

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL  
TERRITORIO**

D.I.C.M.A. Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle  
Tecnologie Ambientali

**TESI DI LAUREA**

in

Giacimenti minerari con elementi di mineralogia LS

**Caratterizzazione e modellazione di reservoir geotermico  
superficiale per impianti di condizionamento ad uso civile.**

CANDIDATO  
Luca Cerica

RELATORE:  
Chiar.mo Prof. Roberto Bruno

CORRELATORE:  
Dott. Giuseppe Zoggia  
Ing. Andrea Ballan

Anno Accademico 2006/07

Sessione II

**Parole chiave:**

Pompa di calore, Geotermia, scambio di calore, dissipatore orizzontali,  
borehole heat exchanger.

Un sentito ringraziamento per la realizzazione di questo elaborato, oltre a quella del mio Relatore, va alla ditta **Aktis Italia S.r.l.** di Loreggia Padova, per la disponibilità e calorosa ospitalità dimostrate.

In particolar modo vorrei ringraziare per il prezioso supporto tecnico l'ing. Andrea Ballan ed i suoi collaboratori dell'Ufficio tecnico.

In fine un ringraziamento per il supporto operativo va ai signori Fior Emilio e Zoggia Giuseppe per la disponibilità mostrata a collaborare con l'Università di Bologna per la realizzazione di questa tesi.



## INTRODUZIONE

La crescente sensibilità dell'opinione pubblica e del mondo tecnico scientifico verso il problema della sostanziale dipendenza dall'utilizzo di combustibili fossili per il riscaldamento e produzione di energia elettrica, con il conseguente aumento delle emissioni di gas serra quali CO<sub>2</sub>, ha portato d'attualità l'utilizzo di differenti soluzioni tecniche in grado di sfruttare fonti rinnovabili. Nel caso del condizionamento degli edifici, oltre alle più conosciute tecnologie fotovoltaiche e solare termico, possiamo citare l'utilizzo della pompa di calore abbinata allo sfruttamento del terreno come sorgente di calore. Questa è una tecnologia che utilizza per 80% del suo fabbisogno energia rinnovabile e per il restante 20% elettrica. La pompa di calore geotermica, oltre a de essere più efficiente dei sistemi tradizionali a caldaia, ha emissioni pari a zero localmente e quindi di grande contributo alla riduzione di gas nocivi all'ambiente. La sua diffusione, già ampia nel nord e centro Europa è in rapida espansione anche nel nostro paese grazie alle nuove politiche di incentivo fiscale che rendono meno oneroso il maggior investimento iniziale che essa richiede.

Vista la forte potenzialità intrinseca in questa tecnologia, l'elaborato si propone di illustrare i principali impianti che oggi vengono installati e l'approccio tecnico di dimensionamento che viene adottato in un ambiente per nulla regolamentato in Italia. Specificatamente si pone l'accento sulla pompa di calore associata a dissipatori orizzontali posizionati a bassa profondità nel terreno in quanto meno conosciuti e studiati rispetto alla ben collaudate sonde verticali. Verranno illustrati lo stato della tecnica attuale, i modelli di dimensionamento e caratterizzazione dei parametri termici per sonde verticali, evidenziando il divario di conoscenza presente tra queste ed i dissipatori orizzontali. Volendo approfondire la conoscenza di questi (molto diffusi in Italia) si è collaborato con la ditta Aktis Italia S.r.l. con sede a Loreggia (Padova) con esperienza decennale nella progettazione ed installazione di questa tipologia di impianti. Partendo da misure sperimentali di temperatura prese sul terreno interessato dal funzionamento di un dissipatore orizzontale installato e funzionante da diversi anni presso la ditta, si è costruito un modello originale di scambio termico per valutare come l'impianto interagisce con il terreno e come variano le temperature a seconda dei regimi stagionali di funzionamento. Particolare attenzione è stata rivolta alla sensitività dei risultati in base alle caratteristiche termiche del terreno e come questo influenza il rendimento dell'impianto. A conferma delle elaborazioni svolte, è stata fatta una campagna di sondaggi e misurazione delle temperature, le quali, tendono a confermare le ipotesi modellistiche. I risultati ottenuti mostrano che questi dissipatori, oltre ad avere

emissioni nulle, hanno un bassissimo impatto ambientale anche sulla flora che insiste sul terreno condiviso dall'impianto. In fine, un'analisi economica comparata tra sistemi di condizionamento tradizionale e geotermico dimostra come questo sistema sia conveniente e con un ammortamento della spesa iniziale repentina, anche grazie agli aiuti statali.

## INDICE:

<b>1. Il panorama geotermico italiano ed europeo.....</b>	<b>8</b>
<b>2. Impiantistica.....</b>	<b>14</b>
2.1 Pompa di calore.....	14
2.2 Sistemi radianti.....	19
2.3 La captazione del calore nel sottosuolo.....	24
2.3.1 Sonde verticali.....	24
2.3.2 Pali energetici.....	26
2.3.3 Dissipatori orizzontali.....	28
2.3.4 Impianti.....	31
<b>3. Modellistica per sonde verticali e dissipatori orizzontali.....</b>	<b>33</b>
3.1 Flusso di calore nel terreno.....	34
3.2 Borehole heat exchanger calculation.....	36
3.3 Stoccaggio di calore nel sottosuolo (raffrescamento estivo).....	38
3.4 Modello Gaia.....	43
<b>4. Test di risposta geotermica.....</b>	<b>49</b>
4.1 Introduzione al test.....	49
4.2 Principi fisici alla base del test.....	50
4.3 Attrezzatura per effettuare il test.....	52
4.4 Procedimento.....	54
4.5 Analisi dei dati.....	54
4.6 Conclusioni e valutazioni.....	56
<b>5. Panorama normativo europeo e riferimenti in Italia.....</b>	<b>59</b>
5.1 Panorama europeo ed Italiano.....	59
5.2 Legge VDI 4640.....	60
5.2.1 Collettori orizzontali.....	60
5.2.2 Sistema a sonde verticali.....	62
5.2.3 Documentazione per l'installazione.....	65
5.2.4 Norme per la realizzazione di sonde verticali.....	66
<b>6. Impianto geotermico e temperature del terreno.....</b>	<b>68</b>
6.2 Modello di scambio termico.....	74
6.2.1 Raffrescamento a Maggio.....	79
6.2.2 Raffrescamento ad Agosto.....	90
6.2.3 Riscaldamento in Dicembre.....	97
6.3 Misure sperimentali e suggerimenti di convalida del modello.....	104

<b>7. Sensitività del modello termico in sabbia ed argilla.....</b>	<b>109</b>
7.1 Il terreno e le caratteristiche termiche.....	109
7.2 Sensitività in sabbia.....	116
7.2.1 Raffrescamento a Maggio.....	111
7.2.2 Raffrescamento ad Agosto.....	120
7.2.3 Riscaldamento a Dicembre.....	123
7.3 Sensitività in argilla.....	127
7.3.1 Raffrescamento a Maggio.....	127
7.3.2 Raffrescamento ad Agosto.....	131
7.3.3 Riscaldamento a Dicembre.....	134
<b>8. Impatto ambientale della pompa di calore geotermica.....</b>	<b>138</b>
<b>9. Analisi economica comparata.....</b>	<b>145</b>
<b>10. Conclusioni.....</b>	<b>155</b>
<b>11. Bibliografia.....</b>	<b>157</b>

## CAPITOLO 1

### II PANORAMA GEOTERMICO ITALIANO ED EUROPEO

Il crescente costo dei combustibili fossili utilizzati per il riscaldamento degli edifici ad uso civile, associato ad un sempre più elevato costo dell'energia elettrica necessaria al funzionamento d'impianti di condizionamento estivo, ha portato negli ultimi anni ad una sempre più massiccia diffusione delle pompe di calore reversibili. Sono macchine termodinamiche che hanno la capacità di sottrarre calore dall'edificio per cederlo all'ambiente in estate e viceversa in inverno. La loro efficienza è influenzata in maniera rilevante dalle temperature d'esercizio, o meglio dal dislivello di temperatura tra ambiente interno e sorgente esterna. Esse possono utilizzare l'aria esterna come mezzo a cui cedere o sottrarre calore però questa è soggetta ad una forte escursione termica sia annuale che giornaliera ed inoltre presenta basse temperature proprio in quei mesi invernali in cui si sottrarre calore per il riscaldamento degli edifici. Per questo motivo è nata, già negli U.S.A. dal secondo dopoguerra e diffusasi in Europa in seguito, la tendenza di utilizzare il terreno come serbatoio termico sfruttabile dalla pompa di calore. Questa tipologia d'impianti capaci di fare riscaldamento invernale e "raffrescamento" estivo sono chiamati impianti geotermici. L'energia geotermica è quella fonte di calore immagazzinata nella crosta terrestre che si propaga verso la superficie come flusso di calore chiamato appunto geotermico. La temperatura del terreno in superficie è fortemente influenzata dai cambiamenti climatici (dalla temperatura dell'aria e dalle ore di soleggiamento) mentre, scendendo in profondità, essa si stabilizza ad un valore pari alla temperatura media annuale dell'aria esterna già ad una profondità di circa 12m. Scendendo ancora, la temperatura dipende essenzialmente dal gradiente geotermico pari ad un aumento di 3°C ogni 100 m. La misura dell'energia termica immagazzinata da suolo, (o in generale da un fluido + solido) e quindi, ciò che può essere messo a disposizione da esso, è dato dall'entalpia:

$$E = U + p \cdot v$$

dove:

- E= entalpia kJ/kg
- U= energia interna kJ/kg
- p = pressione kN/(kg\*m<sup>2</sup>)
- v = volume m<sup>3</sup>

La produzione di energia elettrica con fonti rinnovabili quali appunto quella geotermica, sfrutta campi ad alta entalpia in cui una anomalia del gradiente termico dovuta a conformazioni geologiche porta in

prossimità della superficie (1000-3000 m ) rocce calde che possono scaldare e vaporizzare acqua, iniettata precedentemente da pozzi, sino ad una temperatura superiore ai 100°C e fornirla ad elevate pressioni, rendendola sfruttabile per la produzione di elettricità. Campi a bassa entalpia, con temperature inferiori ai 100°C e basse pressioni, sono sfruttati direttamente per diversi usi industriali e di riscaldamento urbano. L'oggetto di questa tesi, invece, è la caratterizzazione e lo studio del terreno a bassissima entalpia che viene sfruttato per il condizionamento di edifici ad uso civile. Gli impianti a pompa di calore geotermica chiamati anche GSHP (Ground-Source heat Pump) sfruttano appunto il terreno che, grazie alla sua notevole inerzia termica, risente poco degli sbalzi termici esterni ed offre notevoli vantaggi estetici e di riduzione di rumore rispetto alle pompe di calore ad aria. Storicamente i primi studi su questa tecnologia si ebbero negli Stati Uniti e in Canada a partire dal dopoguerra, con una successiva e notevole diffusione a partire dagli anni 80 anche grazie al miglioramento delle pompe di calore che divennero concorrenziali con le caldaie tradizionali. Lo sfruttamento del terreno avviene con la creazione di dissipatori che possono avere uno sviluppo orizzontale o verticale entro il quale scorre un fluido termovettore che assorbe calore dal terreno in inverno mentre ne cede in estate. I primi impianti ad essere utilizzati negli Stati Uniti erano forniti di dissipatore verticale, chiamati anche SVG (Sonda Geotermica Verticale o BHE: borehole Heat Exchanger), specialmente in Texas per il condizionamento estivo e nel nord, al confine con il Canada, per il riscaldamento invernale. La situazione in Europa è variegata e dipende essenzialmente dalla politica ambientale ed energetica adottata nei vari paesi:

- **Svizzera:** Grazie ad una legislazione che tende a limitare le emissioni di CO<sub>2</sub>, questo paese ha il più alto numero di pompe di calore in rapporto alla sua popolazione. Già nel 1998 erano presenti più di 20000 impianti utilizzando il terreno come fonte di calore, con una potenza termica installata di 300 MW, oggi, sono più di 400 MW con un trend di crescita annuo del 10%.
- **Austria:** la situazione è simile a quella svizzera con circa 300 MW d'impianti installati geotermici di cui la maggior parte non superiore ai 15 kW, quindi per piccoli e medi edifici.
- **Olanda:** le prime realizzazioni in questo paese risalgono alla prima metà degli anni 80, dopo un periodo di stagnazione del settore, si è vista una notevole ripresa dai primi anni 90, passando da 220 pompe di calore installate nel '94 a 903 nel '97. In questo paese è anche in rapida diffusione l'utilizzo diretto dell'acqua di falda freatica prelevata da pozzi per il

riscaldamento invernale ed il condizionamento estivo (sistema ATES).

- **Svezia:** è il paese principe in Europa per l'utilizzo della pompa di calore geotermica. Nel 1998 erano installati nel paese circa 55000 impianti con sonde verticali, per un totale di 330 MW di potenza, oggi, il parco installato è di 2000 MW. In considerazione dell'alta incidenza dell'origine idroelettrica nella produzione elettrica nazionale, l'utilizzo delle pompe di calore offre una significativa opportunità di riduzione delle emissioni. La Svezia è inoltre leader nel campo dell'accumulo dell'energia nel sottosuolo sia mediante sonde geotermiche sia con l'impiego diretto dell'acqua di falda. I modelli matematici di riferimento per lo studio delle sonde verticali sono stati elaborati da studiosi svedesi ed inoltre attrezzature e procedure per la determinazione di importanti parametri caratterizzanti il terreno sono stati sviluppati dall'università svedese di Luea.
- **Germania:** questo è un altro paese di riferimento del settore con un totale di oltre 450 MW di potenza installati ed un numero di impianti pari a 22000. Inoltre la legislazione tedesca in materia è presa come punto di riferimento per la progettazione e l'installazione degli impianti in paesi in cui è presente un vuoto normativo come in Italia.

Nel nostro paese lo sfruttamento delle pompe di calore geotermiche è ancora basso ma in rapida diffusione. Il suo scarso sviluppo in passato era legato essenzialmente all'elevato costo iniziale necessario per la realizzazione dell'impianto, costo che non era alleviato da sgravi fiscali per le energie pulite e rinnovabili come quella geotermica. Il maggior numero di installazioni sono nel nord Italia, utilizzate inizialmente per il solo riscaldamento invernale ma ora sempre più diffuse anche per il funzionamento estivo. La legislazione nel nostro paese, sempre più sensibile allo sfruttamento energetico pulito e rinnovabile, ha stanziato fondi per chi decide di costruire edifici o di ristrutturarli utilizzando materiali isolanti e caldaie a condensazione o pompe di calore, ottenendo un abbattimento dei consumi energetici superiore al 20% rispetto alle soluzioni tradizionali. Queste nuove politiche hanno dato un forte impulso alla diffusione di impianti geotermici sia per abitazioni private (villette o condomini) sia per edifici pubblici di grandi dimensioni quali scuole, ospedali e uffici della pubblica amministrazione. Di seguito sono riportati alcuni dati percentuali di mercato riguardante la ripartizione del mercato geotermico tra le varie utenze e le tipologie di impianti utilizzati. I dati riguardano le

vendite e installazione di impianti eseguiti dalla ditta AKTIS Italia S.r.l. di Loreggia (PD) con la quale si è collaborato per la realizzazione di questa tesi. I dati, oltre a distinguere i vari utenti finali, sottolineano la ripartizione tra le due principali soluzioni impiantistiche utilizzando il terreno come mezzo di scambio termico: le sonde verticali e i collettori orizzontali.

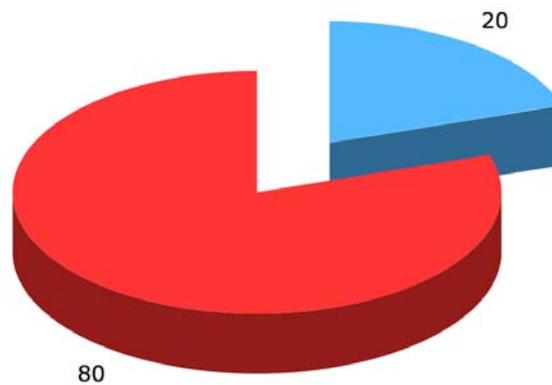
### Ripartizione del mercato geotermico in Italia (fonte AKTIS Italia) %



Le differenze specifiche saranno illustrate in seguito ma illustriamo in questa sede la loro principale differenza. Gli impianti a sonde verticali sfruttano lo scambio termico con il terreno iniettando il fluido termovettore in uno o più tubi ad U di polietilene annegati in una malta cementizia che riempie completamente delle perforazioni verticali nel terreno che possono avere diversa profondità a seconda delle esigenze termiche dell'edificio. Scambiano molto calore in quanto sono a contatto per molti metri con il terreno a temperatura costante e quindi si prestano per installazioni di notevole dimensioni (>20 kW) quali impianti centralizzati per palazzine abitative. Le sonde a collettore orizzontale sono più economiche in quanto non richiedono una perforazione profonda ma uno sbancamento di terreno superficiale (solitamente entro i 2 m di profondità), infatti, lo scambio avviene con fasci tuberi o serpentine adagiate a bassa profondità nel terreno e ricoperte poi da questo. Esse hanno una capacità estrattiva del calore inferiore rispetto alle sonde verticali e richiedono la disponibilità di discrete aree di terreno libero. Questa soluzione si presta bene per impianti di

piccole e medie dimensioni (< 15kW) ed in costruzioni con ampio spazio per le serpentine.

**Tipologia di impianti geotermici indipendenti per abitazioni civili (fonte AKTIS Italia) %**



■ impianto geotermico con sonde verticali ■ impianto geotermico con dissipatore orizzontale

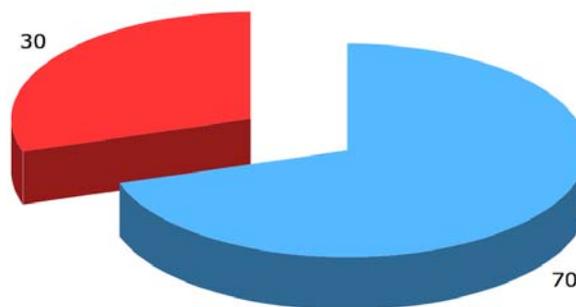
**Tipologia di impianti geotermici per edifici pubblici ed industriali (fonte AKTIS Italia) %**



■ impianto geotermico con sonde verticali ■ impianto geotermico con dissipatore orizzontale

Entrambi gli impianti geotermici funzionanti con pompa di calore reversibile hanno ottimi coefficienti prestazionali se utilizzati con sistemi di diffusione termica radiante all'interno degli edifici. Difatti la pompa di calore funziona bene se non c'è un elevato salto termico tra sorgente del calore (terreno) ed ambiente da riscaldare (caso del riscaldamento) e questo è ottenuto utilizzando riscaldamenti radianti a pavimento o parete che lavorano ad una temperatura di circa 35°C rispetto ai 60°C dei sistemi tradizionali.

**Tipologia di impianti geotermici per edifici pubblici ed industriali (fonte AKTIS Italia) %**



■ impianto geotermico con sonde verticali ■ impianto geotermico con dissipatore orizzontale

Il vantaggio di utilizzare impianti geotermici per il condizionamento degli edifici deriva da diversi fattori; oltre al minor impatto ambientale che essi hanno rispetto alle caldaie tradizionali, in quanto non hanno emissioni inquinanti, essi permettono un notevole risparmio economico sui consumi energetici annuali e richiedono una manutenzione quasi nulla. Ciò permette un recupero rapido del maggior investimento iniziale soprattutto se legato agli incentivi statali e di ottenere sostanziali guadagni annui sulla bolletta energetica rispetto la caldaia per il riscaldamento ed il sistema a "split" per il condizionamento estivo.

## CAPITOLO 2

### IMPIANTISTICA

Come già detto in precedenza, gli impianti di condizionamento con pompa di calore geotermica sono composti da tre elementi principali:

- Pompa di calore.
- Impianto radiante.
- Sonde verticale geotermica o dissipatore orizzontale.

#### 2.1 POMPA DI CALORE

Questo è un dispositivo che permette di trasferire calore da un sistema (ambiente) ad una certa temperatura ad un altro ad una temperatura maggiore, utilizzando l'energia proveniente dal raffreddamento dell'ambiente a temperatura minore per riscaldare quello a temperatura maggiore.

È una macchina che, ricevendo energia sotto forma di corrente, riesce a prelevare calore ad una sorgente a temperatura bassa e trasferirla ad una sorgente a più alta temperatura riscaldandola.

