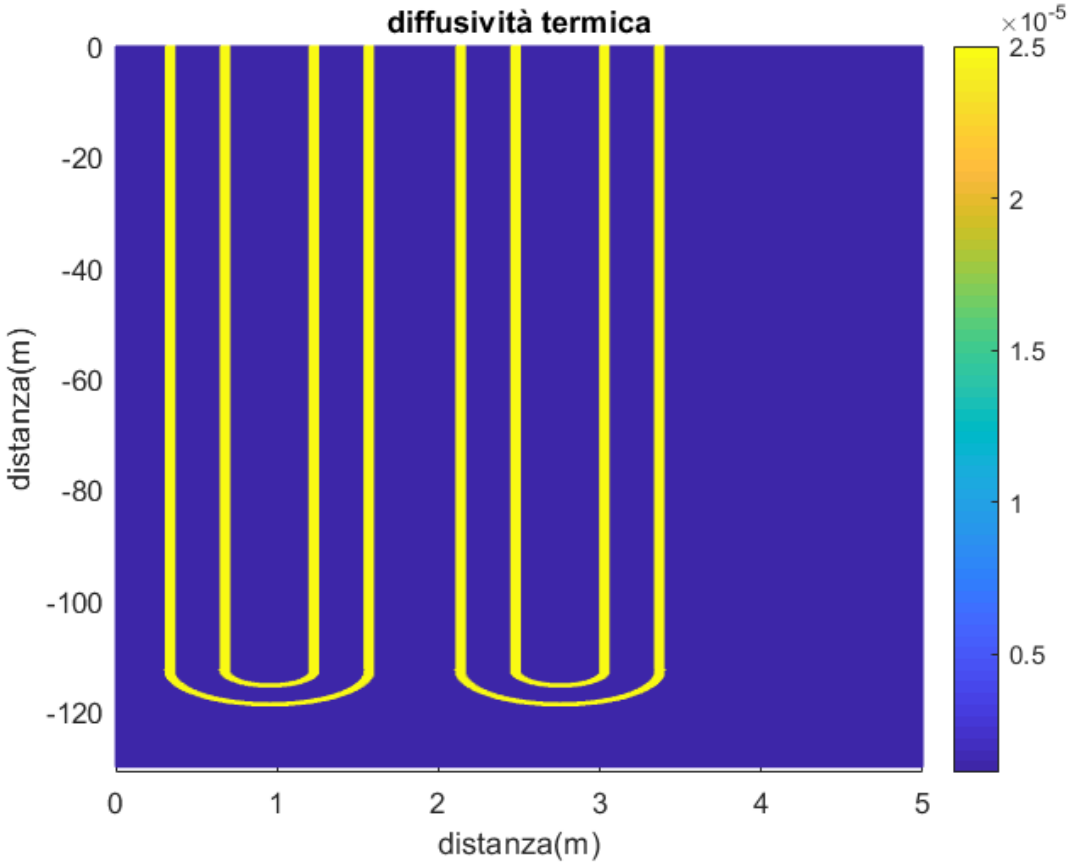
I seguenti grafici riportano i risultati relativi alle sonde verticali accoppiate di lunghezza 120 metri e diametro $D_2 = 40$ mm