Considerando ad esempio il classico ciclo della macchina di Carnot dove da una sorgente a temperatura  $T_1$  viene ceduta una quantità di calore  $Q_1$  alla macchina di Carnot che ne trasforma una parte in lavoro  $L = Q_1 - Q_0$  e cede il calore rimanente  $Q_0$  ad una sorgente a temperatura minore  $T_0$  ( $T_1 > T_0$ ). In questo caso il rendimento è valutato come: (Renato Lazzarin 1982)

$$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{T_1 - T_0}{T_1} = 1 - \frac{T_0}{T_1}$$

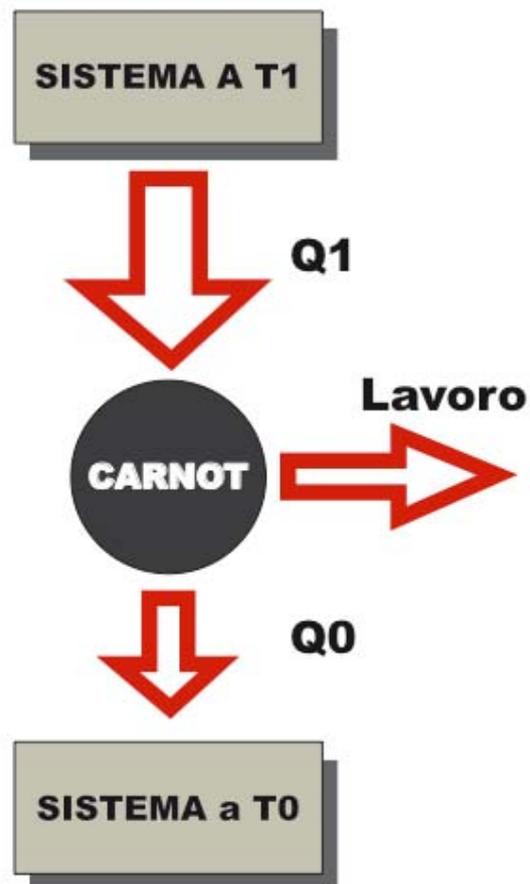
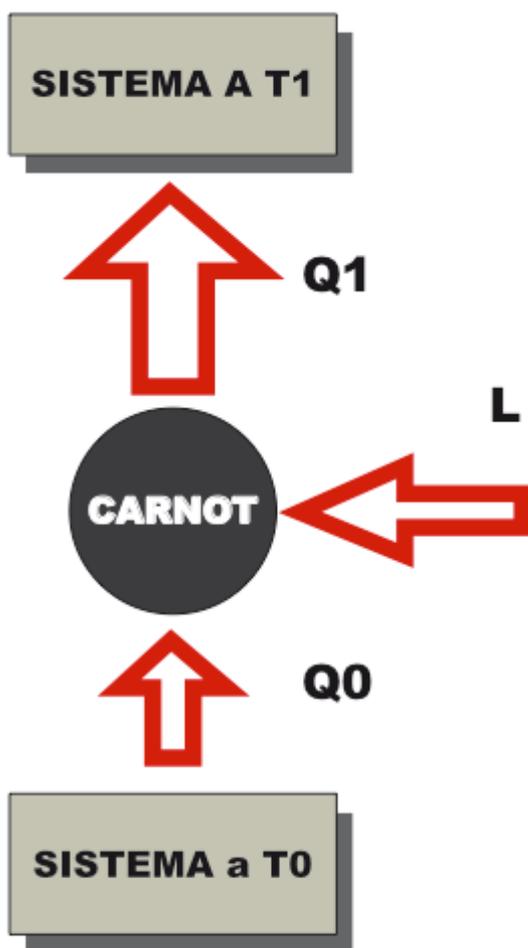


Figura 1: Macchina di Carnot

Da questo si vede che il rendimento sarebbe ideale (cioè pari a 1) se la temperatura della sorgente ricevente fosse 0 e quindi con tutto il calore  $Q_1$  trasformato in lavoro. La pompa di calore funziona esattamente all'opposto, riceve una certa quantità di lavoro (corrente elettrica) che utilizza per prelevare calore dalla sorgente fredda per cederla a quella più calda, infatti riceve  $Q_0$  e trasferisce  $Q_1 = Q_0 + L$ .



Per la pompa di calore o (PDC) si parla di COP, Coefficient of Performance, definito come:

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

cioè  $Q_1$  è il risultato ottenuto dalla nostra macchina, mentre il lavoro è ciò che abbiamo speso per ottenerlo.

Il suo funzionamento è simile a quello del funzionamento di una macchina frigorifera. La PDC sottrae calore ad una zona più fredda per cederlo ad un ambiente più caldo. Essa sfrutta il principio termodinamico di un fluido che richiede calore per evaporare mentre lo cede per condensare a diverse pressioni. A livello esplicativo esaminiamo un circuito in cui è presente un fluido che evapori a  $-10^\circ\text{C}$  ad una pressione di 2,5 bar e

Figura 2: Macchina di Carnot inversa

condensi ad una temperatura superiore ai  $30^\circ\text{C}$  a 12 bar di

pressione.

Il fluido vaporizza in un evaporatore chiedendo calore, e ciò avviene nell'ambiente da raffreddare. Il vapore, per essere utilizzato nuovamente nel ciclo, deve condensare cedendo calore ad un ambiente a più alta temperatura (riscaldandolo quindi). Ciò avviene in un condensatore ad elevata pressione (nel nostro caso a 12 bar) dove il fluido si condensa cedendo il calore assorbito precedentemente ed in più l'equivalente termico del lavoro fornito al compressore per comprimerlo facendolo passare da 2,5 a 12 bar

di pressione. Una volta che il fluido è condensato deve tornare all'evaporatore per concludere il ciclo, passando per una valvola di laminazione che riduca la sua pressione, riportandolo a 2,5 bar. Il fluido utilizzato all'interno del circuito solitamente è freon oppure derivati alogenati degli idrocarburi. Essi sono identificati dalla lettera R (Refrigerant) e da un numero che identifica il numero di atomi di carbonio, idrogeno, fluoro e cloro contenuti. Esempio R12, R22 ecc. Ognuno di loro ha una curva caratteristica P-T e quindi si può scegliere quelli più adatti alle proprie esigenze.

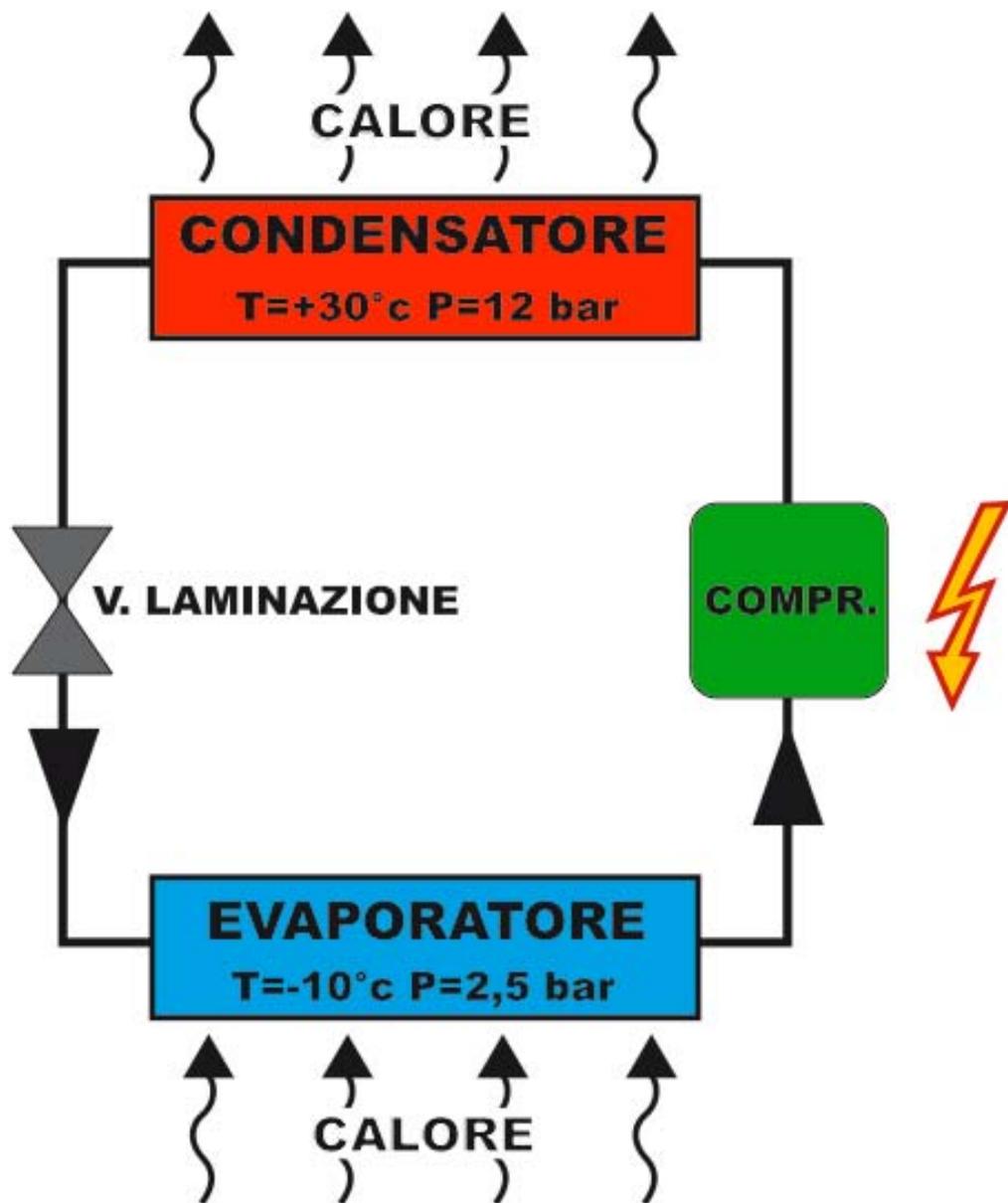


Figura 3: Schema della pompa di calore, Lazzarin 1982

I componenti della pompa di calore sono:

- Il compressore:

Il compressore più utilizzato, e quindi quello che tratteremo in questa sede, è quello alternativo. Questo si adatta molto bene per piccole e medie utenze ed è una macchina ben collaudata e conosciuta. Il compressore alternativo è composto di pistone e di due valvole automatiche: una d'aspirazione e una di mandata azionate entrambe dal movimento del pistone. Questo va lubrificato con dell'olio che in piccole parti viene trascinato dal fluido all'interno del circuito fino all'evaporatore dove si divide dal vapore, quindi raccolto e riportato nel carter del compressore. In certe macchine il sistema garantisce abbastanza velocità al vapore di ritorno dall'evaporatore da trascinare l'olio al compressore.

- Valvola d'inversione:

Si tratta di una apposita valvola a quattro vie che può invertire il ciclo per poter raffreddare in estate e riscaldare in inverno, quindi trasformare l'evaporatore in condensatore e viceversa.

- Condensatore ed Evaporatore:

Sono due scambiatori di calore in cui il fluido passa e cede calore condensando mentre ne acquisisce evaporando. La loro forma è dettata dal tipo di scambio che devono fare: acqua o aria. Con l'aria la forma tipica è quella di fasci tubieri (in cui scorre il fluido interno alla PDC) che attraversano fasci lamellari per aumentare la superficie di scambio con l'aria. Con l'acqua, lo scambiatore ha la forma di due fasci tubieri a contatto in cui scorrono i fluidi termovettori (è il caso delle PDC geotermiche) e dove avvengono condensazione ed l'evaporazione.

- Valvola di laminazione:

Tra condensatore ed evaporatore è presente una valvola di laminazione termostatica, un congegno che permette di abbattere la pressione del fluido condensato prima che arrivi all'evaporatore. Essa è controllata dalla pressione e dalla temperatura dell'evaporatore, le quali, aprono e chiudono la valvola garantendo sempre vapore surriscaldato (sarebbe un problema se vapore sulla linea di rugiada passasse dentro il compressore) e ad una determinata pressione al compressore.

Il ciclo termodinamico della PDC:

Sul diagramma termodinamico entalpia (h) pressione (p) si identifica il ciclo principale semplificato che il fluido compie in una pompa di calore:

- 1-4 avviene la condensazione del fluido che passa da vapore surriscaldato in 4 a liquido saturo in 1. Questa è una trasformazione isoterma con perdita di entalpia (energia interna) in quanto qui il fluido cede calore.

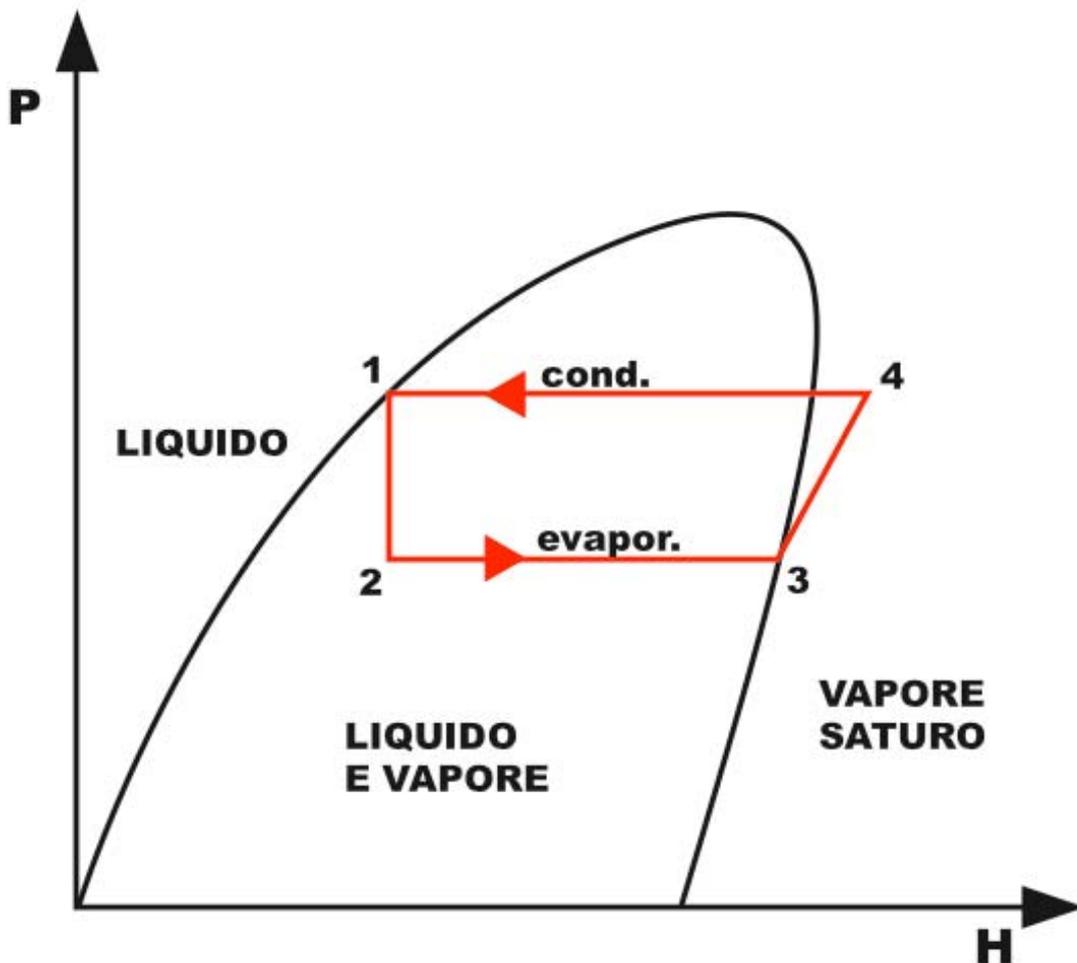


Figura 4: Ciclo termodinamico della pompa di calore, Lazzarin 1982

- 1-2 passaggio nella valvola di laminazione con caduta di pressione a parità d'entalpia. Il fluido evapora leggermente in quanto in 2 si trova all'interno della campana "liquido-vapore".
- 2-3 passaggio del fluido nell'evaporatore, la trasformazione avviene a temperatura costante con aumento entalpico. In 3 il fluido è vapore saturo non ancora surriscaldato.

- 3-4 passaggio del vapore all'interno del compressore ove, oltre ad aumentare di pressione aumenta la sua entalpia in quanto viene aggiunto ad esso sottoforma di calore il lavoro del compressore.

Ricapitolando il sistema cede il calore  $Q_c$  all'ambiente da riscaldare nel tratto 4-1 mentre ne assorbe nel tratto 2-3  $Q_e + L$  che è il lavoro fornito dal compressore. Il COP in questo diagramma è dato da:

$$COP = \frac{2-3}{3-4}$$

Questa efficienza, che solitamente va da valori 3 a 5, può essere migliorata se si utilizza la tecnica del sotto raffreddamento che consiste nel surriscaldamento del vapore uscente dall'evaporatore facendolo passare in uno scambiatore dove preleva calore dal fluido condensato in uscita dal condensatore e prima che arrivi alla valvola di laminazione.

Un altro parametro importante che influenza il COP è la differenza di temperatura tra la condensazione e l'evaporazione del fluido, più aumenta il  $\Delta T$  tra la sorgente fredda (che deve avere una temperatura più alta dell'evaporatore per trasmettergli calore) e sorgente calda (che deve avere una temperatura più bassa del condensatore per poter ricevere calore) minore sarà il COP della pompa di calore. Difatti il segmento di calore adsorbito durante l'evaporazione diminuisce mentre quello del lavoro speso dal compressore aumenta.

Ciò giustifica l'utilizzo della tecnologia radiante a bassa temperatura per un corretto ed efficiente funzionamento della pompa di calore.

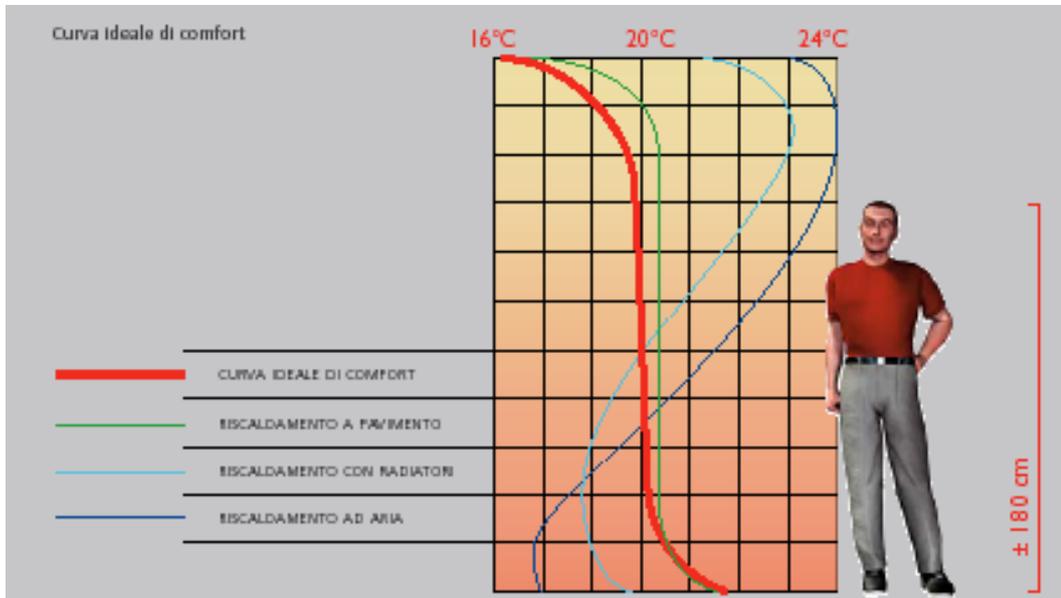
Il calore  $Q$  che si scambia tra sorgente fredda ed evaporatore e sorgente calda e condensatore è dato dalla relazione  $Q = K \cdot S \cdot \Delta T$ . Il contributo maggiore è dato da  $\Delta T$ , si può aumentare  $S$  che è la superficie di scambio aumentando la dimensione degli scambiatori, però questo implica dimensioni e costi della macchina maggiori.  $K$ , che è il coefficiente globale di trasmissione del calore, è solitamente tenuto ad elevati valori.

In definitiva, il COP aumenta all'aumentare della temperatura di evaporazione mentre diminuisce all'aumentare di quella di condensazione.