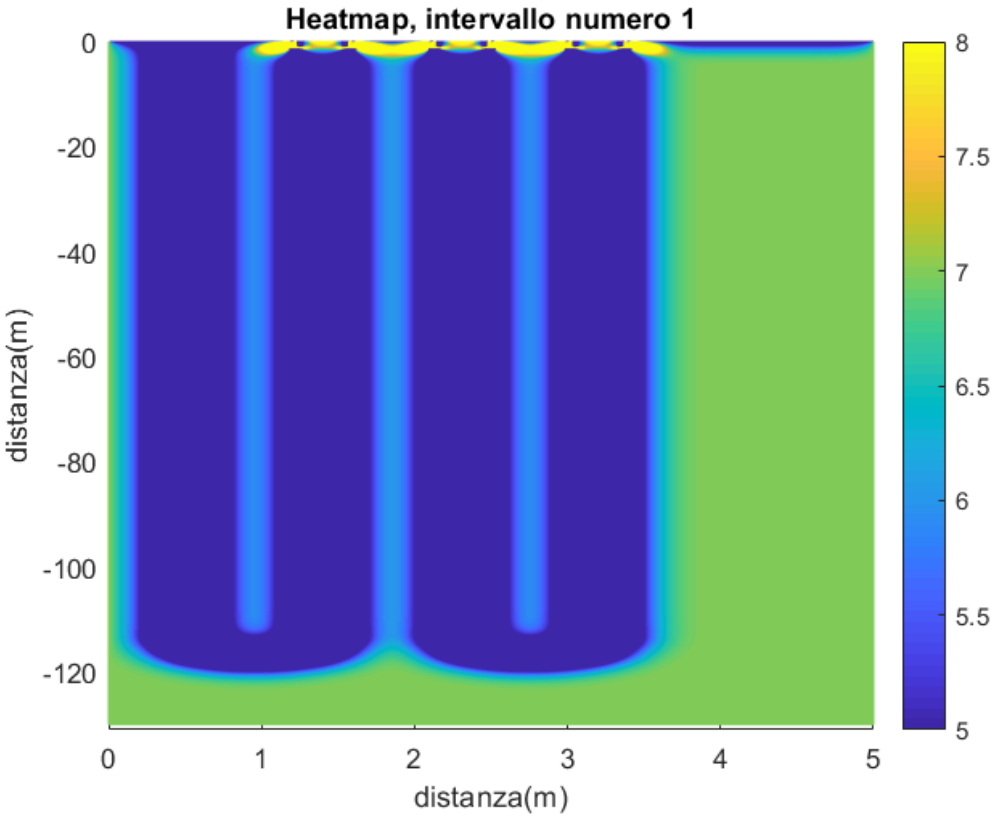


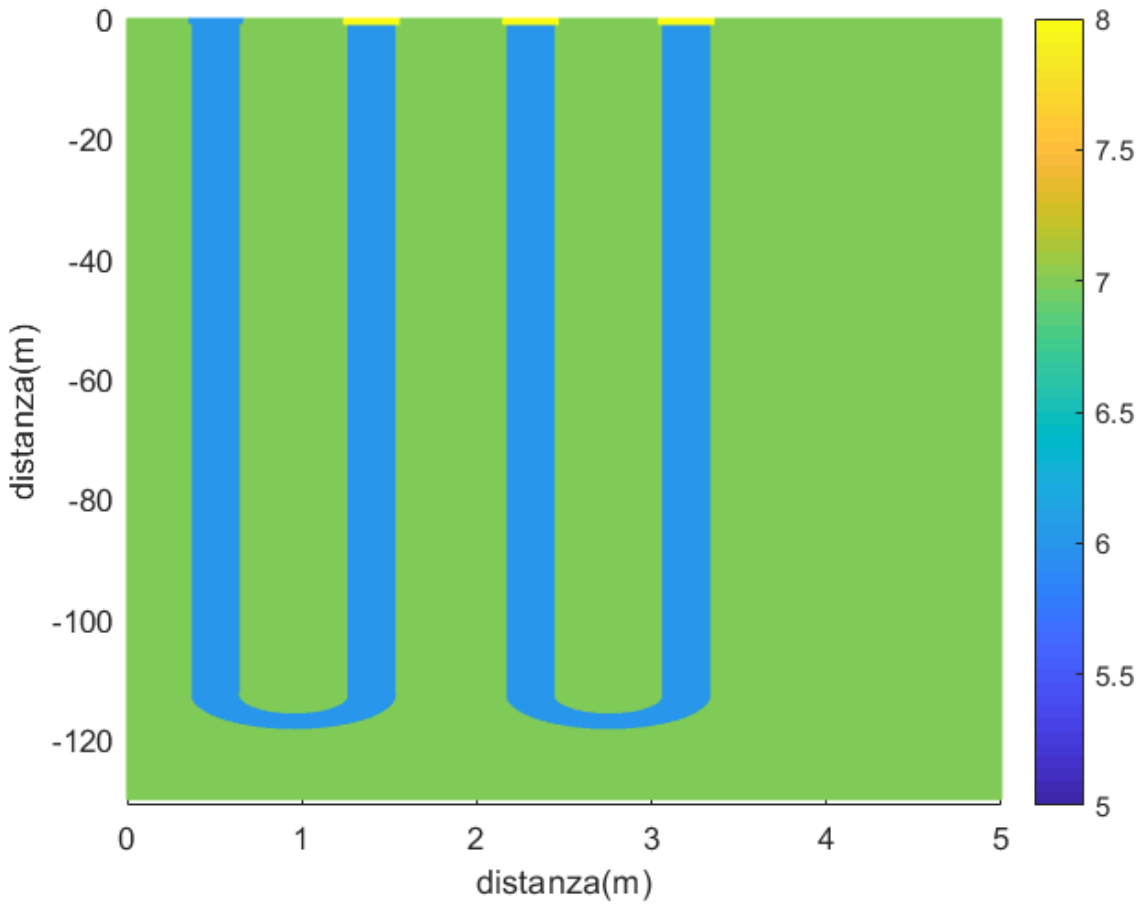



0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
profondità(m)
0
1
2
3
4
5
distanza(m)
16
14
12
10
8
6
4

I seguenti grafici riportano i risultati relativi alle sonde orizzontali accoppiate di lunghezza 30 metri e diametro $D_2 = 40$ mm






0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
distanza(m)
0
1
2
3
4
5
distanza(m)
8
7.5
7
6.5
6
5.5
5

Si può notare come il sistema con sonda da 120 metri raggiunga una temperatura maggiore in minor tempo rispetto agli altri due casi, fornendo una quantità di energia termica maggiore, anche se il sistema con sonda da 30 metri fornisce buoni risultati. Il sistema con collettori orizzontali invece ha un'efficienza peggiore, fornendo circa la metà del flusso termico delle sonde verticali.

Per quanto riguardo il sistema con sonde accoppiate, dalle heatmap si nota che le due sonde verticali non interagiscono in maniera significativa tra loro, mentre le sonde orizzontali presentano una leggera interferenza.

Avendo utilizzato due diametri diversi, si avranno velocità diverse dentro le tubazioni. Dai grafici risulta una differenza di temperature tra stessi casi con diametri diversi, tuttavia si tratta di una differenza poco significativa. Il caso con il diametro inferiore risulta termodinamicamente avvantaggiato, ma richiederà un maggior lavoro alle pompe, che avranno da vincere maggiori perdite di carico.
Per questo motivo sono state calcolate le perdite di carico distribuite (le concentrate sono state trascurate perché si stanno confrontando due sistemi uguali).

6.2 Perdite di carico

Tramite il manuale della caleffi sono stati calcolati il numero di Reynolds e le perdite di carico distribuite in funzione dei diametri commerciali. Sono stati presi in esame due casi, scegliendo due portate diverse.

Q	0,00018	m^3/s
Q	0,18	l/s
ν	0,000001004	m^2/s
ρ	999,7	kg/m^3
η	0,75	
Acqua a 10°		

Figura 34. Dati del fluido

D_e [mm]	s [mm]	D_i [mm]	A [m^2]	v [m/s]	Re	Moto	J[m/100mca]	Potenza [W]
450	40,9	368,2	0,106	1,690E-03	6,200E+02	Laminare	0,0000018	0,0000043
400	36,3	327,4	0,084	2,138E-03	6,972E+02	Laminare	0,0000033	0,0000077
355	32,2	290,6	0,066	2,714E-03	7,855E+02	Laminare	0,0000058	0,0000137
315	28,6	257,8	0,052	3,448E-03	8,855E+02	Laminare	0,0000104	0,0000246
280	25,4	229,2	0,041	4,363E-03	9,959E+02	Laminare	0,0000185	0,0000435
250	22,7	204,6	0,033	5,475E-03	1,116E+03	Laminare	0,0000321	0,0000755
225	20,5	184	0,027	6,769E-03	1,241E+03	Laminare	0,0000537	0,0001265
200	18,2	163,6	0,021	8,563E-03	1,395E+03	Laminare	0,0000951	0,0002239
180	16,4	147,2	0,017	1,058E-02	1,551E+03	Laminare	0,0001589	0,0003741
160	14,6	130,8	0,013	1,340E-02	1,745E+03	Laminare	0,0002822	0,0006642
140	12,7	114,6	0,010	1,745E-02	1,992E+03	Laminare	0,0005366	0,0012629
125	11,4	102,2	0,008	2,194E-02	2,234E+03	Laminare	0,0009361	0,0022033
110	10	90	0,006	2,829E-02	2,536E+03	Transizione	0,0017364	0,0040869
90	8,2	73,6	0,004	4,231E-02	3,101E+03	Transizione	0,0046157	0,0108640

75	6,8	61,4	0,003	6,079E-02	3,718E+03	Transizione	0,0111369	0,0262129
63	5,8	51,4	0,002	8,675E-02	4,441E+03	Turbolento	0,0264231	0,0621918
50	4,6	40,8	0,001	1,377E-01	5,595E+03	Turbolento	0,0811813	0,1910758
40	3,7	32,6	0,001	2,156E-01	7,002E+03	Turbolento	0,2415609	0,5685603
32	3	26	0,001	3,390E-01	8,780E+03	Turbolento	0,7252599	1,7070396
25	2,3	20,4	0,000	5,507E-01	1,119E+04	Turbolento	2,3575533	5,5489583
20	2	16	0,000	8,952E-01	1,427E+04	Turbolento	7,6778746	18,0713650