## 2.2 SISTEMI RADIANTI

Come già detto in precedenza, il sistema radiante a parete o pavimento è perfetto per l'utilizzo con la PDC che chiede un basso  $\Delta T$  tra sorgente (terreno) e dissipatore radiante interno che lavora a circa 35 °C. Oltre a ciò, i vantaggi nell'utilizzo dei pannelli radianti

sono notevoli, difatti, il sistema fornisce al corpo umano comfort e benessere superiori rispetto ai normali sistemi di riscaldamento ottenuti con temperature costanti ed uniformi nei vari locali. Avere una grande superficie che riscalda con una bassa temperatura



**Figura 5: Le curve di temperatura dei vari tipi di riscaldamento confrontati con la curva del benessere umano (fonte Aktis Italia srl 2007)**

dell'acqua significa avere moti convettivi dell'aria all'interno degli ambienti praticamente assenti oltre ad avere l'aria meno secca. Diminuendo drasticamente le correnti d'aria si eliminano anche gli spifferi, turbolenze e movimento di polveri all'interno dei locali, classici problemi dei sistemi convettivi tradizionali. Grazie a questa soluzione impiantistica è possibile fornire all'utenza la stessa sensazione di benessere mantenendo la temperatura dell'aria a circa 2°C in meno rispetto ai sistemi tradizionali, praticamente si ha la percezione di un ambiente a 22-23°C mentre in realtà la temperatura non è oltre i 20-21°C. Ne deriva una minor dispersione termica verso l'esterno ed un risparmio energetico intrinseco.



**Figura 6: Foto di un impianto radiante con layout a chiocciola con il collettore nel muro. (Aktis Italia srl 2007)**

Oltre ai sopra citati vantaggi il pavimento radiante, eliminando i termosifoni antiestetici, permette una maggior libertà d'arredamento ed isolamento acustico tra i diversi piani di un edificio.

Il pavimento radiante è composto di pannelli isolanti di poliestere espanso che vengono adagiati sul solaio. Questi sono sagomati in superficie per poter ricevere fasci tuberi plastici in cui scorrerà l'acqua. Il layout dei circuiti può essere del tipo a chiocciola o a serpentina, la prima soluzione garantisce una distribuzione termica più uniforme in quanto i tubi di mandata ed uscita sono alternati, mentre per la serpentina si avrà un gradiente di temperatura diverso in varie posizioni della stanza. Due collettori idraulici, posizionati nella stessa cassetta a scomparsa nel muro, uno di andata ed uno di ritorno collegano i vari circuiti uno per ogni ambiente da condizionare. Il fascio tubero è poi ricoperto dal massetto cementizio di supporto alla pavimentazione. Questi sistemi funzionano in inverno per il riscaldamento ed utilizzano l'acqua ad una temperatura compresa tra i 25-45°C in funzione della temperatura esterna. Durante il periodo estivo, l'acqua viene utilizzata ad una temperatura compresa tra 17-19°C sempre in base alla temperatura esterna. La versatilità di tutto l'impianto è garantito da sensori elettronici posizionati in ciascuna stanza che leggono e regolano la temperatura mandando segnali di controllo alla PDC. Il dimensionamento degli impianti è basato sulla normativa europea recepita in Italia come UNI EN 1264; essa stabilisce dei valori limiti superficiali di temperatura per il pavimento. Questi limiti sono

accettati come sicuri per l'uomo sotto il profilo fisiologico e sono pari a: (Aktis Italia Srl 2007)

- 29°C zone di soggiorno
- 35°C zone periferiche
- 33°C bagni

A queste temperature corrispondono curve caratteristiche limite di applicazione che mettono in relazione la differenza media tra temperature dell'acqua e quelle dell'aria ed emissione termica del pavimento, in funzione della sua resistenza termica. La normativa indica la resa dell'impianto a pavimento nel seguente modo: (UNI EN 1264).

$$q = 8,92 \cdot (\bar{T}_p - \bar{T}_{amb})^{1,1}$$

Dove:

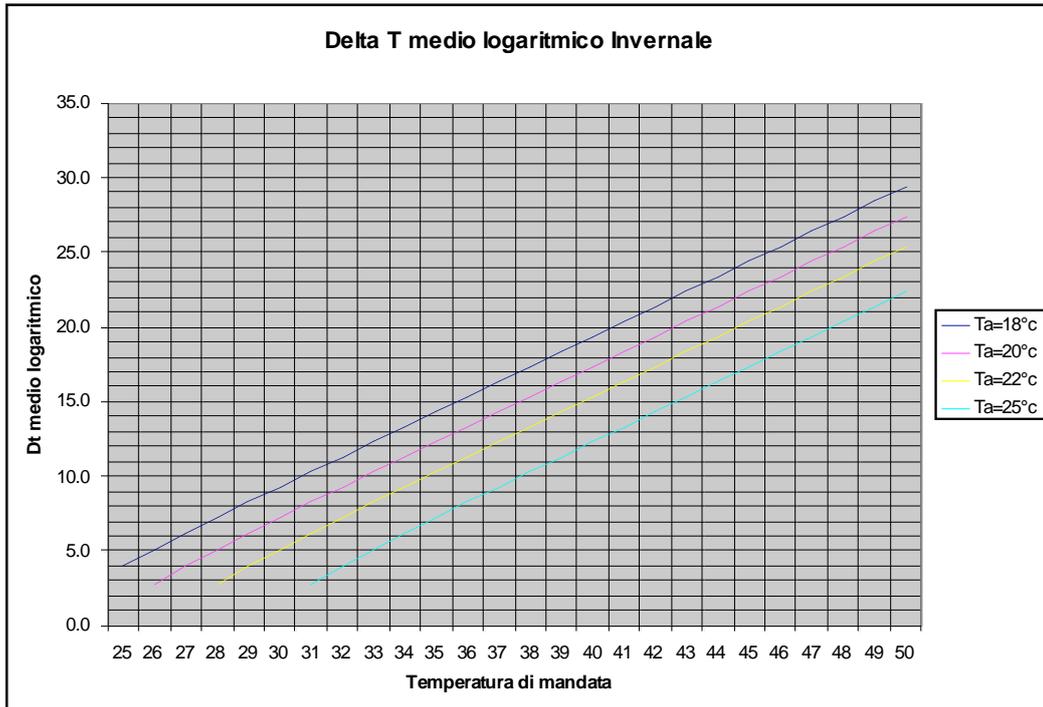
- $q$  = emissione di calore ( $W/m^2$ )
- $\bar{T}_p$  = temperatura media della superficie del pavimento ( $^{\circ}C$ )
- $\bar{T}_{amb}$  = temperatura media dell'ambiente ( $^{\circ}C$ )

Per un giusto dimensionamento occorre prima di tutto conoscere le caratteristiche fisiche degli edifici quali orientamento e grado d'isolamento, così da valutare le perdite di calore attraverso le pareti e le superfici vetrate. In secondo luogo occorre sapere le finiture superficiali dell'edificio, in quanto influiscono molto sul dimensionamento: ad esempio si ricorre ad un layout a serpentina in edifici con un massetto spesso, in quanto, la configurazione a chiocciola abbassa sensibilmente la temperatura superficiale poiché i tubi di mandata sono vicini a quelli d'uscita. Il dimensionamento vero e proprio procede nel valutare il passo tra i tubi dell'impianto e la resa termica di questo. Prima va conosciuta la temperatura di mandata dell'impianto e quella dell'ambiente ideale poi va valutato con un grafico il  $\Delta Th$  logaritmico espresso come:

$$\Delta Th = \frac{(T_m - T_r)}{\ln\left(\frac{T_m - T_a}{T_r - T_a}\right)}$$

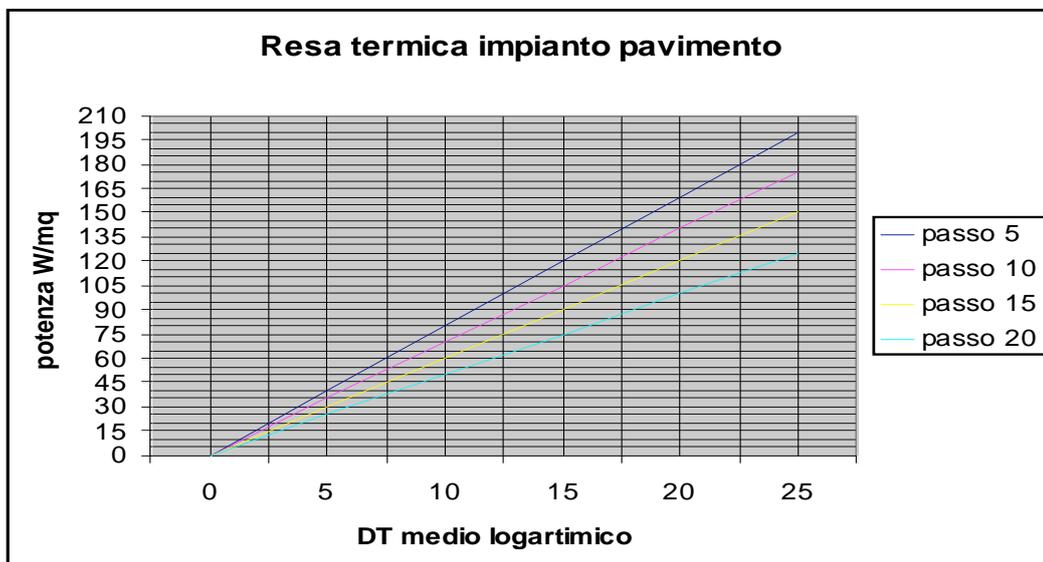
Dove:

- $T_m$  = temperatura di mandata dell'impianto ( $^{\circ}C$ )
- $T_r$  = temperatura di ritorno all'impianto ( $^{\circ}C$ )
- $T_a$  = temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ )



**Figura 7: Grafico che restituisce il delta T medio logaritmico in base a Ta (Aktis Italia 2007)**

Una volta ottenuto il  $\Delta T_h$  logaritmico si può trovare il passo necessario tra i tubi sapendo il fabbisogno dell'edificio  $W/m^2$



**Figura 8: Grafico che fornisce il passo tra i tubi . (Aktis Italia 2007)**

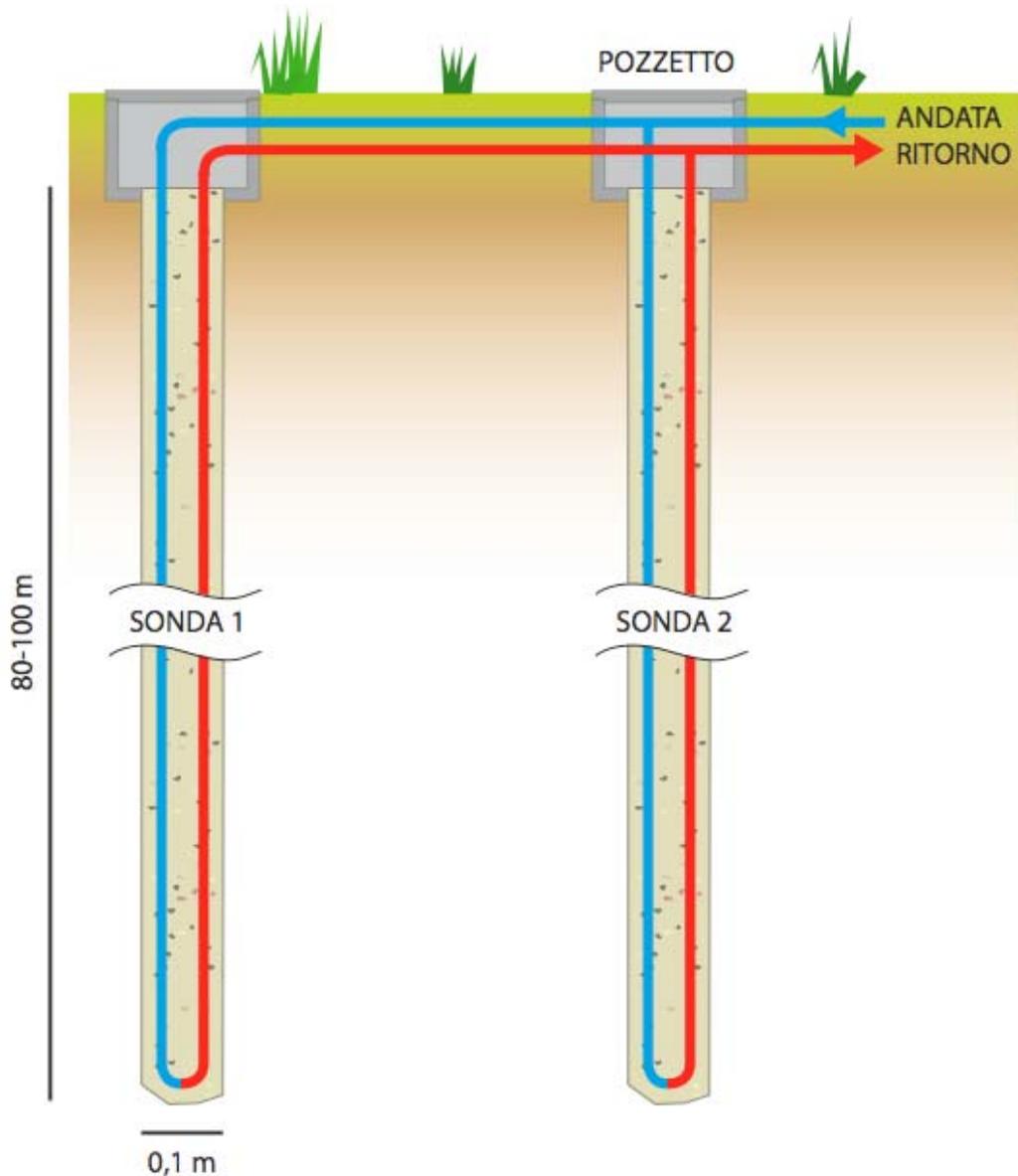
## 2.3 LA CAPTAZIONE DEL CALORE NEL SOTTOSUOLO

Il calore dal terreno è catturato o ceduto (nel caso di raffreddamento estivo) attraverso tre sistemi principali:

- Sonde verticali
- Pali energetici
- Dissipatori orizzontali

### 2.3.1 SONDE VERTICALI

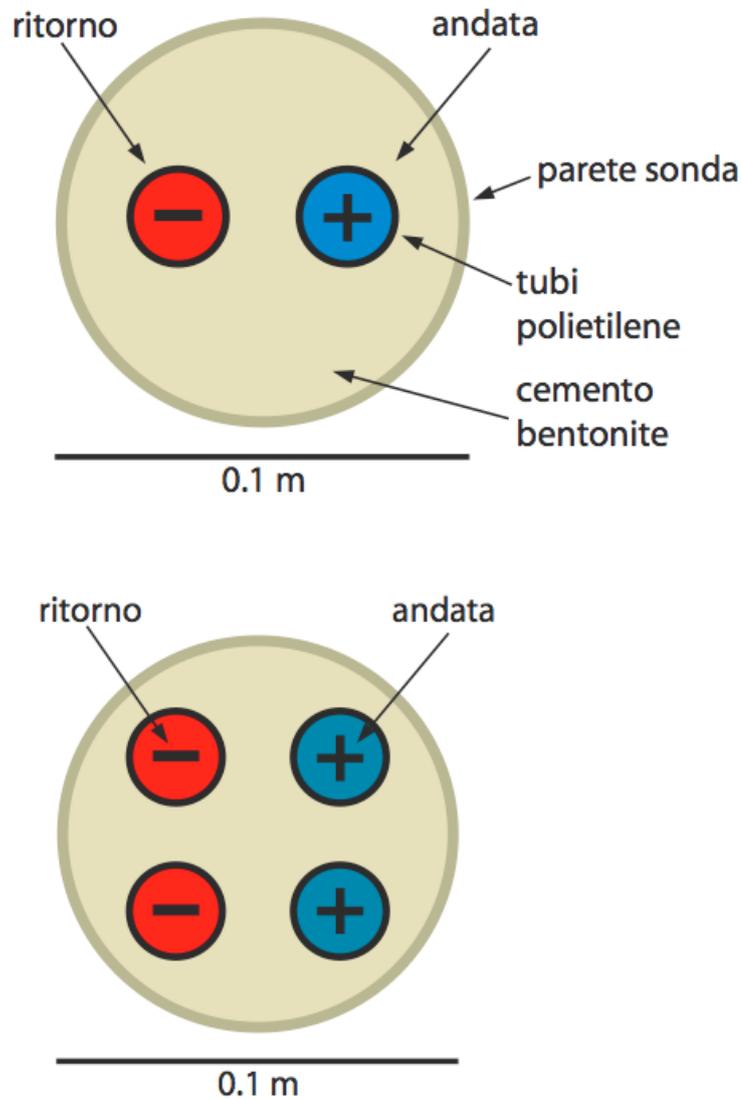
Questa è stata la prima soluzione adottata per lo sfruttamento del terreno con pompa geotermica. È il sistema più diffuso e studiato anche se di costi elevati. La sonda geotermica verticale viene creata partendo da una perforazione verticale di profondità compresa tra i 30 ed i 250 m. Questa è solitamente eseguita con gli stessi macchinari necessari per la realizzazione dei pozzi artesiani, il diametro è variabile a seconda del numero di tubazioni che ci si vuole calare dentro. Una volta creato il foro, il quale è pieno di fango bentonitico, vengono calati con l'aiuto di un peso uno o due tubi ad U (andata e ritorno) in materiale plastico, solitamente polietilene (conducibilità termica di 0,41 W/mK). Una volta in posizione il tutto, viene cementato con una miscela di cemento e bentonite per creare una continuità tra tubi e terreno. All'interno dei tubi, collegati in superficie tramite un collettore alla pompa di calore, scorrerà il fluido termovettore che può essere semplicemente acqua od una miscela al 20% d'acqua e fluido antigelo per evitare eventuali problemi di congelamento durante il periodo invernale. La profondità necessaria all'impianto viene calcolata in base alla portata del fluido termovettore, la potenza da dissipare o da cedere e la conducibilità termica dei vari materiali attraversati.



**Figura 9: Due sonde verticali collegate in parallelo in regime di riscaldamento invernale**

Numerosi modelli di calcolo e normative sono stati creati per il loro esatto dimensionamento, come la tedesca VDI 4640, sono state elaborate per la loro corretta realizzazione. In linea di principio si tende a garantire il maggior numero di metri di contatto tra sonda e terreno a temperatura costante (non disturbata dalle variazioni superficiali) ma ciò implica sonde molto profonde e quindi elevati costi di perforazione. Per ovviare a ciò si possono fare diverse sonde con profondità compresa tra gli 80-100 m collegate in parallelo (frazionando la portata di fluido proveniente dalla PDC). La

soluzione con due tubi ad U è maggiormente adottata oggi in quanto garantisce uno smaltimento o assorbimento specifico di calore maggiore rispetto alla soluzione classica di un tubo per metro lineare.



**Figura 10: Sezioni di sonda verticale nelle configurazioni di singolo e doppio tubo ad U (SUPSI 2002).**

### 2.3.2 PALI ENERGETICI

Si tratta dell'utilizzo dei pali di fondazione di edifici utilizzati come scambiatori di calore. Dove il terreno è cedevole per la costruzione di un edificio, spesso si ricorre ai pali di cemento armato nel terreno solidali alle fondamenta. Questi possono essere utilizzati come sonde geotermiche inserendo durante la preparazione della "gabbia di ferro" una serie di tubi di polietilene ad U adagiati sul

perimetro esterno in modo che siano vicino al terreno. Il loro diametro varia dai 0,4-1,5 m mentre la profondità può superare anche i 30 m.



**Figura 11-12: Preparazione di pali di fondazione geotermici (Svizzera energia 2002)**



Vista la loro scarsa profondità, solitamente se ne impiegano diversi per soddisfare le esigenze termiche dell'edificio. In fine sono sempre collegati ad un collettore ed in seguito ad una o più pompe di calore. L'utilizzo di questa soluzione tecnica si rivela particolarmente vantaggiosa in quanto fa risparmiare sui costi di perforazione ed installazione di sonde geotermiche

verticali dedicate, mentre i costi per i pali sono comunque sostenute in quanto necessarie per la costruzione dell'edificio. Ovviamente il sistema di condizionamento geotermico va pensato in fase di progettazione dell'edificio e quindi è una soluzione adottata solo per nuovi edifici. Molto sviluppata e diffusa in Svizzera, Austria e Germania con più di 350 installazioni, i pali di fondazione geotermici si prestano sia per piccole esigenze private (da pochi kW) che per grandi edifici industriali con impianti che superano gli 800 kW. Un

esempio dell'utilizzo di questa tecnologia è l'aeroporto "Dock Midfield" di Zurigo.

Entrato in funzione nel 2002, esso sfrutta 350 dei suoi 440 pali di fondazione come pali energetici di diametro compreso tra i 0,9-1,5 m e profondità di 30 m. Il raffreddamento estivo è fatto con tecnologia "freecooling", cioè utilizzando direttamente l'acqua del palo energetico nell'impianto radiante senza pompa di calore. Così facendo, si scaricano nel terreno circa 470 MWh di potenza, mentre in inverno il calore che si estrae è di 1100 MWh ed utilizzando la PDC si ha a disposizione acqua a 30-40°C.

### 2.3.3 DISSIPATORI ORIZZONTALI

I dissipatori orizzontali rappresentano una valida alternativa economica rispetto all'utilizzo delle sonde verticali. Si tratta della posa ad una profondità che può variare dai 1,5-2 m di tubi di polietilene in cui scorre il fluido termovettore e poi ricoperti dal terreno stesso. Le configurazioni possono essere molteplici ma quelle più utilizzate sono a parallelo ed a serpentina.

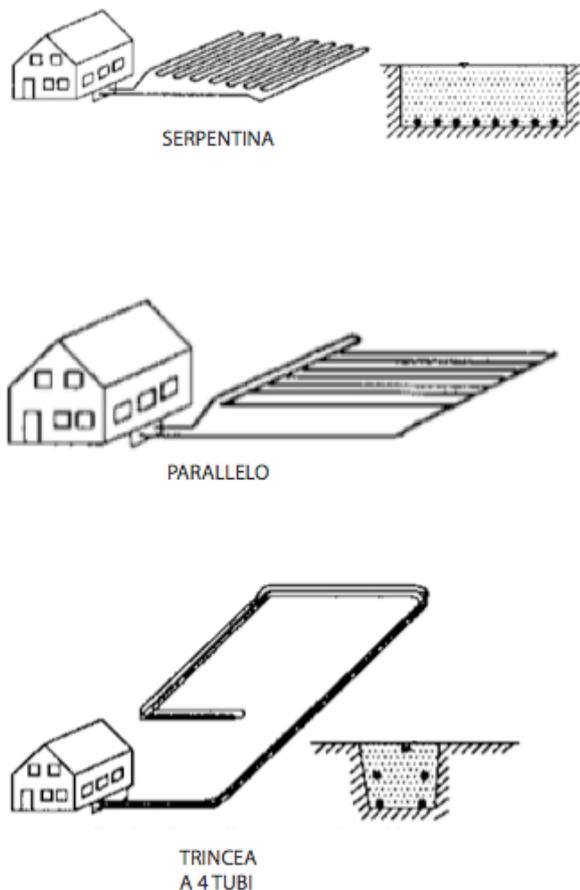


Figura 13: Configurazioni di serpentine orizzontali (De Carli, Del Bianco, Fellin, Manente, Tonon, Zecchin 2005)

Il tubo è direttamente a contatto con il terreno e ciò comporta una minor resistenza termica rispetto alle sonde verticali e quindi un'elevata capacità di scambio. Purtroppo i dissipatori orizzontali, essendo posati a bassa profondità, lavorano in un regime termico variabile durante l'anno e questo non garantisce sempre un ottimo rendimento (COP) della pompa di calore. Questo tende a peggiorare verso la fine della stagione invernale ed estiva, quando il terreno risulta molto sfruttato termicamente. Nelle configurazioni qui esposte il passo di solito adottato per la serpentina ed il parallelo è di 30-40 cm, la configurazione a trincea è meno utilizzata delle altre due e può essere a 2 o 4 tubi a seconda della portata da dover smaltire. I dissipatori sono in rapida diffusione poiché economici e di veloce posa. Sono indicati per gli edifici con impianti di piccole e medie dimensioni dotati di ampia superficie verde oppure con parcheggi in ghiaia. Essi sono poco conosciuti per tecniche di dimensionamento e per impatto sull'andamento della temperatura nel terreno superficiale e di conseguenza su flora e fauna (cosa che questa tesi si propone di fare).

Viene di seguito riportata la foto della messa in opera di un dissipatore orizzontale per una villa in località Camposampiero (PD) realizzata dalla ditta Aktis Italia S.r.l.. L'edificio è completamente riscaldato e raffrescato con sistema radiante, sfruttando un dissipatore geotermico orizzontale composto da 11 circuiti lunghi 100 m posati ad un passo di 0,33 m. I tubi di polietilene di 25 mm di diametro sono poi disposti a serpentina per poter essere adagiati in una fossa larga 20 m e lunga 18 m e di profondità 1,5 m.



**Figura 14: Serpentina in località Camposampiero (PD) (fonte Aktis Italia S.r.l.)**

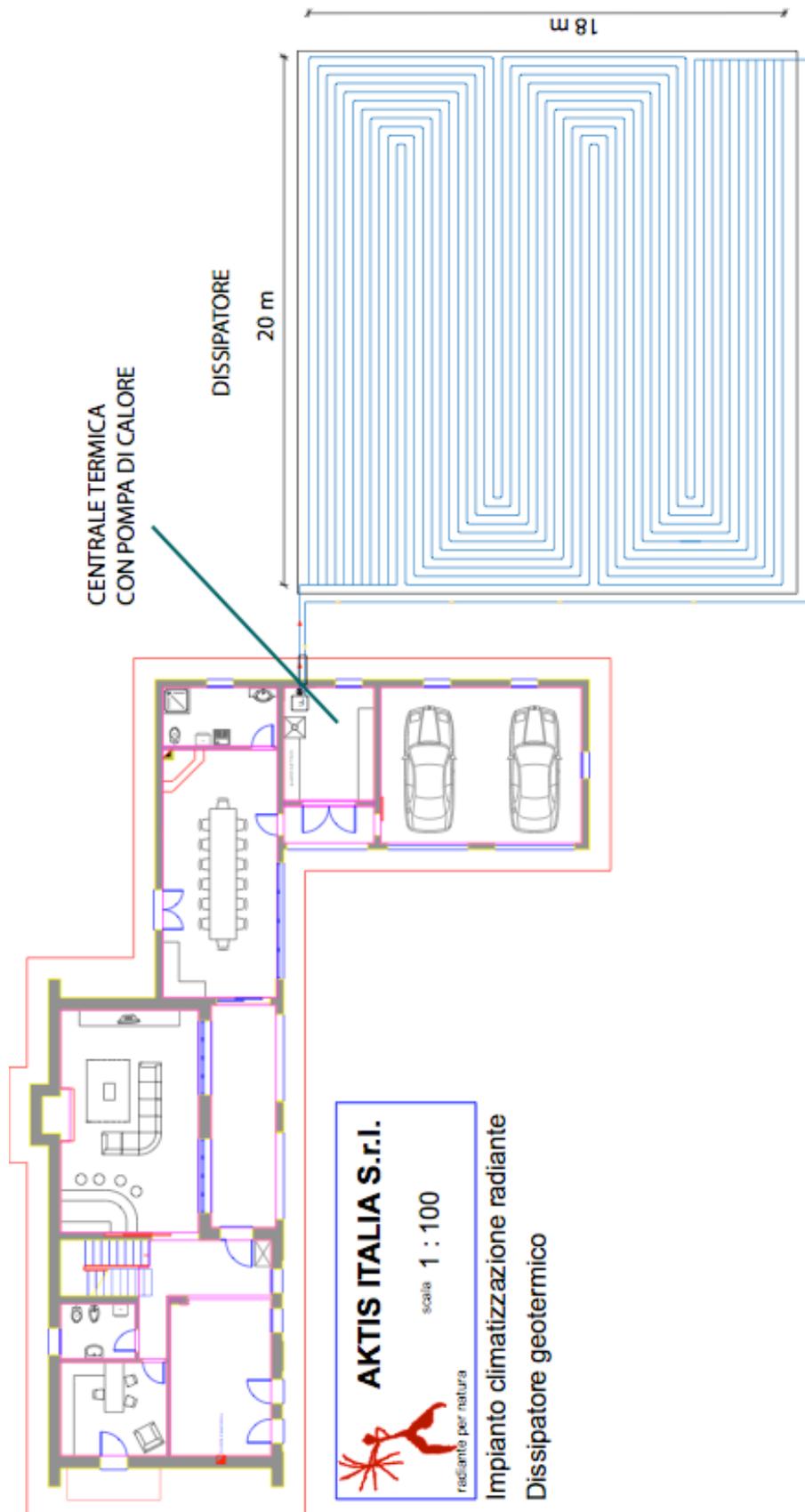
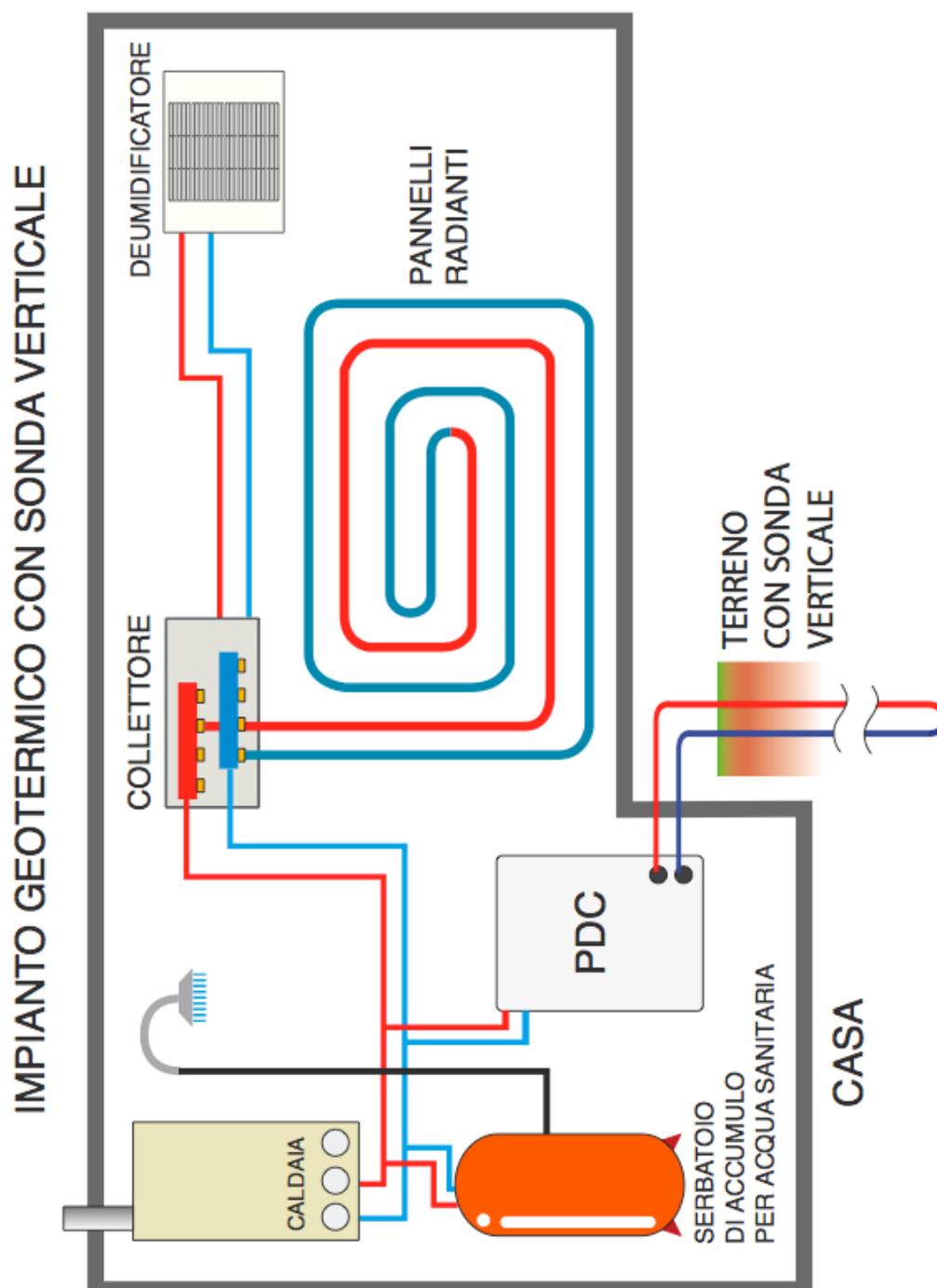


Figura 15: Pianta villa (fonte Aktis Italia S.r.l.)

## 2.3.4 IMPIANTI

Un layout classico d'impianto geotermico con pompa di calore viene presentato nel disegno seguente. Esso mostra i componenti che necessari per un corretto funzionamento dell'impianto (impianto proposto dall'azienda Aktis Italia s.r.l.). (Figura 16 impianto)



In esso la pompa di calore è collegata esternamente con una sonda verticale (possono essere anche più di una). L'acqua dell'impianto lascia la pompa di calore ed attraverso un collettore dissipa calore o ne assorbe nell'impianto radiante a pavimento. Per il raffrescamento estivo è inserito anche un deumidificatore a muro. La caldaia tradizionale è compresa nell'impianto in quanto fornisce l'acqua sanitaria che viene contenuta nel serbatoio d'accumulo. L'impianto viene comandato con una centralina elettronica che attraverso sensori individua automaticamente la temperatura nei vari ambienti e regola il funzionamento della macchina frigorifera. Lo stesso impianto può utilizzare anche il dissipatore orizzontale.

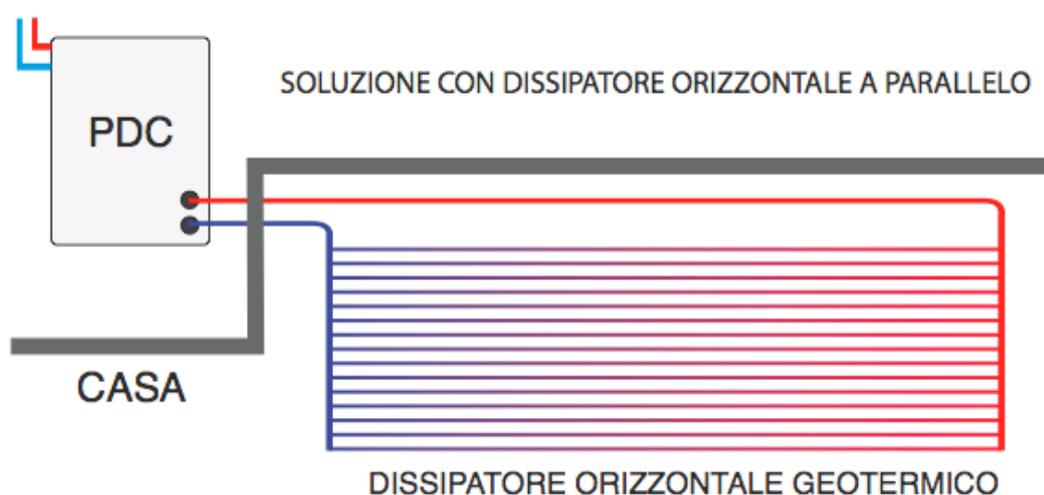


Figura 17: Impianto con dissipatore orizzontale

### CAPITOLO 3

#### MODELLISTICA PER SONDE VERTICALI E DISSIPATORI ORIZZONTALI.

In questo capitolo si vuole presentare una panoramica su alcuni modelli matematici di scambio termico presenti in bibliografia riguardanti impianti geotermici.

Per ciò che riguarda impianti dotati di dissipatori a sonde verticali è presente una nutrita modellazione matematica di provenienza svedese, (Claesson e Eskilson 1987) in quanto, gli scambi termici che interagiscono tra terreno e sonde sono stati ampiamente studiati e documentati dai ricercatori svedesi Claesson ed Eskilson a partire dalla seconda metà degli anni ottanta. Al contrario, per ciò che riguarda la caratterizzazione degli scambi termici per dissipatori orizzontali posti a bassa profondità, esistono pochi studi ed il loro dimensionamento si basa essenzialmente sulle capacità di scambio tabellate a seconda del terreno in cui si trova lo scambiatore orizzontale.

Com'è stato illustrato precedentemente le sonde verticali sono delle perforazioni riempite di cemento e bentonite in cui sono annegati tubi a singola o doppia U di polietilene in cui scorre il fluido termovettore. Questo scambia calore con il terreno attraverso due meccanismi: convezione e conduzione termica. In dettaglio il fluido termovettore scambia per convezione forzata con la parete del tubo in polietilene, in seguito per conduzione attraverso lo strato di bentonite ed in fine ancora per conduzione attraverso gli strati di terreno attraversati dalla sonda. Si parla di convezione forzata, in quanto il fluido è forzato dalla pompa di calore a scambiare calore nella sonda:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{in} - T_{out})$$

Dove:

- Q potenza termica scambiata (W)
- m portata in massa di fluido termovettore (kg/s)
- $c_p$  capacità termica massica del fluido termovettore (J/kgK)
- $T_{in}$  temperatura in ingresso del fluido (°C o K)
- $T_{out}$  temperatura in uscita del fluido (°C o K)

La conduzione monodimensionale viene espressa attraverso la seguente formula : (SUPSI 2002)

$$\frac{Q}{A} = \lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

Dove:

- $Q/A$  flusso di calore attraverso un'area ( $W/m^2$ )
- $\lambda$  Conducibilità termica del mezzo ( $W/mK$ )
- $grad T$  esprime il gradiente nella direzione  $x$  ( $K/m$ )

La conducibilità termica del mezzo si vedrà più approfonditamente più avanti è un parametro caratterizzante il terreno e per ciò estremamente importante al fine di un giusto dimensionamento dell'impianto stesso. Volendo fare un bilancio in tre dimensioni di scambio termico nel tempo per un mezzo la cui conducibilità termica non dipende dalla temperatura si ha:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T$$

Dove:

- $T$  temperatura tridimensionale ( $^{\circ}C$ )
- $t$  tempo (s)
- $a$  diffusività termica del mezzo ( $m^2/s$ )

Quest'ultima è pari  $\lambda/\rho C$  dove  $\rho C$  è la capacità termica volumetrica del mezzo ( $J/m^3K$ ). La diffusività termica è un parametro molto importante in quanto caratterizza il comportamento in transitorio del terreno nel ricevere o cedere calore dalla sonda geotermica.

### 3.1 FLUSSO DI CALORE NEL TERRENO

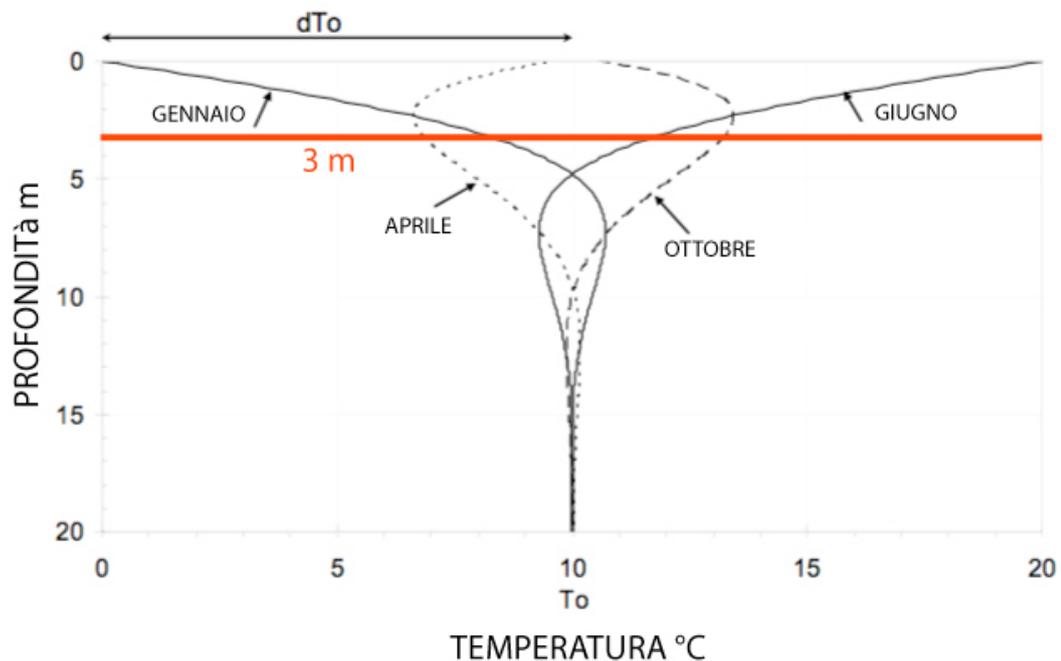
Il flusso che attraversa il terreno è composto principalmente da due aspetti: uno di profondità ed uno di superficie: il primo è il gradiente di flusso geotermico che normalmente è pari a  $0,06 W/m^2$  e che instaura un gradiente di temperatura crescente con la profondità pari circa a  $3^{\circ}C$  ogni 100 m. Questo può essere chiaramente maggiore in zone di anomalia termica dovute a situazioni geologiche particolari presenti in profondità. Il secondo aspetto importante che influenza gli strati superficiali di terreno e quindi, molto importante per lo studio gli scambiatori superficiali è la propagazione dell'onda di calore superficiale attraverso il terreno. Questa è esprimibile attraverso: (SUPSI 2002)

$$T(z,t) = T_0 + dT_0 \cdot \exp(-z / \delta) \cdot \cos(\omega(t - t_0) - z / \delta)$$

Dove:

- $T(z,t)$  temperatura del terreno ( $^{\circ}\text{C}$ ) alla profondità  $z$  (m) ed al tempo  $t$  (s)
- $T_0$  temperatura media al terreno ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $dT_0$  variazione d'ampiezza dell'onda di calore in superficie (K)
- $\delta = \sqrt{2a/\omega} = \sqrt{aT/\pi}$  profondità di penetrazione dell'onda di calore (m)
- $a$  diffusività termica del mezzo ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $t_0$  tempo per il quale la temperatura resta massima in superficie.