Figura 35. Perdite di Carico

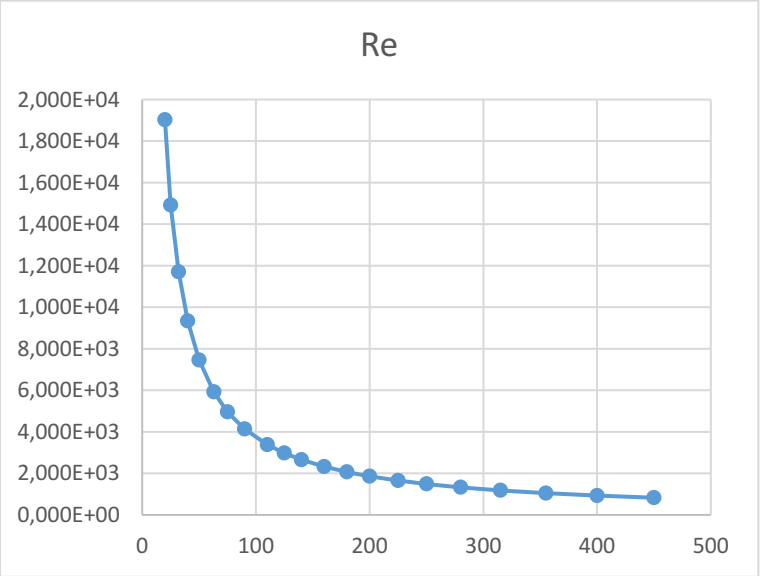


Figura 36. Andamento numero di Reynolds in funzione del diametro

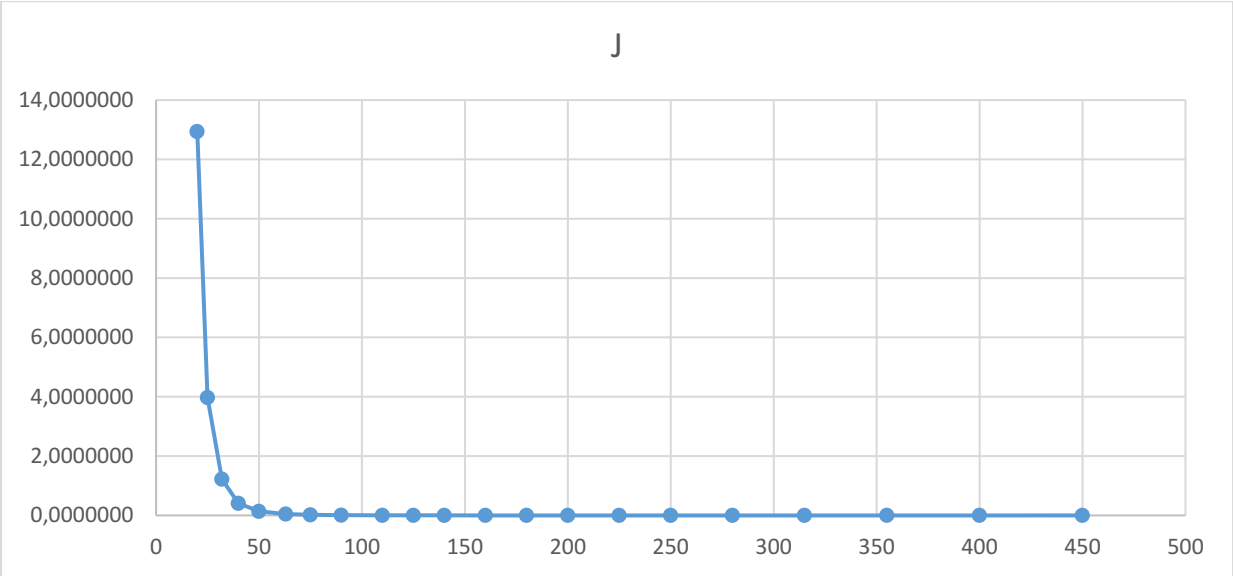


Figura 37. Andamento perdite di carico J in funzione del diametro

Q	0,00024	m^3/s
Q	0,24	l/s
ν	0,000001004	m^2/s
ρ	999,7	kg/m^3
η	0,75	
Acqua a 10°		

Figura 38. Dati del fluido

D_e [mm]	s [mm]	D_i [mm]	A [m^2]	v [m/s]	Re	Moto	J[m/100mca]	Potenza [W]
450	40,9	368,2	0,1065	2,254E-03	8,266E+02	Laminare	0,0000031	0,0000098
400	36,3	327,4	0,0842	2,851E-03	9,296E+02	Laminare	0,0000055	0,0000173
355	32,2	290,6	0,0663	3,619E-03	1,047E+03	Laminare	0,0000098	0,0000308
315	28,6	257,8	0,0522	4,598E-03	1,181E+03	Laminare	0,0000176	0,0000552
280	25,4	229,2	0,0413	5,817E-03	1,328E+03	Laminare	0,0000311	0,0000977
250	22,7	204,6	0,0329	7,300E-03	1,488E+03	Laminare	0,0000541	0,0001697
225	20,5	184	0,0266	9,026E-03	1,654E+03	Laminare	0,0000906	0,0002842
200	18,2	163,6	0,0210	1,142E-02	1,860E+03	Laminare	0,0001603	0,0005031
180	16,4	147,2	0,0170	1,410E-02	2,068E+03	Laminare	0,0002679	0,0008406
160	14,6	130,8	0,0134	1,786E-02	2,327E+03	Laminare	0,0004756	0,0014925
140	12,7	114,6	0,0103	2,327E-02	2,656E+03	Transizione	0,0009043	0,0028378
125	11,4	102,2	0,0082	2,926E-02	2,978E+03	Transizione	0,0015776	0,0049509
110	10	90	0,0064	3,773E-02	3,382E+03	Transizione	0,0029262	0,0091833
90	8,2	73,6	0,0043	5,641E-02	4,135E+03	Turbolento	0,0077786	0,0244113
75	6,8	61,4	0,0030	8,106E-02	4,957E+03	Turbolento	0,0187685	0,0589004
63	5,8	51,4	0,0021	1,157E-01	5,921E+03	Turbolento	0,0445294	0,1397449
50	4,6	40,8	0,0013	1,836E-01	7,460E+03	Turbolento	0,1368106	0,4293468
40	3,7	32,6	0,0008	2,875E-01	9,336E+03	Turbolento	0,4070900	1,2775536
32	3	26	0,0005	4,520E-01	1,171E+04	Turbolento	1,2222429	3,8357138
25	2,3	20,4	0,0003	7,343E-01	1,492E+04	Turbolento	3,9730623	12,4684954
20	2	16	0,0002	1,194E+00	1,902E+04	Turbolento	12,9391239	40,6063122