Applicando la sopra citata formula si nota che l'onda di calore viene notevolmente attenuata al crescere della profondità e quindi si può considerare la temperatura del terreno pressoché costante ad una profondità di 10 m circa.



**Figura 6: Profilo di temperatura in base alla profondità in diversi mesi dell'anno. (Supsi 2002)**

Il grafico sopra mostra appunto l'andamento della temperatura in funzione della profondità su un'escursione termica di  $20^{\circ}\text{C}$  e con un terreno di diffusività termica di  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Dai risultati ottenuti si denota che la temperatura del terreno nel primo metro di profondità risulta notevolmente disturbata, mentre tende a stabilizzarsi con il crescere della profondità.

### 3.2 BOREHOLE HEAT EXCHANGER CALCULATION

Sulla situazione di flusso geotermico sopra esposta andiamo ora ad analizzare il principio del modello matematico di scambio termico per sonda verticale elaborato da Claesson ed Eskilson. Si prende in esame una sonda verticale di diametro compreso tra 10 cm con due tubi ad U inseriti al suo interno e si vuole valutare la quantità di calore media annuale che può essere estratta dal terreno.

La variazione di temperatura del terreno superficiale annua non viene considerata in quanto analizziamo sonde con profondità di 80-100 m e ciò permette di assumere la temperatura in superficie  $T_0$  costante pari alla temperatura media annuale dell'aria. Il flusso geotermico  $q_{geo}$  (pari a  $0,065 \text{ W/m}^2$ ) è considerato costante ed è responsabile del gradiente geotermico.

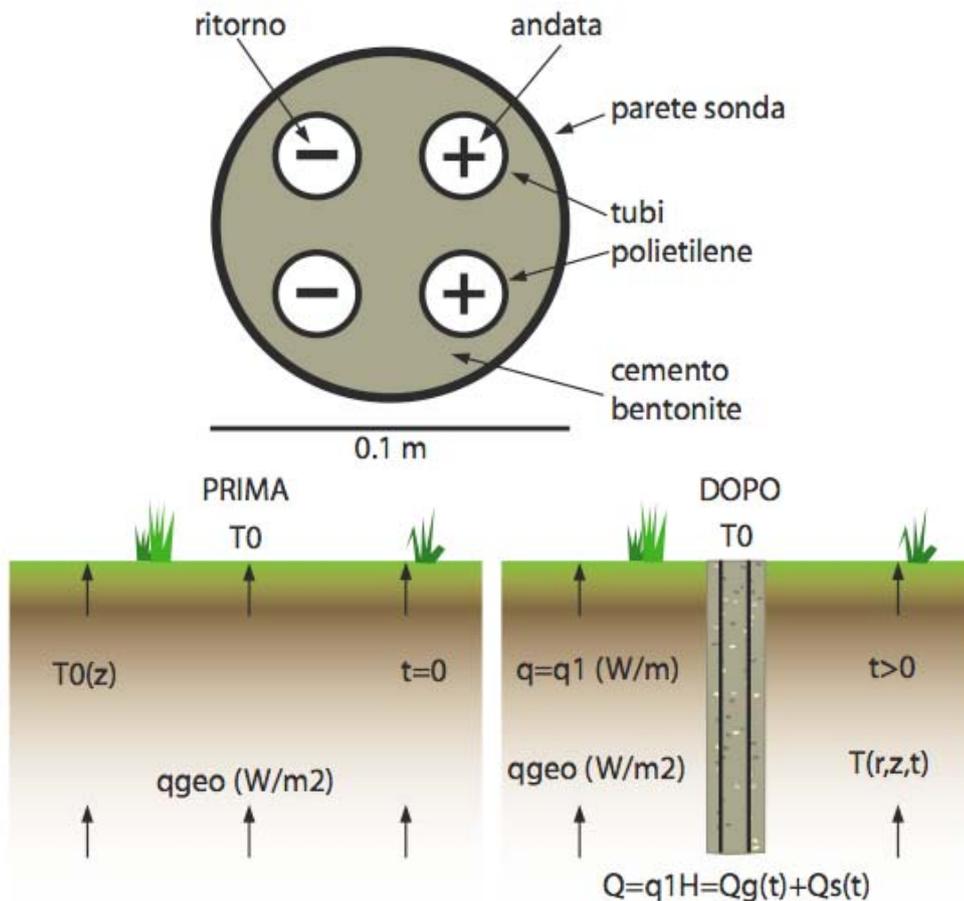


Figura 7 sezione della sonda verticale ed andamento dei flussi di calore (Supsi 2002)

In condizioni stazionarie la temperatura del terreno è stabile e dipende solo dalla profondità  $z$ . Ora consideriamo la presenza della sonda che estrae un certo quantitativo medio di calore per metro lineare:

$$q_1 = \frac{Q}{H}$$

dove:

- $q_1$  calore per metro lineare (W/m)
- $Q$  calore totale estratto (W)
- $H$  lunghezza attiva totale della sonda (m)

Il calore  $Q$  estratto dalla sonda è pari anche a:

$$Q = q_1 H = Q_s(t) + Q_g(t)$$

In profondità, molto al di sotto della sonda il  $q_{geo}$  resta costante in quanto non influenzato dalla sonda. In superficie, un flusso  $q_{surf}(r,t)$  funzione del raggio e del tempo fluisce dall'ambiente alla superficie e si somma al flusso geotermico che invece l'attraversa e si disperde nell'ambiente. La potenza termica  $Q_s(t)$ , che risulta dall'integrazione del precedente flusso attraverso la superficie è chiamata fonte di energia di contorno ed è una parte dell'energia che viene estratta dalla sonda. Il contributo netto derivante dall'ambiente è conosciuto tramite l'integrazione del flusso attraverso la superficie:  $(q_{surf}(r,t) - q_{geo})$  ed è positivo. La seconda componente  $Q_g(t)$  è la potenza estratta dalla capacità termica del suolo e questa è presente solo durante regimi transitori, cioè quando la temperatura del terreno varia in funzione delle condizioni ambientali. Ricapitolando il calore estratto dalla sonda è composto di tre apporti:  $q_1$  è la quota di estrazione di calore che corrisponde all'energia termica annuale estratta,  $q_p$  rappresenta le variazioni stagionali ed in fine  $q_m$  rappresenta la quota di estrazione massima a breve periodo all'accensione della sonda. Si tratta di un'energia molto piccola e relativa ad un periodo breve e quindi può essere trascurata.

Queste tre componenti possono essere calcolate analiticamente in condizioni stazionarie o di transitorio, una volta fornite le caratteristiche ambientali, geometriche della sonda e caratteristiche del terreno con formule elaborate da Claesson ed Eskilson. Sono state elaborate delle funzioni, implementate in software dedicati, chiamate "g-function" che permettono di trovare la temperatura della parete esterna della sonda  $T_b$  a partire dalla quantità di calore estratto, dalle configurazioni spaziali in caso di più sonde e dalla temperatura del terreno indisturbato. Un altro parametro d'estrema importanza per conoscere il comportamento di una singola sonda è la sua resistenza termica chiamata  $R_b$  (resistance borehole). Si tratta di un parametro proporzionale che mette in relazione la

differenza di temperatura tra sonda e terreno ed il calore scambiato con esso (Hellstrom 1991, SUPSI 2002):

$$T_b - T_f = q \cdot R_b \quad (T_b - T_f) = q \cdot R_b$$

$$T_f = \frac{1}{2}(T_{in} - T_{out})$$

Dove:

- $T_b$  è la temperatura alla parete esterna della sonda ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_f$  temperatura media del fluido termovettore nella sonda ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $q$  calore estratto su ogni metro lineare ( $\text{W/m}$ )
- $R_b$  resistenza della sonda ( $\text{K}/(\text{W/m})$ )

La resistenza della sonda dipende da parametri geometrici della stessa quali: diametro della sonda, numero di tubi interni e profondità, inoltre dipende da caratteristiche dei materiali usati per costruirla come la conducibilità termica del polietilene e della miscela bentonitica. Considerando una quantità di calore da scambiare con il terreno pari a  $35 \text{ W/m}$  (valore medio tipico per terreni argillosi umidi) ed una resistenza  $R_b$  pari a  $0,1 \text{ K}/(\text{W/m})$  è possibile individuare un  $\Delta t$  tra temperatura esterna alla sonda e fluido pari a  $3,5^{\circ}\text{C}$  e ciò rappresenta una misura del calore perso che si ha solo sulla sonda. Individuare un corretto valore sperimentale per questo parametro è di notevole importanza per un giusto dimensionamento delle sonde e ciò viene fatto con il test di risposta geotermica che vedremo nel capitolo successivo.

### 3.3 STOCCAGGIO DI CALORE NEL SOTTOSUOLO (RAFFRESCAMENTO ESTIVO)

La sonda geotermica preleva calore nel sottosuolo per cederlo alla pompa di calore per il riscaldamento. In estate, allo stesso modo essa può cedere calore al terreno per il raffrescamento utilizzando il terreno come serbatoio di stoccaggio del calore.

I metodi di stoccaggio del calore nel sottosuolo principali sono:

- Metodo con sonde verticali, il calore viene trasmesso al suolo attraverso conduzione ed un grande volume di terreno può essere utilizzato
- Utilizzo di sonde orizzontali poste a bassa profondità, il trasferimento di calore avviene sempre per conduzione.
- Stoccaggio in acquifero, sonde verticali scambiano calore per convezione e conduzione con terreni saturi d'acqua ed è il sistema ideale per cooling estivo.

- Stoccaggio in acqua, il calore viene trasmesso per convezione ad una massa d'acqua contenuta in un serbatoio posto sotto il terreno.

I metodi più economici sono il primo ed il terzo, in questa sede analizzeremo il sistema a sonde verticali con scambio conduttivo con il terreno. La sonda, che è allo stesso tempo una sonda di scambio termico e di stoccaggio, ha scarse capacità di trasferimento termico dovuto principalmente al fatto che lo scambio avviene per conduzione verso terreni che spesso hanno una bassa conducibilità termica. Le caratteristiche da analizzare sono:

- Capacità di trasferimento del calore.
- Capacità specifica di stoccaggio.
- Efficienza di stoccaggio.

Capacità di trasferimento del calore:

Sotto l'apporto costante di un flusso di calore, si sviluppa una differenza di temperatura tra fluido (il più caldo) ed il terreno, questa differenza di temperatura incrementerà fino a quando non si arriverà ad un flusso stazionario. A questo punto la temperatura media del terreno crescerà con lo stesso ritmo alla quale cresce quella del fluido, quindi la loro differenza rimarrà costante e stabile fino a quando continua l'afflusso stesso.

UA è definita la capacità di trasporto del calore in condizioni stazionarie e definisce la quantità di calore trasferita per unità di differenza di temperatura tra le temperature medie del fluido termovettore e il terreno. Per il periodo transitorio UA non può essere utilizzata e quindi questo periodo si valuta come:

$$t_{sf} = 0,065 \frac{A_p}{a}$$

dove :

- $t_{sf}$  è il tempo richiesto per lasciare il regime transitorio (s) (solitamente una settimana)
- $A_p$  è l'area di terreno interessato dalla singola sonda ( $m^2$ ) (solitamente  $3 m^2$ )
- $a$  è la diffusività del terreno ( $m^2/s$ ) ( $10^{-6} m^2/s$ )

UA dipende dalla lunghezza della sonda e dalla sua resistenza termica durante il flusso a regime. La resistenza totale  $R_{sf}$  è data dalla somma delle resistenze termiche della sonda ( $R_b$ ) e di quella del terreno come mostra la seguente equazione:

$$R_{sf} = \frac{1}{2\pi\lambda} \left[ \ln \left( \frac{\sqrt{A_p}}{\sqrt{\pi} \cdot r_b} \right) - 0,75 \right] + R_b$$

valida se:

$$15 \leq \frac{\sqrt{A_p}}{r_b \cdot \sqrt{\pi}}$$

dove:

- $R_{sf}$  resistenza totale (K/(W/m))
- $\lambda$  conducibilità termica media del terreno (W/mK)
- $r_b$  raggio della sonda (m)
- $R_b$  resistenza effettiva della sonda.

Mentre UA viene calcolata come:

$$UA = \frac{nH}{R_{sf}}$$

dove:

- UA capacità di trasferimento del calore (W/K)
- n numero di sonde presenti nel campo geotermico
- H lunghezza attiva di ogni singola sonda (m)

La stima della quantità di calore trasferibile durante la fase di flusso stazionario è valutabile con la seguente equazione utilizzando UA precedentemente trovata e il salto di temperatura tra fluido e terreno:

$$P = UA(T_f - T_{storage})$$

dove:

- P calore scambiato dalla sonda (W)
- $T_f$  temperatura media del fluido termovettore (°C)
- $T_{storage}$  temperatura media del terreno di stoccaggio (°C)

Capacità specifica di stoccaggio:

La capacità specifica di stoccaggio è definita come l'ammontare d'energia termica necessaria per far aumentare di un grado celsius il volume di terreno coinvolto dal riscaldamento. Questo valore è definito dalla seguente equazione:

$$C_{sp} = \rho C \cdot V = \rho C \cdot n \cdot A_p \cdot H$$

dove:

- $\rho C$  è la capacità termica volumetrica del mezzo ( $J/m^3K$ )
- $V$  volume del terreno coinvolto nello stoccaggio ( $m^3$ )
- $C_{sp}$  capacità specifica di stoccaggio ( $J/K$ )

Un altro parametro interessante da valutare è la capacità di stoccaggio  $C$ , definita come la massima quantità d'energia che può essere stoccata ed è definita come:

$$C = C_{sp} (T_{storage,max} - T_{storage,min})$$

dove:

- $T_{storage,max}$  e  $T_{storage,min}$  sono rispettivamente la massima e minima temperatura media del terreno di stoccaggio durante un anno (un ciclo).

Ovviamente queste sono influenzate dall'impianto geotermico che opera sullo stoccaggio ed in particolare dalle temperature d'esercizio del fluido termovettore.

Efficienza di stoccaggio:

L'efficienza di stoccaggio  $\eta$  esprime un rendimento di stoccaggio in un ciclo:

$$\eta = \frac{Q_{estratto}}{Q_{iniettato}}$$

I due calori ( $W$ ) sono rispettivamente quelli estratto (durante il periodo invernale) e iniettato durante il periodo estivo. Se consideriamo che la temperatura dello stoccaggio torni allo stesso valore dopo un anno (un ciclo) il rendimento può essere espresso anche come:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{perso}}}{Q_{\text{iniettato}}}$$

in questa viene messo in evidenza il calore perso in un ciclo, esso influenza notevolmente il rendimento, il quale, è tanto più elevato quanto più è piccolo il rapporto. Il rendimento può essere pari al 60-90% se le temperature d'esercizio dell'impianto sono basse mentre per valori elevati il rapporto fa sentire il suo peso ed il rendimento cala. In linea di principio possiamo dire che il calore perso dipende dalla superficie dello stoccaggio rispetto al volume dello stesso, per piccoli volumi di stoccaggio (10000-20000 m<sup>3</sup>) si ha un rendimento pari al 30-60% mentre per stoccaggi più grandi (>20000 m<sup>3</sup>) si può raggiungere anche 80%.

Il calore perso dipende essenzialmente dalla temperatura media dello stoccaggio e da quella media nell'ambiente esterno, inoltre è funzione di un fattore proporzionale U e dell'area di contorno dello stoccaggio A. Se il processo di scambio è prevalentemente conduttivo il calore perso è esprimibile da:

$$Q_{\text{perso}} = U \cdot A \cdot (\bar{T}_{\text{storage}} - \bar{T}_0) t_{\text{anno}}$$

dove:

- Q calore perso (J)
- U fattore di calore perso equivalente (W/m<sup>2</sup>K)
- T<sub>storage</sub> temperatura media annuale dello stoccaggio (°C)
- T<sub>0</sub> temperatura media annuale dell'ambiente (°C)
- T<sub>anno</sub> è il tempo in secondi di un anno (s)

Il calore perso può essere ridotto con alcuni accorgimenti quali un buon isolamento in superficie dello stoccaggio, avere uno sviluppo verticale dello stesso e quindi poco a contatto con la superficie esterna ed in fine una bassa temperatura nello stoccaggio.

Come abbiamo visto, per la caratterizzazione dei fenomeni di scambio con sonde verticali sia per riscaldamento che per raffrescamento è presente una forbita documentazione matematica che a volte può risultare difficile da utilizzare. Ciò ha spinto le aziende del settore ed i ricercatori a sviluppare software di simulazione dedicati che permettono una rapida caratterizzazione della sonda geotermica in base ai parametri geometrici ed alle caratteristiche di conducibilità degli strati di terreno attraversati. Questi programmi sono di estrema utilità ai progettisti e degli impianti in quanto permettono di stabilire, con buona approssimazione, la dimensione ed il numero di sonde che servono per una determinata richiesta energetica. I più diffusi e conosciuti sono: Earth Energy Designer (EED) sviluppato dall'università di

svedese di Lund ad opera di Claesson, Eskilson ed Hellstrom e Pilesim2, sviluppato dall'università svizzera di Lugano. Nel primo sono state implementate le "g-function", che permettono di ricostruire il campo termico nell'intorno della sonda in base alle caratteristiche della stessa ed al calore estratto, inoltre è possibile stabilire le temperature in ingresso ed in uscita del fluido termovettore. Il secondo software, oltre a basarsi sulle formule utilizzate da EED, permette lo studio del sistema in raffrescamento e caratterizza il comportamento dei pali di fondazione utilizzati come sonde di scambio.

### 3.4 MODELLO GAIA

Fino ad ora abbiamo esposto i principali metodi matematici per poter studiare il comportamento di sonde verticali, purtroppo, come già detto in precedenza manca completamente un approccio simile per quello che riguarda gli scambiatori a serpentine orizzontali.



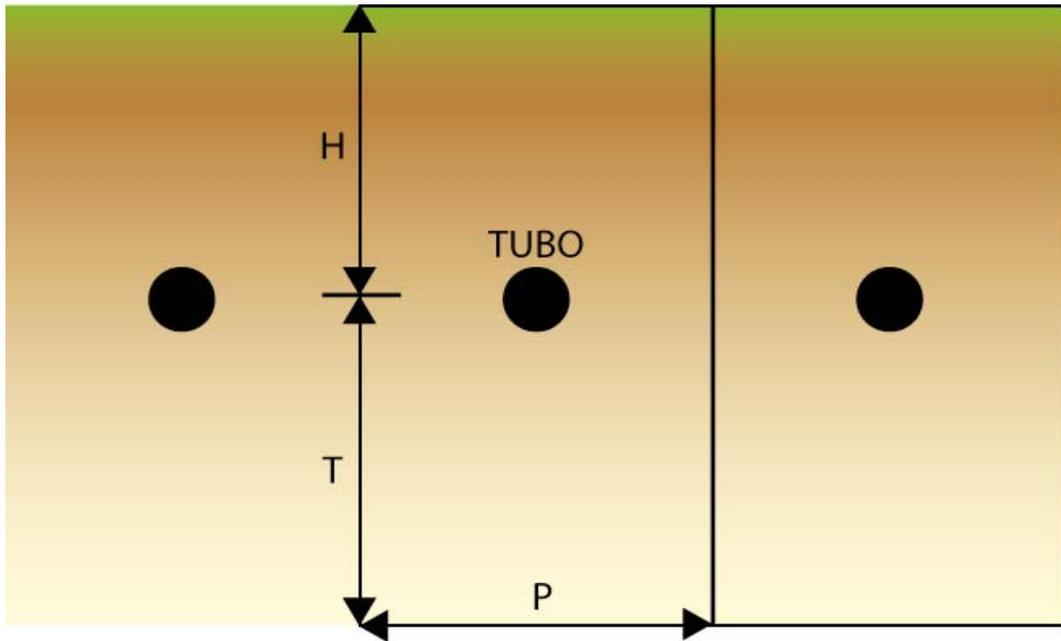
**Figura 8: Sonda orizzontale a serpentina in serie (CDA 2007)**

Solitamente il loro dimensionamento si basa su capacità di estrazione del calore tabellati a seconda dei terreni senza un accurato studio e dimensionamento. In questa sede riportiamo uno dei rari modelli sviluppato per questo particolare tipo di scambiatori. Questo modello matematico, chiamato Gaia è stato messo a punto da alcuni professori e ricercatori del dipartimento di fisica tecnica dell'Università di Padova per studiare il rendimento delle serpentine orizzontali associate a pompe geotermiche. Purtroppo il codice non è stato implementato in un software in commercio, quindi non è disponibile per il mondo tecnico-lavorativo, il quale continua ad utilizzare valori tabellati per il dimensionamento. Questo è un codice di calcolo alle differenze finite che utilizza una discretizzazione basata parzialmente su coordinate cilindriche.

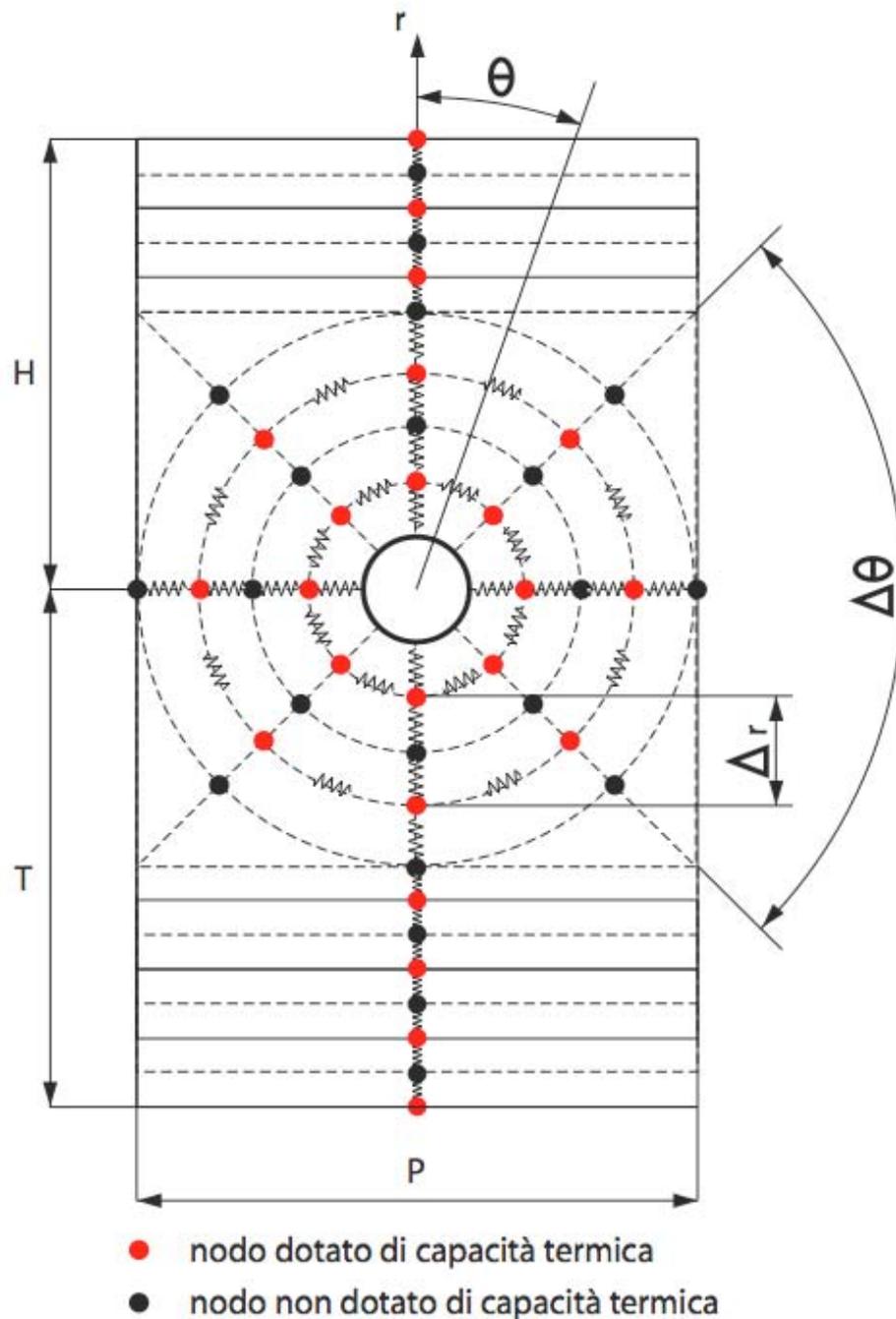
Le serpentine di scambio prese in considerazione per questo modello sono di tipo in serie dove un unico tubo di polietilene è steso ad una profondità di 2,5m e con un passo di 2m (figura 3).

Come ipotesi di lavoro è stato escluso lo scambio di calore tra un tubo e quelli vicini (condizioni adiabatica) e quindi lo scambio avviene solo con gli strati di terreno adiacenti e vicini al tubo stesso.

Il terreno viene così diviso in blocchi definiti da una propria capacità termica e connessi gli uni con gli altri attraverso delle resistenze termiche, secondo l'analogia resistenze capacità. Solo i nodi dotati di massa hanno una capacità, in quanto rappresentano la concentrazione in un solo punto della massa del concio che rappresentano.



**Figura 9: Sezione verticale fatta sulla serpentina in cui si evidenziano le porzioni di terreno coinvolte da ogni sezione di tubo, sono messi in evidenza anche i parametri geometrici caratteristici del modello GAIA (CDA 2007).**



**Figura 10: Schema di condensatori e resistenze utilizzati da GAIA per discretizzare e descrivere il terreno (CDA 2007)**

La discretizzazione nell'intorno del tubo è basata su coordinate cilindriche quali l'angolo  $\theta$  ed il raggio  $r$ , mentre per il terreno lontano da esso si assume una discretizzazione a strati orizzontali.

Ogni blocco è definito da indici di posizione  $i,j$ , considerando il bilancio dei flussi termici riferiti all'unità di lunghezza del tubo e per

un generico nodo di massa  $i,j$  si ottiene la seguente equazione differenziale discretizzata:

$$\lambda_{i,j} \Delta r \frac{(T_{i,j-1} - T_{i,j})}{\frac{r_i \Delta \theta}{2}} + \lambda_{i,j} \Delta r \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j})}{\frac{r_i \Delta \theta}{2}} + \lambda_{i,j} \left( r_i - \frac{\Delta r}{2} \right) \Delta \theta \frac{(T_{i-1,j} - T_{i,j})}{\frac{\Delta r}{2}} + \lambda_{i,j} \left( r_i + \frac{\Delta r}{2} \right) \Delta \theta \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j})}{\frac{\Delta r}{2}} = \rho_{i,j} c_{i,j} r_i \Delta \theta \Delta r \frac{(T_{i,j} - T_{i,j}^{\Delta \tau - 1})}{\Delta \tau}$$

Dove:

- $\lambda_{i,j}$  = conducibilità termica del punto  $i,j$  (W/m<sup>3</sup>K)
- $\Delta \theta$  = angolo di differenza tra due punti in gradi
- $\Delta r$  = differenza di raggio tra due punti sulla stessa direttrice (°C)
- $r_i$  = raggio del punto  $i$  (m)
- $T_{i,j}$  = temperatura nel punto  $i,j$  (°C)
- $\rho c_{i,j}$  = capacità termica volumetrica del mezzo (J/m<sup>3</sup>K)
- $\tau$  = tempo, ( $\Delta \tau$  è la discretizzazione del tempo)

Ogni sistema d'equazioni, legato all'elemento di tubo considerato, viene connesso al successivo elemento mediante la condizione di continuità, dunque portata in massa e temperatura del fluido (come si può vedere sotto). Per ciascun elemento longitudinale viene istituito un sistema d'equazioni da risolvere nelle incognite  $x$  temperature dei nodi:  $[A](X)=[B]$ .

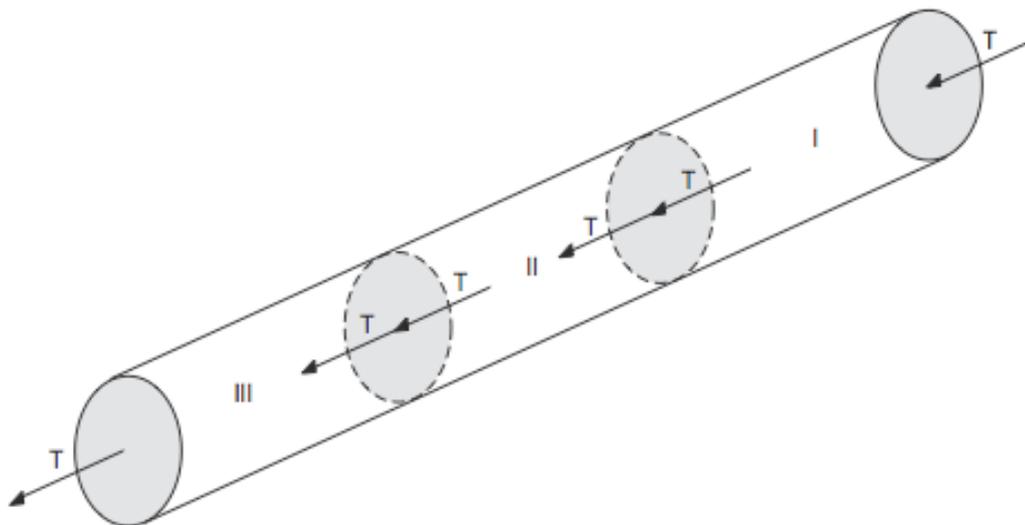


Figura 11: Schema longitudinale del tubo per la continuità (CDA 2007)

Una volta ottenute le temperature nei vari nodi non è difficile ricostruire il campo termico del terreno nell'intorno della sonda, valutando il rendimento della geometria della serpentina. In fine, in base alla portata di fluido termovettore nelle sonde, si può ricavare il flusso scambiato mediante l'espressione di scambio per convezione: (Kreith 1974)

$$Q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})$$

dove:

- Q calore scambiato (W)
- $\dot{m}$  portata in massa (kg/s)
- $c_p$  capacità termica (J/kgK)
- T temperature d'ingresso ed uscita dalla serpentina

Quindi è possibile valutare la resa termica specifica media per unità di lunghezza.

I ricercatori dell'università di Padova hanno messo a punto questo modello per studiare il rendimento delle serpentine orizzontali in base alle loro caratteristiche geometriche:

P passo e H profondità di posa. Una volta tarato il modello, è stato possibile valutare l'influenza dei parametri geometrici in base alla resa termica lineare, sia in inverno che in estate.

Sono state prese in considerazione due configurazioni:

- Configurazione 1: H=2,5m P=5m
- Configurazione 2: H=4m P=2m

Indipendentemente dalle configurazioni, si può notare un picco della resa termica media lineare all'inizio della stagione invernale in quanto il terreno è stato notevolmente riscaldato durante il periodo estivo. La stessa cosa avviene all'inizio dell'estate quando la serpentina inizia a cedere calore al terreno il quale ha una temperatura bassa poiché è stato raffreddato durante l'inverno. Durante l'inverno (in condizioni di riscaldamento) la configurazione 1 risulta più efficiente della 2 poiché la serpentina usufruisce dell'irraggiamento solare. Al contrario, in estate la soluzione a 4m di profondità risulta molto più efficiente poiché la sonda può scambiare con una maggior quantità di terreno non disturbato.

Sono state prese in esame anche altre configurazioni, sempre analizzate con il modello GAIA, e si è osservato che passando da situazioni con H=2,5m e P=2m a soluzioni con H=4m si ha un aumento in resa termica del 28% circa. Questo miglior rendimento però è vanificato da un eccessivo costo necessario per uno sbancamento fino a 4m di profondità. Riassumendo, la

configurazione maggiormente interessante e che offre un ottimo bilancio tra costi d'esecuzione e benefici è quella con passo P di 2 m e profondità H di 2,5 m. Purtroppo questo tipo di configurazione è difficilmente utilizzabile in quanto un passo di 2 m obbligherebbe all'utilizzo di una superficie enorme per poter scambiare completamente con il terreno le potenze richieste dagli impianti geotermici. Solitamente si ricorre a configurazioni di 1,5-1,8 m di profondità di posa con un passo tra i tubi in polietilene di 30-40 cm.

## CAPITOLO 4

### TEST DI RISPOSTA GEOTERMICA

#### 4.1 INTRODUZIONE AL TEST

Com'è stato illustrato nel capitolo precedente risulta molto importante conoscere la resistenza reale di una sonda verticale per poter capire la sua capacità di scambio e decidere quante sonde costruire in funzione all'energia (kW) che deve essere smaltita o fornita all'impianto.

Se per impianti di piccole dimensioni non è scorretto usare valori di  $R_b$  (K/(W/m)) stimati in base alle caratteristiche della sonda ed utilizzare valori di conducibilità termica  $\lambda$  (W/mK) del terreno tabellati, questo non è più possibile per impianti di notevoli dimensioni. Per questi, con potenze maggiori di 30 kW e con un numero superiore a 10 sonde, si rende necessario fare un test di risposta geotermica.

Il primo a parlare di questo procedimento fu Mogensen ad una conferenza a Stoccolma nel 1983, in seguito esso fu sviluppato e messo a punto dall' University of Technology di Lulea in Svezia con il nome di TED.

Per sfruttare al meglio le sonde di scambio occorre valutare le loro prestazioni in campo termico ed in particolare i parametri che servono per il loro dimensionamento:

- Conducibilità termica della roccia (rock thermal conductivity)  
 $\lambda$  W/(mK)
- Resistenza termica della sonda (borehole thermal resistance)  
 $R_b$  K/(W/m)

In prima approssimazione si possono tenere in considerazione i valori medi di conducibilità delle rocce presenti in zona, ma questo valore può oscillare anche del 20%, ciò rende assolutamente necessario il ricorso al test di risposta geotermica.

Per fare ciò occorre perforare una sonda di prova in cui eseguire i log necessari per conoscere le incerte caratteristiche idrogeologiche del sottosuolo quali ad esempio il livello di falda ed in prima approssimazione gli strati di terreno interessati dalla sonda.

In seguito la perforazione di prova potrà essere utilizzata come sonda scambiatrice in cui eseguire il test.

#### 4.2 PRINCIPI FISICI ALLA BASE DEL TEST:

L'equazione principale per la determinazione del campo termico nell'intorno della sonda è dato dall'equazione semplificata per il test di Hellstrom, Morgensen e Eskilson:

$$\Delta T(r_b, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ \ln \left( \frac{4at}{r_b^2} \right) - \gamma \right]$$

Questa risulta valida se:

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

dove:

- $\Delta T(r_b, t)$  è funzione del raggio della sonda e del tempo ed è uguale a  $T_f - T_0$
- $t$  = tempo di inizio del test (s)
- $T_f$  = temperatura media del fluido termovettore =  $\frac{T_{in} - T_{out}}{2}$  (°C)
- $T_0$  è la temperatura del terreno indisturbato prima dell'apporto di calore (°C)
- $q$  = calore iniettato nella sonda per metro lineare (W/m)
- $\lambda$  = conducibilità termica W/(mK)
- $a$  = diffusività termica ed è pari a  $\frac{\lambda}{c}$  (m<sup>2</sup>/s)
- $c$  =  $\rho C$  capacità termica volumetrica (J/m<sup>3</sup>K)
- $r_b$  = raggio della sonda (m)
- $\gamma$  = costante di Eulero pari a 0,5772

Vanno fatte alcune precisazioni:

- La temperatura lungo la sonda viene presa costante in quanto la sua variabilità rispetto al campo radiale è minima.
- Si considera la sonda di lunghezza infinita per brevi periodi di tempo in quanto è molto più grande del raggio della sonda stessa.

Un fattore d'estrema importanza è la resistenza termica  $R_b$  tra il fluido termovettore che passa nei tubi e la superficie esterna della sonda (per intenderci quella a contatto con il terreno).

Vale la seguente relazione già vista nel capitolo 3:

$$T_f - T_b = R_b q$$

dove :

- $T_f$  è la temperatura media del fluido nel collettore
- $T_b$  è la temperatura alla superficie della sonda (tra riempimento e terreno)
- $q$  è la quantità di calore iniettata per metro lineare (W/m)

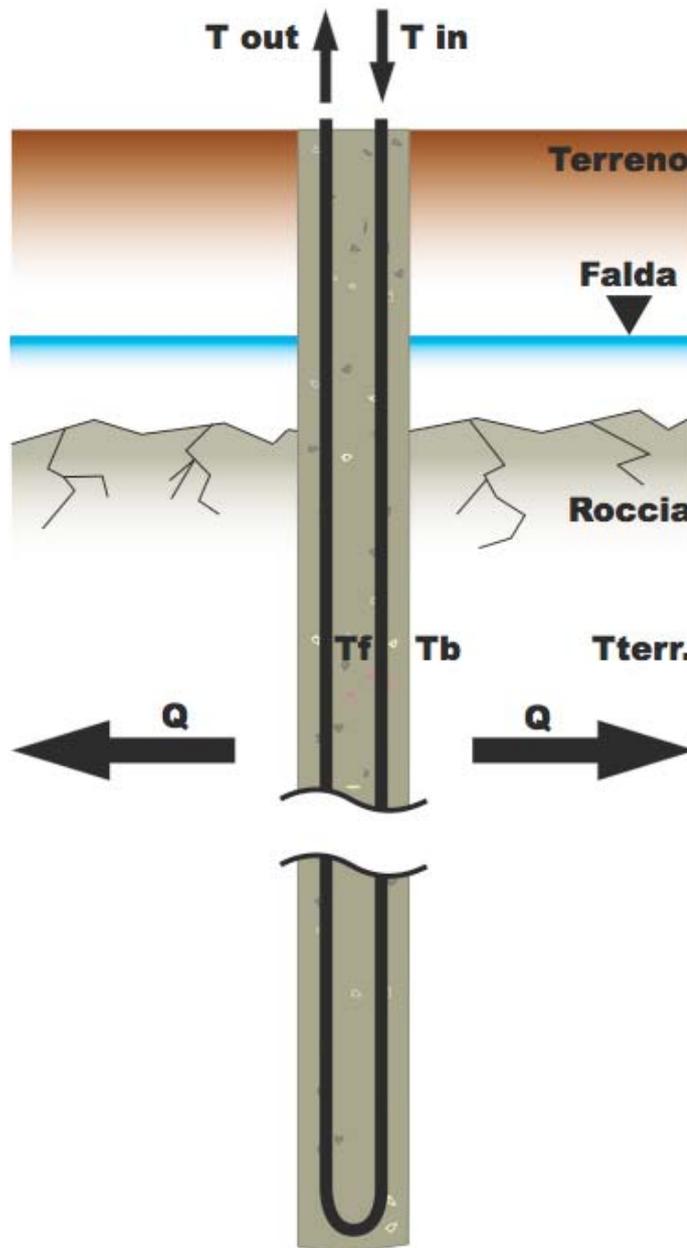
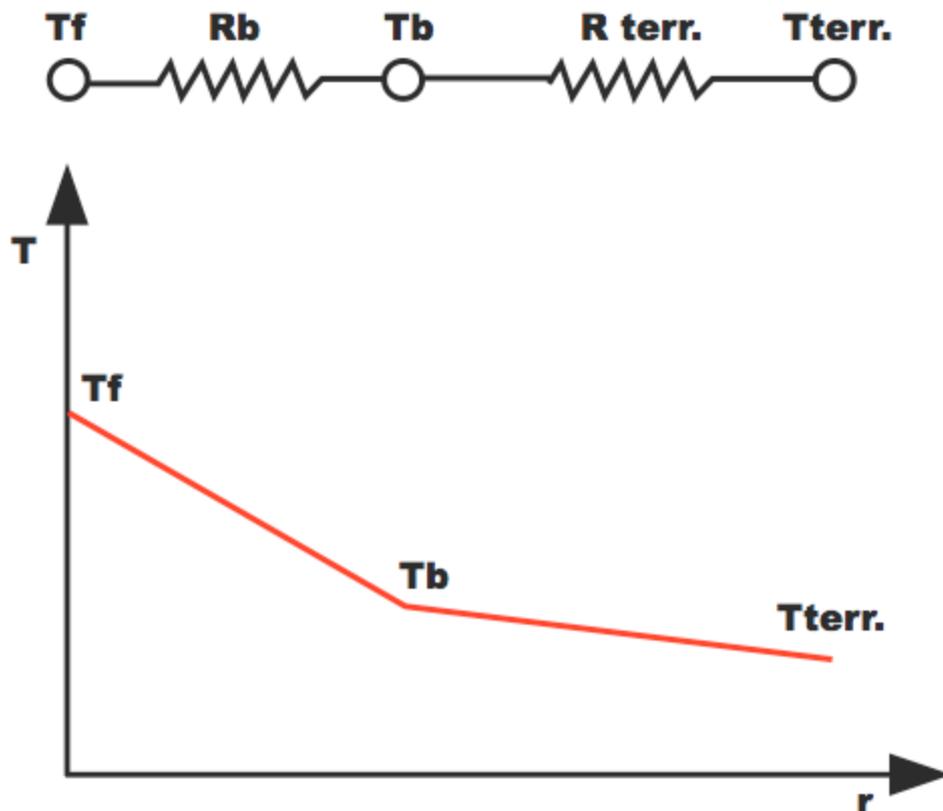


Figura 12: Schema del procedimento su sonda verticale (Gehlin 1998)

Volendo scrivere l'espressione di prima considerando la resistenza della sonda  $R_b$  vale:

$$\Delta T(r_b, t) = q \left[ R_b + \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln \left( \frac{4at}{r_b^2} \right) - \gamma \right) \right]$$

La resistenza della sonda non va tralasciata, difatti essa è responsabile di un forte abbattimento della temperatura tra fluido e terreno: per potenze da 25-100 W/m ci può essere un abbattimento di 2-10°C (Figura 2). La resistenza della sonda  $R_b$  dovrebbe essere la più bassa possibile, riducendola utilizzando materiali di riempimento adeguati (vedi legge VDI 4660).