Figura 39. Perdite di Carico

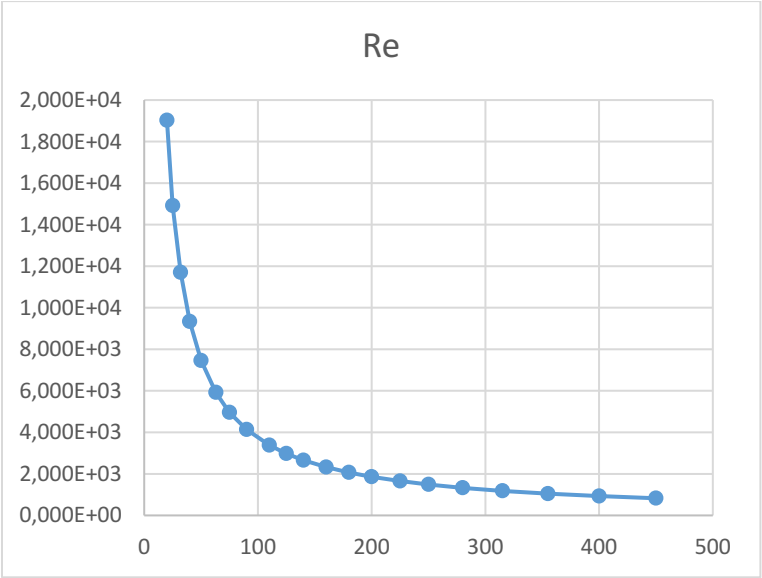


Figura 40. Andamento numero di Reynolds in funzione del diametro

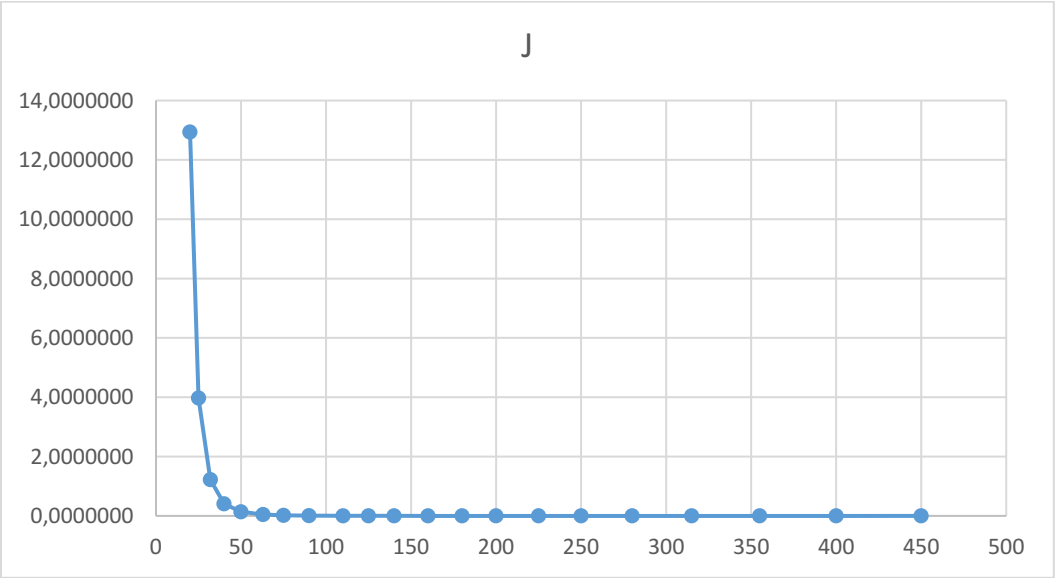


Figura 41. Andamento perdite di carico J in funzione del diametro

6.3 Simulazioni Energy Earth Designer

Sono state svolte anche delle simulazioni col software Energy Earth Designer sull'andamento della temperatura nel corso degli anni.
Sono stati analizzati le configurazioni con sonda verticale.
Rispettivamente i grafici riportano una sonda da 30 metri, una sonda da 120, due sonde da 30 metri, due sonde da 120, prima col diametro pari a 20 mm, poi col diametro pari a 40 mm.

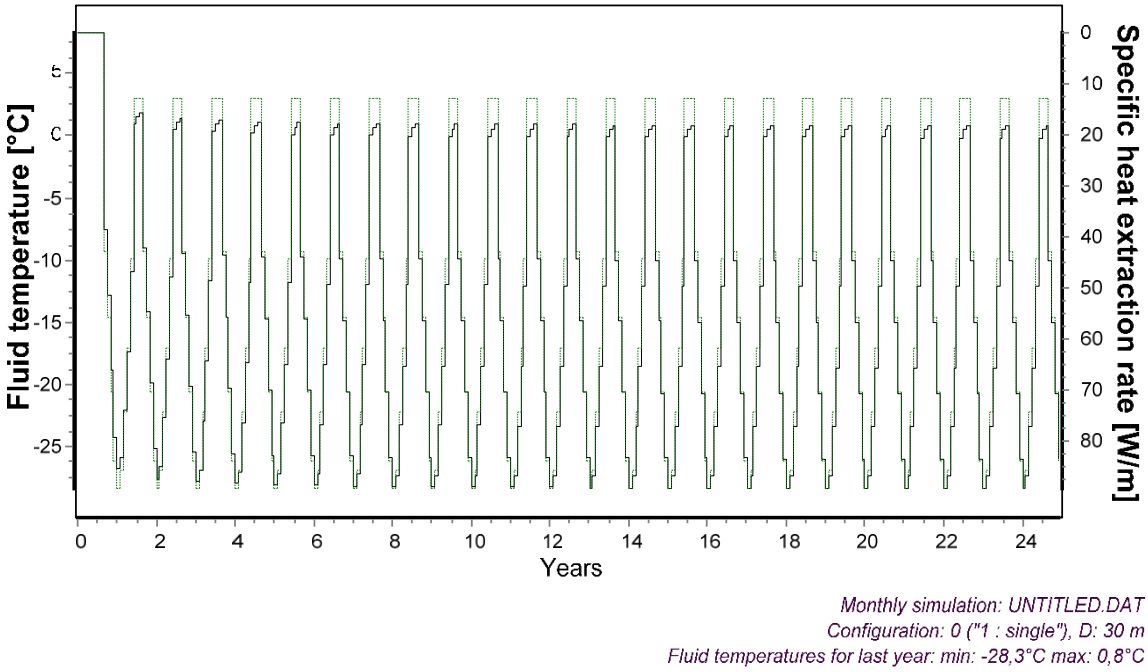
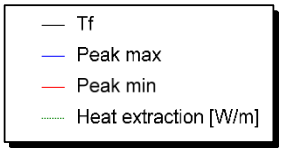


Figura 42. Andamento nel tempo sonda 30 metri, diametro 20 mm



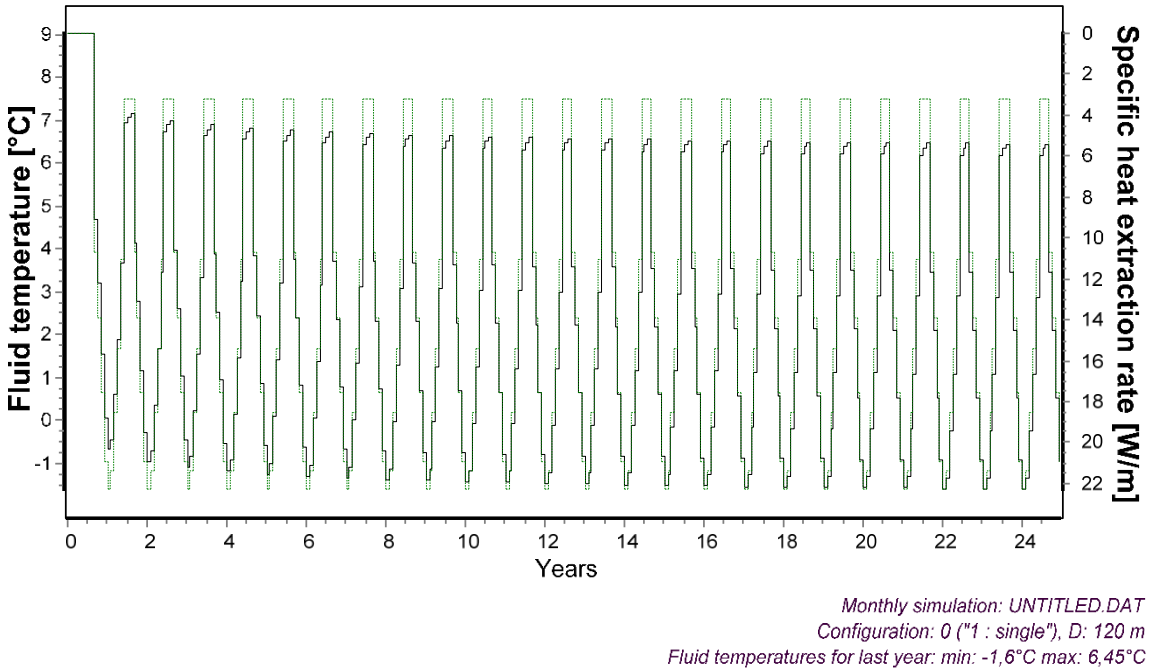
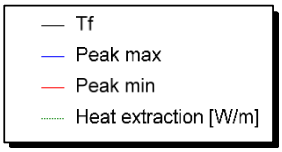


Figura 43. Andamento nel tempo sonda 120 metri, diametro 20 mm



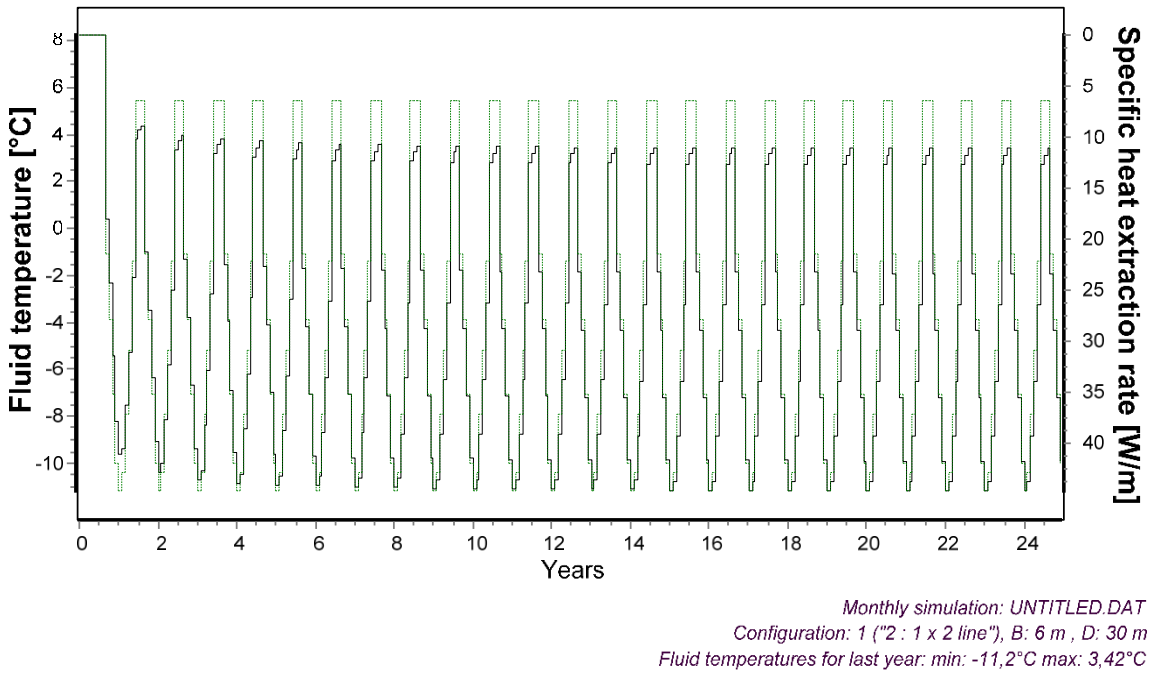
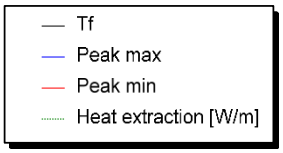