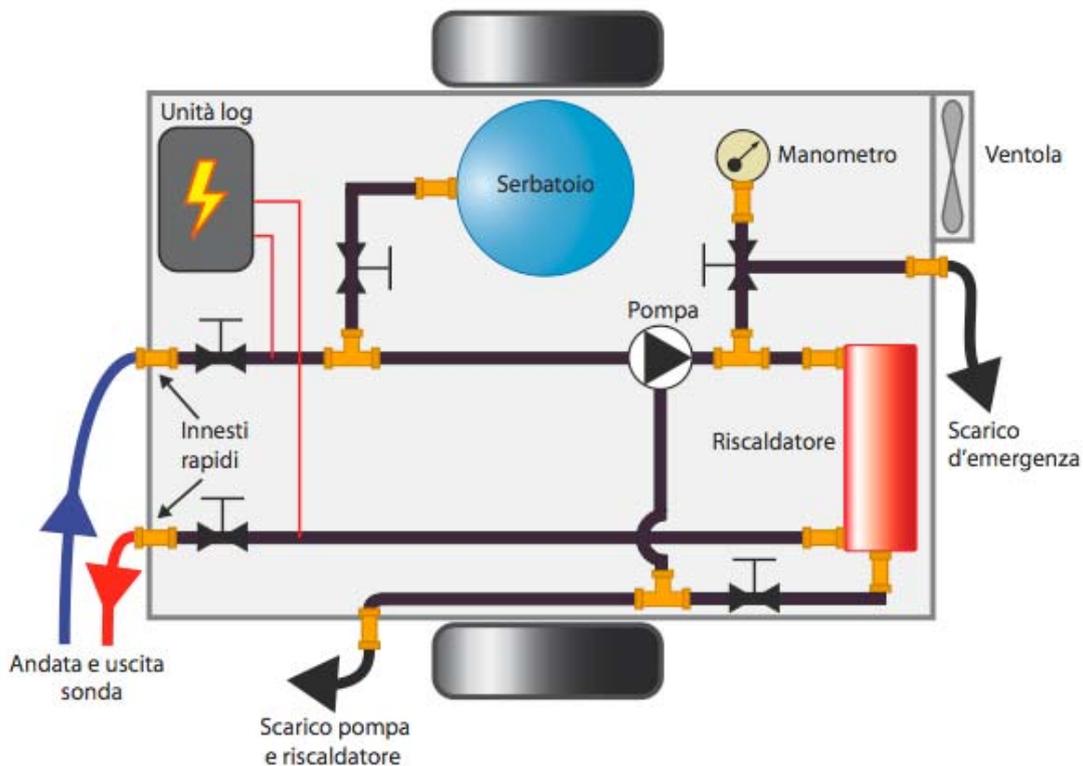
**Figura 13: Abbattimento della temperatura in funzione del raggio dovuto alla resistenza della sonda (Gehlin 1998)**

#### 4.3 ATTREZZATURA PER EFFETTUARE IL TEST

TED è stato costruito da Lulea University of technology nel 1995-96, esso è stato montato su un veicolo rimorchio per essere trasportato facilmente in cantiere e contiene:

- Una pompa da 1 kW per garantire una portata di  $0,5-1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  di fluido termovettore attraverso il dispositivo di riscaldamento e la sonda.

- Un dispositivo di riscaldamento che può fornire in maniera stabile e continuativa al fluido da 3-12 kW, a seconda delle esigenze.
- Un serbatoio d'acqua di almeno  $50 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  per riempire le connessioni di superficie e la sonda stessa.
- Un dispositivo di lettura delle temperature d'ingresso e di uscita dalla sonda con una precisione di  $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Misuratore della portata.
- Quadro di controllo del dispositivo di riscaldamento del fluido termovettore.
- Un sistema (log) per la lettura e registrazione dei dati con intervalli di tempo prefissati. Tutto il dispositivo è alimentato da una corrente elettrica di 16 A.
- Valvola di sicurezza per eventuali sovrappressioni.



**Figura 14: Schema di TED (Gehlin 1998)**

Oltre ai suddetti dispositivi è presente un manometro per la lettura della pressione ed un dispositivo per ventilare la macchina in modo da evitare surriscaldamenti.

Per evitare perdite di calore tra TED e sonda ed influenze derivanti da cambiamenti di temperatura esterna che pregiudicherebbero l'attendibilità delle misurazioni viene predisposto materiale d'isolamento sui tubi di connessione.

#### 4.4 PROCEDIMENTO

Il circuito di TED viene connesso ai tubi in uscita dalla sonda (un ingresso ed una uscita nel caso di un singolo tubo ad U in sonda). Per prima cosa va determinato accuratamente il livello di falda nel terreno interessato dalla sonda.

In seguito, per determinare la temperatura del terreno indisturbato, si lascia circolare il fluido termovettore senza riscaldarlo nella sonda per circa 20-30 minuti. La temperatura del fluido viene presa ad intervalli di 2 minuti. La media tra la temperatura di “in e out” corrisponde appunto al dato cercato.

Una volta determinata la temperatura del terreno indisturbato si procede pompando il fluido riscaldato nella sonda. L’apporto di calore deve essere costante per tutto il tempo della prova, circa 3 giorni (72 ore). Le temperature di “in e out” vengono registrate in continuità ed automaticamente da un data log.



Figura 15: Foto di TED proprietà dell'università svedese di Lulea (Gehlin 1998)

#### 4.5 ANALISI DEI DATI

Quando una quantità di calore viene iniettata in una sonda si instaura un processo transitorio espresso da:

$$T_f = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \ln(t) + \left[ \frac{Q}{H} \left( \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln\left(\frac{4a}{r_b^2}\right) - \gamma \right) - R_b \right) + T_0 \right]$$

questa vale sempre se è verificato che t:

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

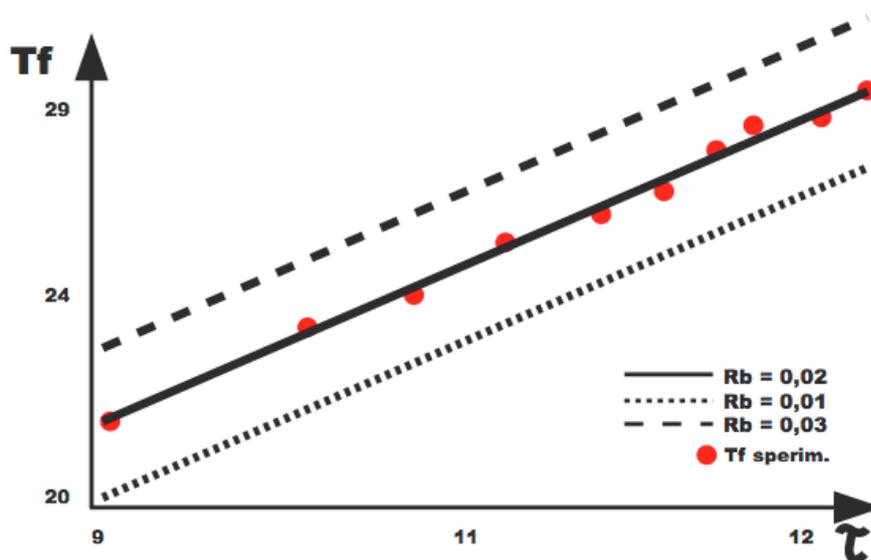
Dove H rappresenta la lunghezza effettiva della sonda in metri ( $q = Q/H$ , W/m). Questa equazione può essere anche semplificata scrivendola secondo la seguente in modo lineare:

$$T_f = K * \ln(t) + m$$

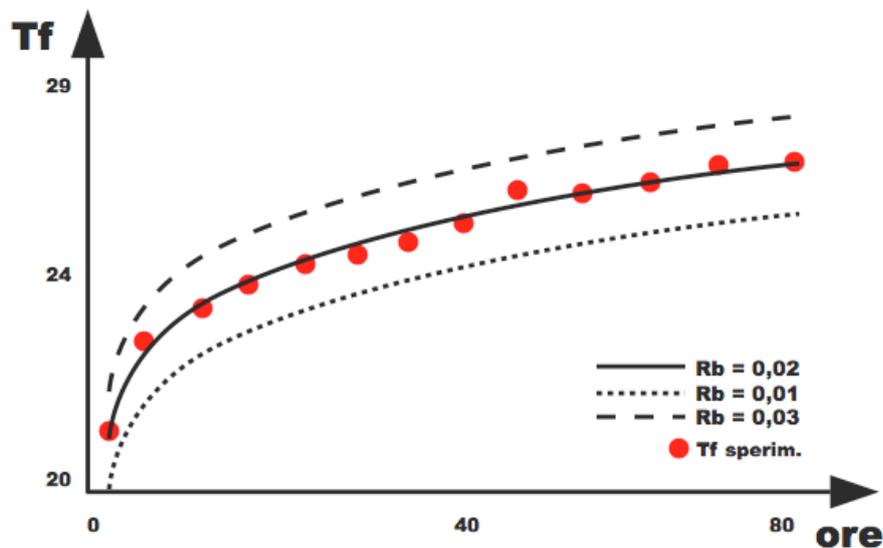
$$\text{dove: } K = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \quad \text{ed} \quad m = \frac{Q}{H} \left( \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln\left(\frac{4a}{r_b^2}\right) - \gamma \right) - R_b \right) + T_0$$

La  $\lambda$  (conducibilità termica media del terreno attraversato), viene stimata in base all'inclinazione della linea presente su di un grafico in cui in ascissa c'è  $\tau = \ln(t)$  ed in ordinata  $T_f$  (Figura 5).

Questa inclinazione è indipendente dalla resistenza termica della sonda  $R_b$  e ciò ci permette di trovare la reale resistenza della sonda utilizzando la  $\lambda$  stimata.



**Figura 16** Grafico che permette di stimare la conducibilità termica del terreno attraversato, **Figura 6** Andamento della temperatura media in funzione del tempo (Gehlin 1998)



Questo grafico mostra l'evoluzione della temperatura media del fluido termovettore in funzione del tempo trascorso dall'inizio del test. Chiaramente si nota un suo netto aumento e ciò sta ad indicare un aumento di temperatura del volume di terreno (o roccia) che scambia calore con la sonda. Il metodo grafico sopra esposto permette di trovare la conducibilità termica della roccia  $\lambda$  con una precisione di  $\pm 0,05$  W/(mK) e la resistenza termica della sonda  $R_b$  con una precisione di  $\pm 0,005$  K/(W/m).

#### 4.5 CONCLUSIONI E VALUTAZIONI

Il test di risposta geotermica messo a punto dall' University of Technology di Lulea in Svezia con il nome di TED è stato utilizzato in diversi siti in tutto il paese per valutare i parametri fondamentali delle borehole heat exchanger. I risultati sperimentali ottenuti risultano molto utili ed accurati al fine del dimensionamento degli impianti.

L'attrezzatura per effettuare il test risulta poco ingombrante e facilmente trasportabile e ciò è un grande vantaggio nell'applicazione professionale. Il sistema può essere difatti utilizzato per studiare terreni che verranno utilizzati per grandi impianti con decine di sonde oppure per testare sonde create con nuovi materiali e geometrie dei collettori.

La conducibilità termica  $\lambda$  misurata ha una precisione del  $\pm 3\%$  e risulta essere leggermente maggiore rispetto al dato misurato in laboratorio su carote prelevate dalla stessa roccia durante la perforazione. Questo fenomeno è causato dall'acqua di falda presente nelle fratture dell'ammasso roccioso o nei pori del terreno,

la quale, ha una notevole capacità di trasferimento del calore rispetto all'aria presente nelle carote in laboratorio. Ciò indica che il test di risposta geotermica è un ottimo strumento in quanto valuta la conducibilità del terreno o della roccia nelle condizioni naturali reali in cui si trova, al contrario di ciò che avviene in laboratorio dove si lavora su campioni disturbati.



**Figura 7: Sonda a singolo U (Gehlin 1998)**

dal tubo collettore in polietilene ed il materiale di riempimento della sonda.



**Figura 8: Sonda a doppio U (Gehlin 1998)**

La resistenza termica della sonda  $R_b$ , viene ricavata con una precisione del  $\pm 10\%$  ma questo dato può essere migliorato con una misurazioni ed analisi più accurate. Inoltre si è visto che questo dato è molto più piccolo in sonde con doppio tubo collettore ad U rispetto alle sonde dotate di un tubo singolo. La durata del test di almeno 60-72 ore può sembrare lunga ma è necessaria in quanto le prime 12-20 ore di funzionamento non possono essere prese come riferimento per le analisi in quanto la conducibilità termica è notevolmente influenzata dal tubo collettore in polietilene ed il materiale di riempimento della sonda.

Parametri importanti ed altrettanto critici quali: il livello della falda intercettata dalla sonda, la potenza iniettata nella sonda attraverso il fluido termovettore e la temperatura del terreno indisturbato devono essere misurati con la massima precisione in quanto influiscono enormemente sui risultati del test.

La resistenza termica della sonda  $R_b$ , a parità di altre condizioni, risulta influenzata dalla potenza termica iniettata nella sonda (W/m dissipati in sonda), quindi bisogna effettuare il test con un carico termico lineare simile a quello che verrà utilizzato dalla pompa di calore geotermica. Ad esempio, se si è stimato che la sonda dissiperà 50 W/m una volta in funzione, anche il test dovrà essere eseguito con quella potenza.

Come già detto in precedenza anche la temperatura esterna ha la sua importanza ed influenza, quindi, per evitare perdite di calore nelle connessioni in superficie queste vengono protette con materiale isolante.

Il livello della falda e la velocità del suo flusso attraverso il terreno interessato dalla sonda influenzano molto la quantità di calore che può essere scambiata. Un flusso d'acqua elevato aumenta il calore che la sonda può dissipare e di ciò bisogna tenerne conto. Effettuare il test in condizioni che contribuiscono ad aumentare il livello di falda quali scioglimento del manto nevoso o pioggia può invalidare le misurazioni.

Il test di risposta geotermica è uno strumento fondamentale per un corretto dimensionamento di campi geotermici verticali per grossi impianti, il suo utilizzo nel nostro paese è ancora basso ma si prevede una sua rapida diffusione in seguito ad una futura crescita del mercato di grossi impianti. Non esiste nulla di simile per impianti con serpentine a dissipazione orizzontale, essenzialmente per due motivi: il primo è dovuto al fatto che questa soluzione tecnica richiede un'ampia superficie di terreno per lo scambio e ciò prelude il suo utilizzo per grandi edifici (con superfici pari a 2000-3000 m<sup>2</sup>) che spesso non hanno grandi distese verdi a disposizione, specialmente qui in Italia. Il secondo motivo è di carattere tecnico economico; non è possibile realizzare solo alcuni circuiti di serpentine su cui fare il test per poi utilizzarne i risultati per un giusto dimensionamento. Installare questo tipo d'impianti richiede un grosso costo di sbancamento anche per pochi circuiti, inoltre il letto di serpentine solitamente è un blocco unico ed i collettori che collegano i vari circuiti di polietilene sono sotterrati e ciò non rende questa soluzione modulare come le sonde verticali che possono essere collegate in superficie. Queste due motivazioni rilegano la soluzione a dissipazione orizzontale ad un dimensionamento "classico" basato su valori tabellati con grandi margini di sicurezza applicati e quindi con un'efficienza economica più limitata rispetto alle più collaudate sonde di scambio verticali.

## CAPITOLO 5

### PANORAMA NORMATIVO EUROPEO E RIFERIMENTI IN ITALIA

#### 5.1 PANORAMA EUROPEO ED ITALIANO

Il condizionamento degli edifici con sistemi ad energie rinnovabili quali il geotermico a bassa entalpia, non hanno raggiunto ancora una grande diffusione nel nostro paese. Le installazioni in Italia di pompe di calore associate a sonde geotermiche o collettori orizzontali sono nettamente inferiori rispetto sia a quelle installate negli Stati Uniti che a quelle presenti in alcuni paesi dell'Europa centro settentrionale, come è possibile vedere in tabella.

**Tabella 1: MW installati in alcuni paesi (svizzera energia 2007)**

PAESE	MW
Austria	275
Canada	435
Svezia	2000
Svizzera	440
Usa	6300
Italia	120

Il quadro legislativo per questa tipologia d'impianti è completamente assente nel nostro paese, e ciò può essere un danno per un mercato italiano giovane, inesperto ed in rapida espansione.

In paesi come Svizzera, Austria e Germania esistono leggi di riferimento materia ed inoltre sono state create da diversi anni "label" qualitativi e certificazioni a cui le aziende installatrici si devono attenere. I certificati in vigore in questi paesi riguardano sia le installazioni delle pompe di calore, la realizzazione delle sonde geotermiche verticali e le regole per il dimensionamento degli impianti.

Le pompe di calore e le installazioni devono seguire le seguenti regole per ottenere la certificazione:

- Macchine di serie con COP almeno pari a 4.
- Controllo delle emissioni foniche.
- La macchina deve essere fornita di manuali di montaggio e modalità d'uso.
- Garanzia di 2 anni e possibilità di trovare pezzi di ricambio per 10 anni.

Per ciò che riguarda le ditte di perforazione che vogliono ottenere la certificazione per realizzare le sonde geotermiche queste sono le regole generali da seguire:

- Ottenimento delle autorizzazioni prima dell'inizio della perforazione.
- Verifica della fattibilità in base al dimensionamento dell'impianto.
- Realizzazione della sonda seguendo norme di buona tecnica.
- Test di pressione di tenuta della sonda.
- Smaltimento del fango di perforazione secondo le norme ambientali vigenti.