Figura 44. Andamento nel tempo due sonde 30 metri, diametro 20 mm



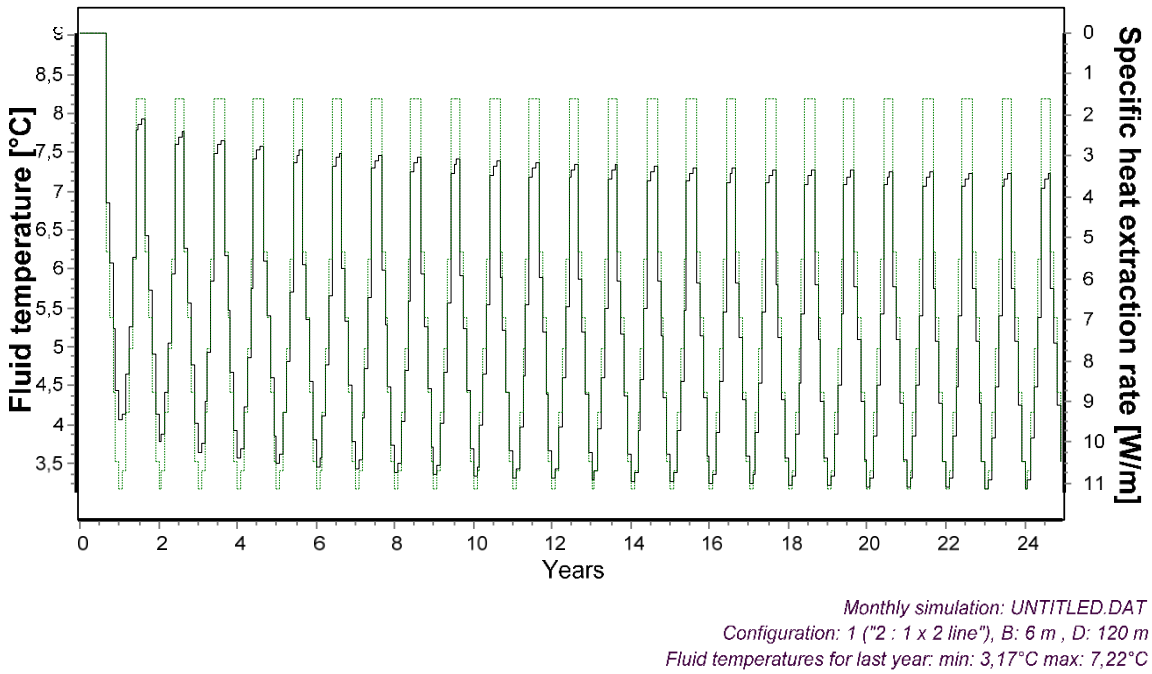
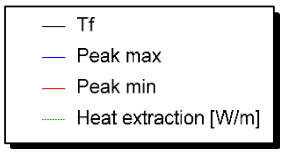


Figura 45. Andamento nel tempo due sonde 120 metri, diametro 20 mm



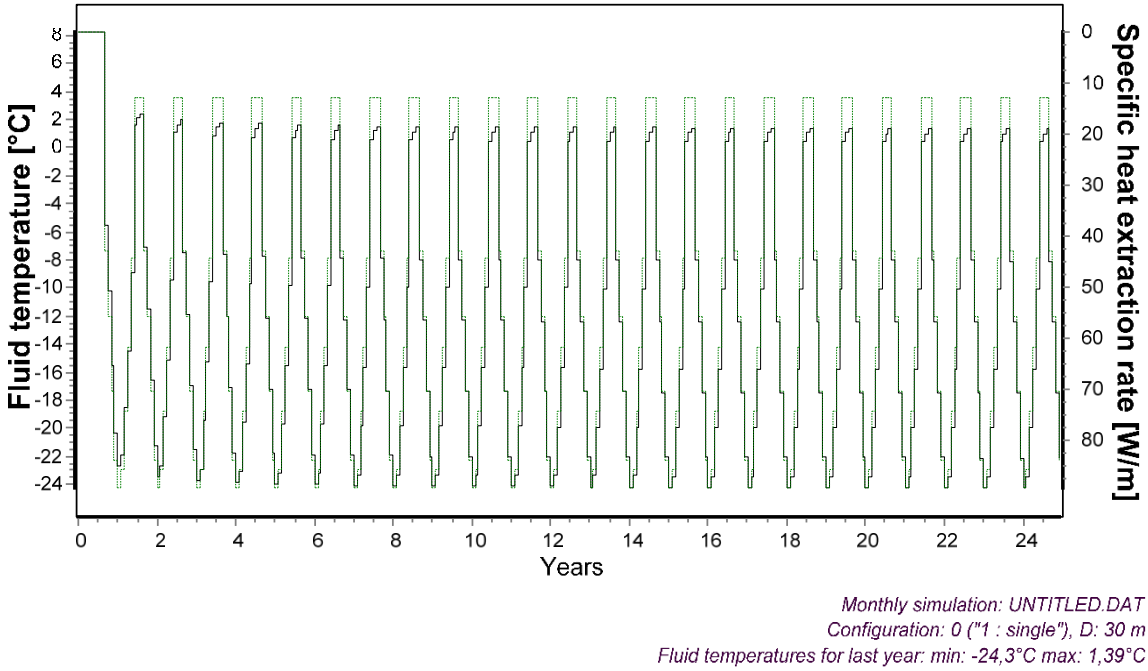
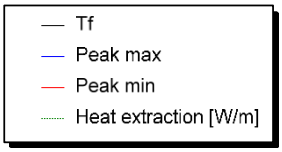


Figura 46. Andamento nel tempo sonda 30 metri, diametro 40 mm



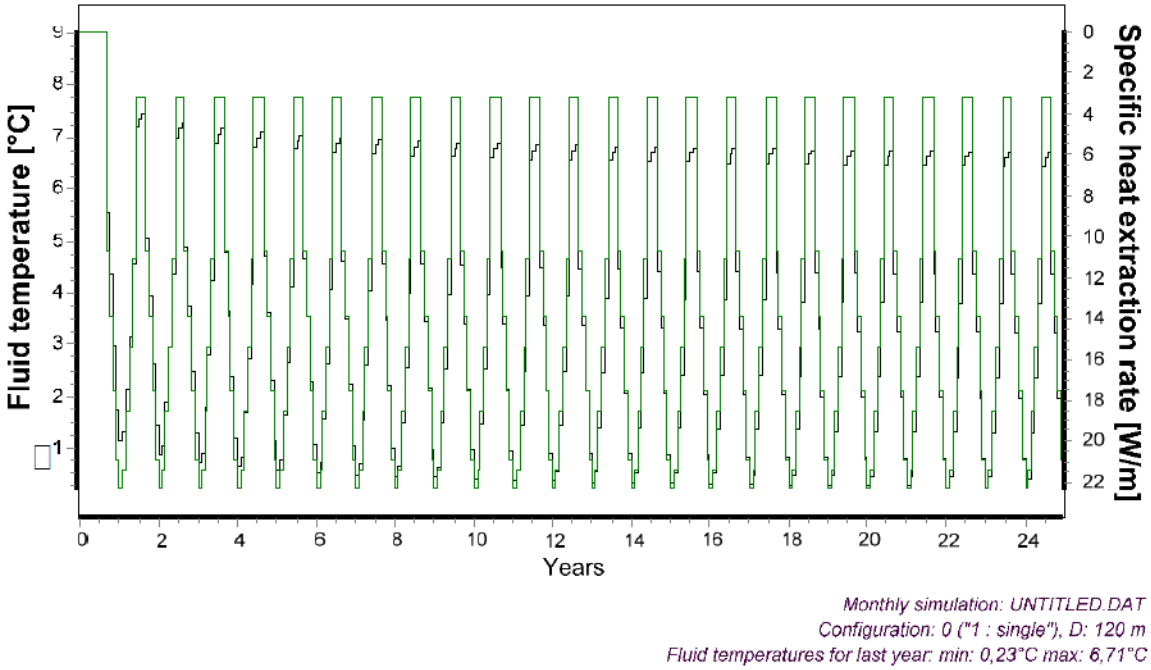
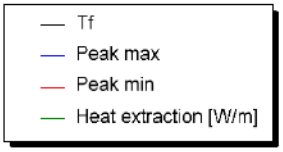


Figura 47. Andamento nel tempo sonda 120 metri, diametro 40 mm



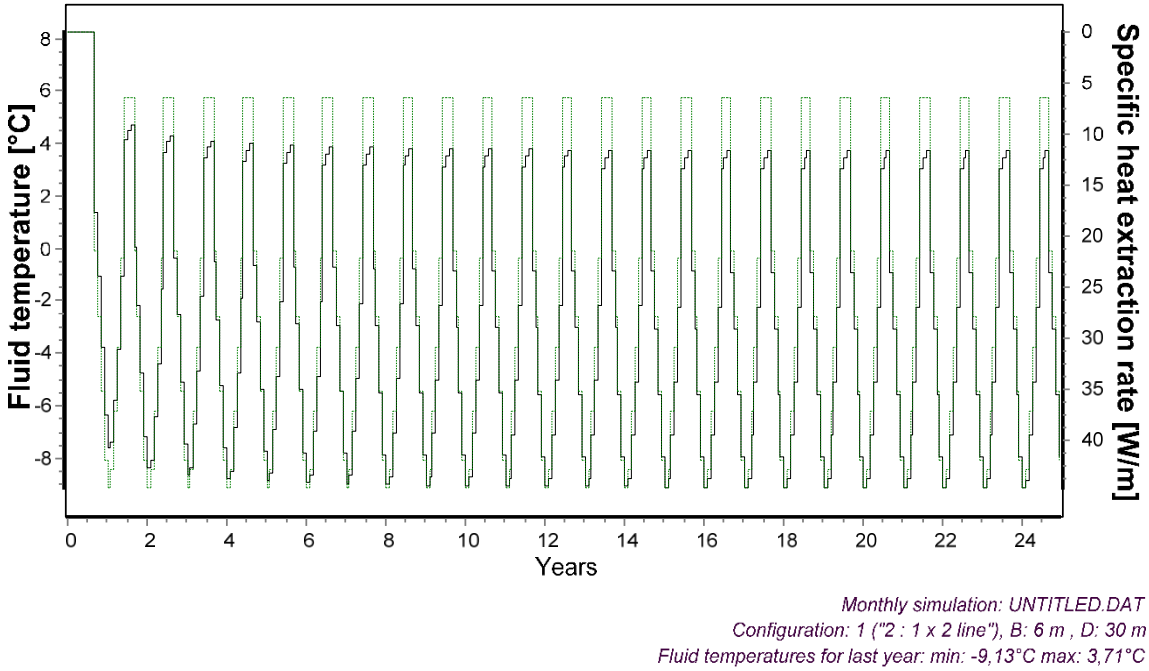
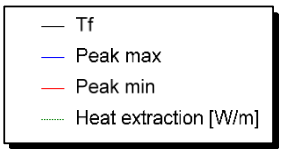


Figura 48. Andamento nel tempo due sonde 30 metri, diametro 40 mm



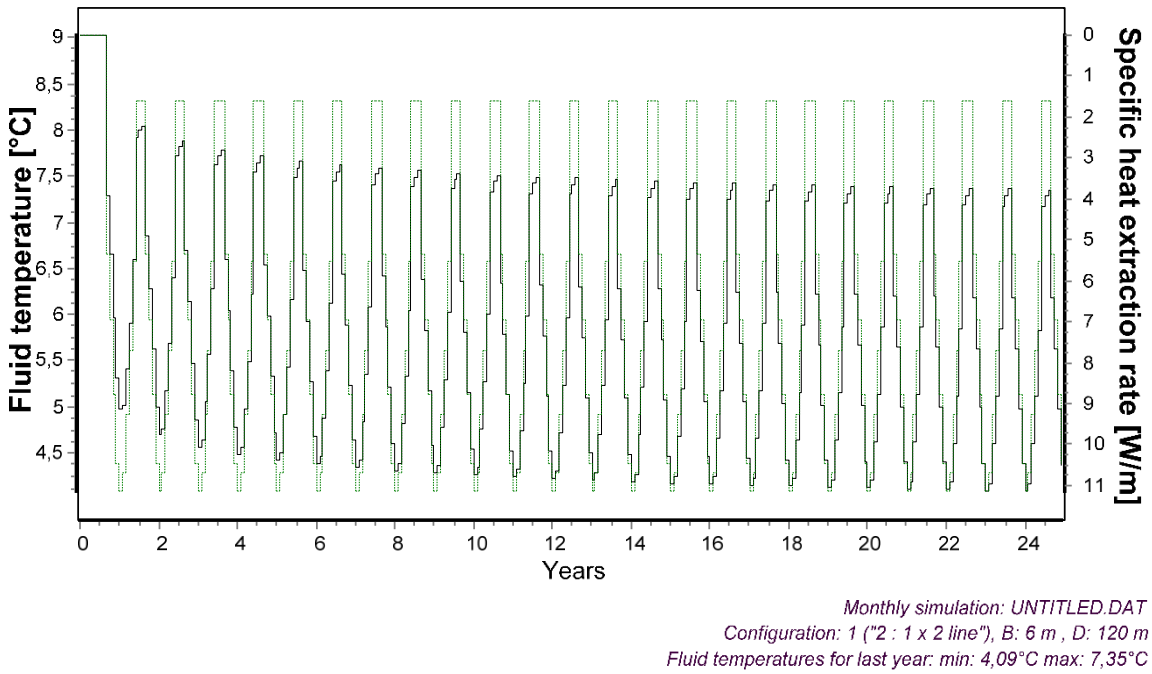
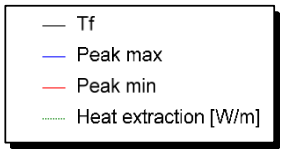


Figura 49. Andamento nel tempo due sonde 120 metri, diametro 40 mm



I risultati delle simulazioni con i due software sono simili e soddisfano le esigenze dell'impianto. Occorre però sottolineare come nel caso della sonda più corta la temperatura minima sia leggermente al di sotto della temperatura consigliata: per entrambi i diametri la temperatura minima risulta essere rispettivamente -26 °C e -24 °C, a rischio congelamento. Vi è quindi la necessità di modificare il fluido termovettore in modo che possa lavorare a queste temperature.

7. Conclusioni

Dai risultati delle simulazioni è emerso che il sistema più efficiente risulta essere quello con sonde verticali lunghe 120 metri, ma anche quello con un investimento iniziale più oneroso, causato dallo scavo del pozzo geotermico. La configurazione con collettori orizzontali, al contrario, è quella con costi minori, ma la necessità di ampi spazi non la rende facilmente utilizzabile in un contesto densamente urbanizzato come quello italiano. Le sonde verticali più corte (30 metri) hanno portato risultati soddisfacenti: il flusso termico scambiato è minore rispetto a quelle più lunghe, ma sufficiente al riscaldamento di un edificio: è possibile infittire la maglia, riducendo le distanze tra le sonde, senza che queste interagiscano tra loro. La minor lunghezza porta però anche un lato negativo: le temperature minime raggiunte dalle sonde potrebbero portare a un congelamento, pertanto è necessario approfondire lo studio sul fluido termovettore o sul materiale di riempimento del pozzo.
Lo sfruttamento dell'energia geotermica è un argomento trascurato in ambito accademico e scientifico e, come sostiene il professor Roberto Bruno, "non stupisce che l'impiantistica in Italia sia quasi inesistente e che, conseguentemente, manchi una normazione specifica o una regolamentazione ad hoc, nazionale o regionale".
Un sistema a pompa di calore abbinato a un impianto geotermico permette di riscaldare qualsiasi tipo di edificio, sfruttando una fonte di energia rinnovabile. "L'assenza di combustione annulla i rischi di scoppio e la presenza di fumi o residui di gas incombusti pericolosi come il monossido di carbonio". Questa soluzione non produce emissioni di CO_2 e di gas ad effetto serra nell'atmosfera e presenta il miglior rendimento rispetto a qualunque altro sistema di climatizzazione, garantendo un risparmio economico ed energetico.
Lo sviluppo tecnologico e lo studio di nuovi metodi di installazione potranno portare ad un abbattimento dei costi di scavo, che incidono maggiormente sulla spesa iniziale, facilitando la diffusione di questi impianti.

Bibliografia

[1] Francesco tinti, Geotermia per la climatizzazione - Applicazioni - Tecnologia - Analisi costi-benefici, Dario Flaccovio Editore, 2009

[2] Le pompe di calore geotermiche: tipologie, cenni sul dimensionamento, problematiche progettuali, legislazione, Ing. Alessandro Casasso, DIATI – Politecnico di Torino

[3] European Heat Pump Market and Statistics – Report 2016

[4] Bernardino Billi, Sergio Ligasacchi, Panorama energetico internazionale e sua evoluzione, 2016

[5] , Michele de Carli, Mauro Mantovan, Leonardo Prendin, Angelo Zarrella, Roberto Zecchin, Alessandro Zerbetto, Analisi di pompe di calore geotermiche con sonde orizzontali, Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi di Padova, HiRef S.pA., TiFS Ingegneria, Padova

[6] Louis Lamarche, Benoit Beauchamp, A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes

[7] A. Capozza, Linee guida per la progettazione di campi geotermici per pompe di Calore, Università degli Studi di Padova – Michele De Carli, Antonio Galgaro, Angelo Zarrella, RSE, Ricerca Sistema Energetico, 2012

[8] HakaGerodur, Scheda tecnica sonde geotermiche

[9] Giuseppe Starace, Le pompe di calore geotermiche, Università degli studi di Lecce - Dipartimento di ingegneria dell'innovazione

[10] G.V. Fracastoro, Geotermia e fonti rinnovabili

[11] Walter Grassi, Le pompe di calore, Walter Grassi, 2016, ISBN 9788892558762.

[12] ASHRAE 2003 Handbook—HVAC Applications, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2003.

[13] Cadrobbi L., Fioroni D., Bozzoli A., Low enthalpy geothermal energy: borehole heat exchangers (BHE). Geological and geothermal supervision during active construction in support of the energy certification of buildings - ESBE certification plan.

[14] Pompe di calore per la climatizzazione, CO.AER - Associazione Costruttori di Apparecchiature ed Impianti per la climatizzazione e le pompe di calore

[15] Marco e Mario Doninelli, Tabelle e diagrammi perdite di carico acqua, quaderni caleffi

[16] Piergiuseppe Froldi, Impianti geotermici –Progettazione, realizzazione e controllo, , Maggioli Editore

[17] Ruggero Bertani, Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report

[18] Progettazione Ed Esecuzione Di Un Pozzo Progettazione Ed Esecuzione Di Un Pozzo E Prove Di Portata E Prove Di Portata, dott. geol. Gianluigi Giannella

[19] Manuale canestri geotermici, Betatherm

Ringraziamenti

Giunto al termine di questo percorso di studi, è doveroso ringraziare chi mi ha permesso, con aiuto e professionalità, di imparare e crescere.

Ringrazio il mio relatore, il professor Marco Carlo Masoero, che, con disponibilità e professionalità, ha saputo guidarmi nella ricerca di questo affascinante ambito di studi, fornendo spunti di riflessione e fidandosi del mio intuito e della mia ricerca nella selezione del materiale e degli argomenti.
Ringrazio il mio correlatore, l'ingegner Gregorio Tosi, che ha supervisionato con attenzione e grande cura il mio lavoro, mostrandomi quanto possa essere difficile, appagante ed affascinante il lavoro dell'ingegnere.
Ringrazio infine l'ingegner Alessandro Casasso, che mi ha fornito preziose indicazioni, chiarendo i miei dubbi e aggiungendo al mio bagaglio anche nozioni di geologia che hanno permesso alla mia tesi di arricchirsi in completezza e precisione.

Ringrazio i miei genitori, senza i quali probabilmente non avrei nemmeno intrapreso questa facoltà e mi hanno fatto capire cosa sia l'ambizione, mia sorella, per esserci sempre stata quando ho avuto bisogno e mia nonna, per avermi sempre ascoltato quando gli esami andavano male.
Ringrazio Federica, per avermi sostenuto e sopportato con pazienza e per aver sempre creduto in me.
Ringrazio Silvio per l'aiuto con la stesura del codice e per avermi fatto capire che è possibile la convivenza tra fisici e ingegneri.
Ringrazio i miei amici e l'officina, i miei compagni di università, Bruno e gli amici del Dive is Life, perché ognuno di loro mi ha dato un contributo per raggiungere questo traguardo