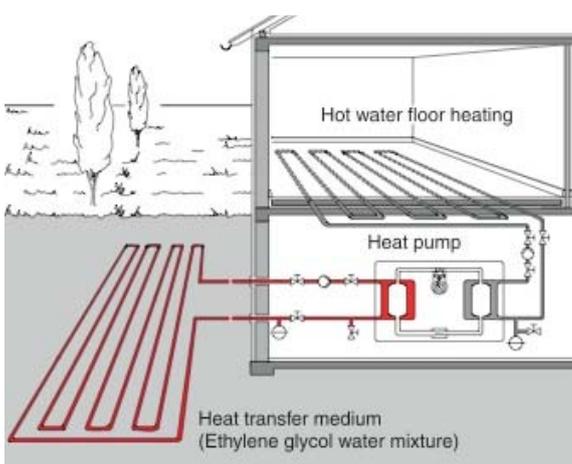
L'ottenimento di questi certificati di qualità è essenziale per le aziende se vogliono realizzare impianti geotermici in questi paesi in quanto sono richiesti da appaltatori e progettisti.

Una delle più importanti leggi di riferimento sia in Italia sia all'estero per la progettazione e la realizzazione di questi impianti è la legge tedesca VDI 4640 (blatt 2).

## 5.2 LEGGE VDI 4640

Questa legge, in vigore in Germania, contiene riferimenti tecnici per l'installazione di sonde verticali ed orizzontali, inoltre fornisce strumenti rapidi per il dimensionamento di piccoli impianti:

### 5.2.1 Collettori orizzontali (shallow underground)



**Figura 17: Layout con dissipatore orizzontale (VDI 2001)**

Il dimensionamento dei collettori orizzontali a bassa profondità, chiamate anche "a serpentina", è basato sulla capacità estrattiva del calore dal suolo in  $W/m^2$  e le ore annue di funzionamento. Il fatto che l'impianto sia utilizzato solo per riscaldamento oppure sia per riscaldamento che raffreddamento influisce sul suo rendimento a lungo termine, in quanto in estate nel terreno viene reintegrato

parte del calore prelevato nei mesi invernali.

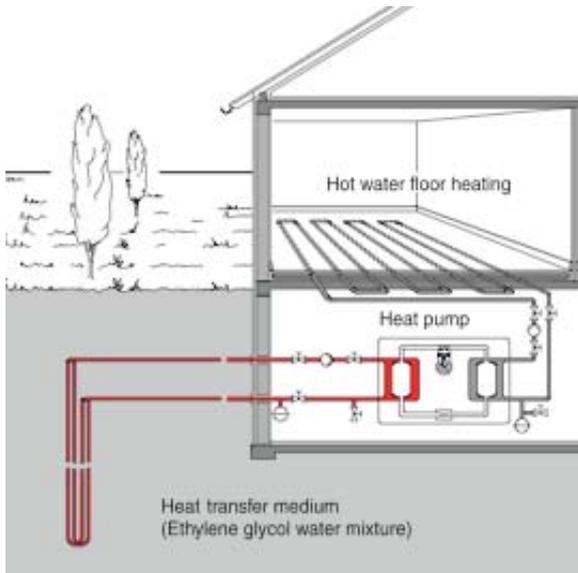
Il dimensionamento deve essere tale da non variare la temperatura del terreno oltre i  $\pm 12^{\circ}\text{C}$  rispetto la temperatura indisturbata, considerando la media settimanale (carico di base) e i  $\pm 18^{\circ}\text{C}$  considerando un carico di punta.

La loro installazione va fatta ad una profondità compresa tra i 1,2-1,8 m ed adagate possibilmente su un letto di sabbia spesso alcuni centimetri, evitando che pietrisco o residui di laterizi possano danneggiare i tubi di polietilene e garantendo allo stesso modo un buon contatto con il terreno. Le serpentine possono essere posate in un unico scavo, con un passo compreso tra i 30-40 cm oppure possono essere scavate trincee verticali in cui calare un singolo tubo. Questa soluzione, che prevede un passo tra tubi superiore compreso tra i 60-80 cm, ha una maggior capacità di scambiare calore con il terreno ma necessita di grandi superfici a disposizione. Lo strato di ricoprimento dello scambiatore non deve essere impermeabile, evitando che si formino sacche d'acqua superficiali.

Il materiale utilizzato per le serpentine è solitamente polipropilene (PE), i diametri possono variare a seconda delle esigenze ma solitamente sono compresi tra i 25-30 mm. I materiali impiegati devono essere resistenti alla corrosione ed agli sbalzi di temperatura dovuti al funzionamento dell'impianto. In fine tutti i componenti dell'impianto esposti al sole devono essere resistenti ai raggi UV. Nel caso la potenza termica da dissipare o da assorbire imponga uno scambiatore con diversi circuiti, questi vanno collegati in parallelo, attraverso due collettori (uno di andata e uno di ritorno) collegati a loro volta con la pompa di calore. Ciascun circuito va dotato di valvola on-off ispezionabile per poter omettere parti dello scambiatore.

Il fluido termovettore può essere semplicemente acqua ( a latitudini in cui il congelamento del terreno è raro) o meglio un mix d'acqua ed antigelo, garantendo l'esercizio dell'impianto sino a temperature di  $-20^{\circ}\text{C}$ . al momento del collaudo, quando cioè i vari circuiti sono riempiti di fluido, tutta l'aria presente nei tubi va rimossa accuratamente ed in seguito eseguito un test di pressione. Questo prevede la messa in esercizio dell'impianto ad una pressione di 1,5 volte quella di funzionamento dello scambiatore, con ciò si vuole testare la tenuta idraulica delle varie connessioni prima di chiudere lo scavo. La variazione di temperatura del fluido comporta una sua variazione di volume pari a 1% del volume totale, ciò implica problemi di sovrappressione che devono essere risolti inserendo nei vari circuiti valvole d'espansione. Esse sono obbligatorie per impianti che devono lavorare a pressioni superiori ai 3 bar. Tuttavia è buona norma dotare gli impianti di un manometro collegato con un allarme che possa avvisare in caso di anomale sovra pressioni.

### 5.2.2 Sistema a sonde verticali:



**Figura 18: Layout con sonde verticali (VDI 2001)**

Molto diffuse e preferite ai dissipatori orizzontali in installazioni di notevoli dimensioni, le sonde di scambio termico verticale per impianti a bassa entalpia possono raggiungere profondità paria a 200 m. la loro profondità varia chiaramente in base alle esigenze, solitamente è compresa tra i 20 ed i 100 m di profondità. il loro dimensionamento, come si è visto nel capitolo 3, è

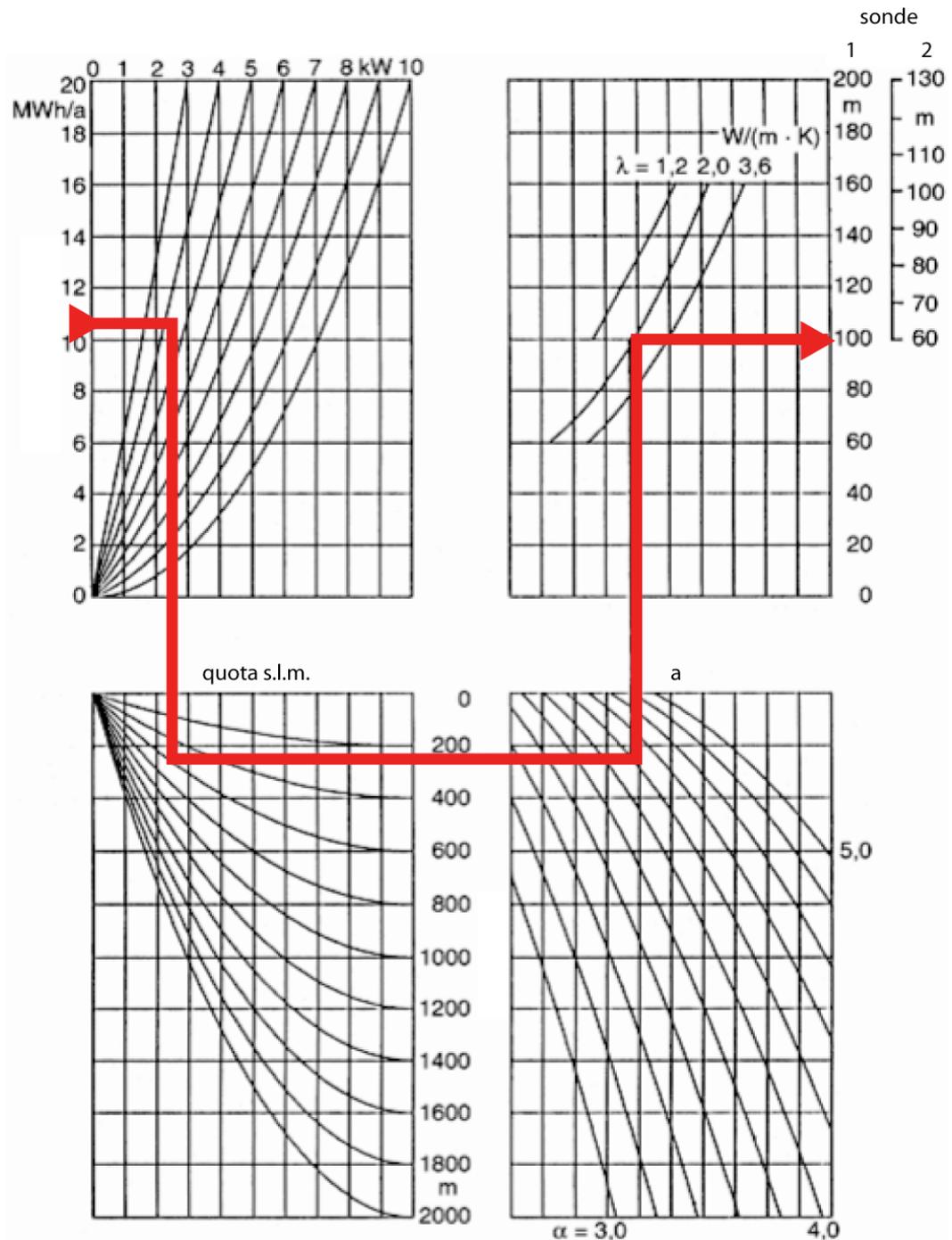
solitamente basato su modelli di scambio termico, però per piccoli impianti (< 30 kW) ci

si può basare semplicemente sulla capacità lineare di assorbimento del calore da parte del terreno W/m (tabella 2). Tuttavia, per legge, la profondità della sonda deve essere tale da non permettere un divario superiore agli  $\pm 11^{\circ}\text{C}$  fra la temperatura del fluido in uscita rispetto alla temperatura del terreno indisturbato su base settimanale, mentre non superiore a  $\pm 17^{\circ}\text{C}$  come picco. La distanza minima da tenere tra due sonde geotermiche è di 5 m se sono profonde sino a 50 m mentre è di 6 m se la loro profondità raggiunge i 100 m.

**Tabella 2: Capacità di dissipazione in base ai terreni (VDI 2001)**

TERRENO	ESTRAZIONE SPECIFICA	
	funz. 1800 ore	funz. 2400 ore
valori generali		
sedimenti secchi < 1,5 W/mK	25 W/m	20 W/m
sedimenti saturi 1,5-3 W/mK	60 W/m	50 W/m
rocce consolidate conduttive > 3 W/mK	84 W/m	70 W/m
singole rocce		
sassi, sabbia secchi	< 25 W/m	< 20 W/m
sassi, sabbia saturi d'acqua	65-80 W/m	55-65 W/m
falda in movimento in sabbia e sassi	80-100 W/m	80-100 W/m
argilla, terriccio umido	35-50 W/m	30-40 W/m
calcere massiccio	55-70 W/m	45-60 W/m
arenaria	65-80 W/m	55-65 W/m
granito	65-85 W/m	55-70 W/m
basalto	40-65 W/m	35-55 W/m
gneiss	70-85 W/m	60-70 W/m

Per impianti di dimensioni superiori ai 30 kW, oltre a ricorrere ai modelli di scambio visti nei capitoli precedenti, è stato elaborato un diagramma utile per un rapido dimensionamento in cui si tiene conto di numerose ore di funzionamento annue che possono condizionare notevolmente la capacità estrattiva del calore dal terreno a medio e lungo termine. Si considera un valore accettabile di 100-150 kWh/(m\*a) per una sonda che estrae solamente calore mentre può essere pari alla metà se si ha anche iniezione estiva.



**Figura 19: Grafico che permette di dimensionare la lunghezza della sonda sapendo la potenza da scambiare, la quota sul mare, conducibilità termica e parametro dimensionale  $a$  (VDI 2001).**

Il diagramma ha come input le esigenze termiche in un anno (MWh/a) e la capacità di riscaldare (kW), attraverso la quota dell'impianto sul livello del mare ed un parametro  $a$  è possibile trovare la profondità necessaria di una o due sonde associate all'impianto. Il parametro  $a$  è dato dalla seguente relazione:

$$a = \frac{Q_H}{(Q_H / \beta_a) - P_p}$$

dove:

- $a$  valore di input nel diagramma
- $Q_H$  richiesta annuale di riscaldamento (kWh/a)
- $\beta_a$  performance annuale
- $P_p$  energia per componenti ausiliari dell'impianto richiesta annualmente (kWh/a).

I valori più attendibili per il diagramma di dimensionamento sono (riportati al territorio tedesco):

Richiesta energetica annua	4-16	MWh/a
Capacità di riscaldare	3-08	kW
Altitudine	200-1400	m s.l.m.
Conducibilità termica	1,2-4	W/(mK)
Profondità per una sonda	60-160	m
Profondità per due sonde	60-100	m
Valori di $a$	3,8-4,6	-

**Tabella 3: Dati di riferimento per il dimensionamento della profondità per il territorio tedesco (VDI 2001)**

### 5.2.3 Documentazione per l'installazione:

In Germania la costruzione di questi impianti richiede autorizzazioni simili a quelle necessarie per la perforazione di pozzi d'acqua. La perforazione per la creazione di una sonda geotermica non può essere fatta ad una distanza inferiore ai 2 m dall'edificio. La ditta perforatrice, oltre all'ottenimento delle varie autorizzazioni preliminari, deve possedere la certificazione di qualità necessaria per realizzare di questo tipo di sonde. Il numero e la disposizione di queste viene deciso dal progettista in accordo con il cliente.

Per impianti di grosse dimensioni (>30 kW), viene richiesta la conoscenza geologica ed idrica del sottosuolo, se non si è in possesso di queste informazioni va perforato un pozzo pilota per analizzare la stratigrafia e la falda. In seguito il pozzo potrà essere utilizzato come sonda sulla quale sarà buona norma fare un test di risposta geotermica.

Se sono previste più di tre sonde verticali, oltre a richiedere i permessi preliminari alle autorità competenti va redatta una relazione accurata sulla disposizione delle sonde e la litologia attraversata.

Difatti, oltre ai documenti riguardanti i materiali che sono utilizzati per la realizzazione della sonda, va consegnata l'analisi del cutting di perforazione e la ricostruzione del profilo stratigrafico (da parte

del geologo o dell'ingegnere di perforazione) attraversato dalla sonda.

#### 5.2.4 Norme per la realizzazione di sonde verticali:

Una volta che la disposizione planimetrica e le varie profondità delle sonde sono state determinate, la loro preparazione viene fatta in officina (azienda) e poi trasportate in cantiere per la loro installazione. Pezzi speciali, quali raccordi a gomito oppure curve ad U per il fondo sono prodotte in azienda e saldate sul tubo di polietilene prefabbricato usato in sonda.

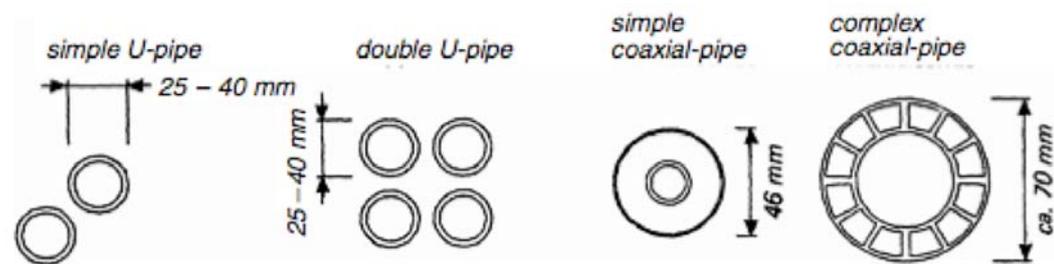


Figura 4: Varie configurazioni per i tubi di polietilene (VDI 2001)

La messa in opera dei tubi, i quali devono essere già testati ad una pressione 1,5 volte quella di progetto, deve essere eseguita attentamente in modo da evitare il danneggiamento del materiale plastico.

Le fasi e raccomandazioni d'installazione previste dal protocollo VDI sono:

- Per un inserimento facile della struttura, il foro va riempito d'acqua ed aggiunto un peso (in cemento) in fondo alla sonda per permettere una discesa più rapida.
- La struttura della sonda non deve essere spinta a forza dentro il foro ed eventuali spinte devono essere applicate solo sul peso in fondo alla sonda. Questa deve scendere nel foro in posizione verticale scivolando lentamente.
- Subito dopo la discesa della sonda devono essere posizionati uno o più tubi di cementazione.
- Prima della cementazione va fatto un test di tenuta idraulica per vedere se la sonda non ha subito danni.
- Il test, della durata di 30 minuti, prevede l'applicazione di una pressione interna pari a 6 bar, nei successivi 60 minuti è permessa una perdita di pressione solo pari a 0.2 bar.
- Se l'installazione avviene nei mesi invernali (mesi di gelo) i tubi della sonda devono essere parzialmente vuotati con aria compressa.

- La chiusura dei tubi va fatta con valvole a tenuta e nastro adesivo.

La cementazione inizia dal fondo della perforazione e risale verso la superficie senza lasciare cavità. Essa permette un ottimo contatto tra il terreno circostante e la sonda, garantendo un adeguato scambio di calore, inoltre, una cementazione ben eseguita, senza buchi lungo la sonda, non permette l'intercomunicazione tra acque di diverse falde. In ultimo, ma non meno importante è il ruolo solidificatore che il cemento ha tra il terreno e la sonda, permettendo a questa di diventare solidale con il terreno stesso.

Per sonde di piccole dimensioni (<60 m) il tubo di cementazione viene estratto mentre la cementazione prosegue dal fondo fino alla superficie. Per sonde con profondità maggiori si utilizzano due tubi per calare il cemento, uno per la parte bassa che resterà cementato nella sonda ed un secondo per la parte sommitale che verrà ritirato. La miscela utilizzata, che deve essere resistente alle variazioni di temperatura ed al gelo, è composta da:

- bentonite
- acqua
- cemento
- sabbia

Una miscela di sola bentonite ed acqua non ha una elevata conducibilità termica (<0,7 W/(m\*K)) e nessuna resistenza al gelo. Al contrario, se si aggiunge cemento e sabbia si può arrivare a conducibilità di 0,8 W/mK e resistenze sino a -15°C.

Le percentuali consigliate da questa direttiva sono di:

- cemento 10%
- bentonite 10%
- sabbia 30%

Nel caso in cui si perforino sonde al massimo profonde 50 m in rocce poco consolidate e permeabili, con presenza di falda freatica superficiale, si può evitare di utilizzare la miscela bentonica nella parte bassa della perforazione, sostituendola con una miscela di materiale finemente classato e lavato. Sopra il pelo libero della falda, la sonda va cementata con la miscela sopra descritta, sigillando il tutto in superficie con uno spesso strato d'argilla.

Nel caso di sonde da realizzare in terreni per nulla coesivi che tendono a chiudersi non appena si sono perforati si può aggiungere una piccola percentuale di cemento alla bentonite (proporzione 1:5) ed evitare di cementare la sonda.

## CAPITOLO 6

### 6.1 IMPIANTO GEOTERMICO E TEMPERATURE DEL TERRENO

In questo capitolo si espone l'elaborazione di un modello di scambio termico elaborato dal candidato per descrivere la variazione di temperatura del terreno in funzione della profondità in un terreno interessato da uno scambiatore orizzontale in funzione già da diversi anni presso l'azienda Aktis Italia s.r.l. di Loreggia (PD). L'impianto su cui si è lavorato è composto di Pompa di calore che funziona sia in riscaldamento che in raffrescamento estivo. Essa sfrutta un dissipatore orizzontale con le seguenti caratteristiche:

Tipologia	parallelo	
N° tubazioni	9	
Lunghezza singola tubazione	100	m
Tipo di tubazione	PE 80 SRD 9	
Diametro esterno	25	mm
Diametro interno	21	mm
Passo tra i tubi	0,33	m
Profondità di posa	1,5	m
Fluido termovettore	acqua	
Portata estiva	2492	l/h
Portata invernale	1188	l/h

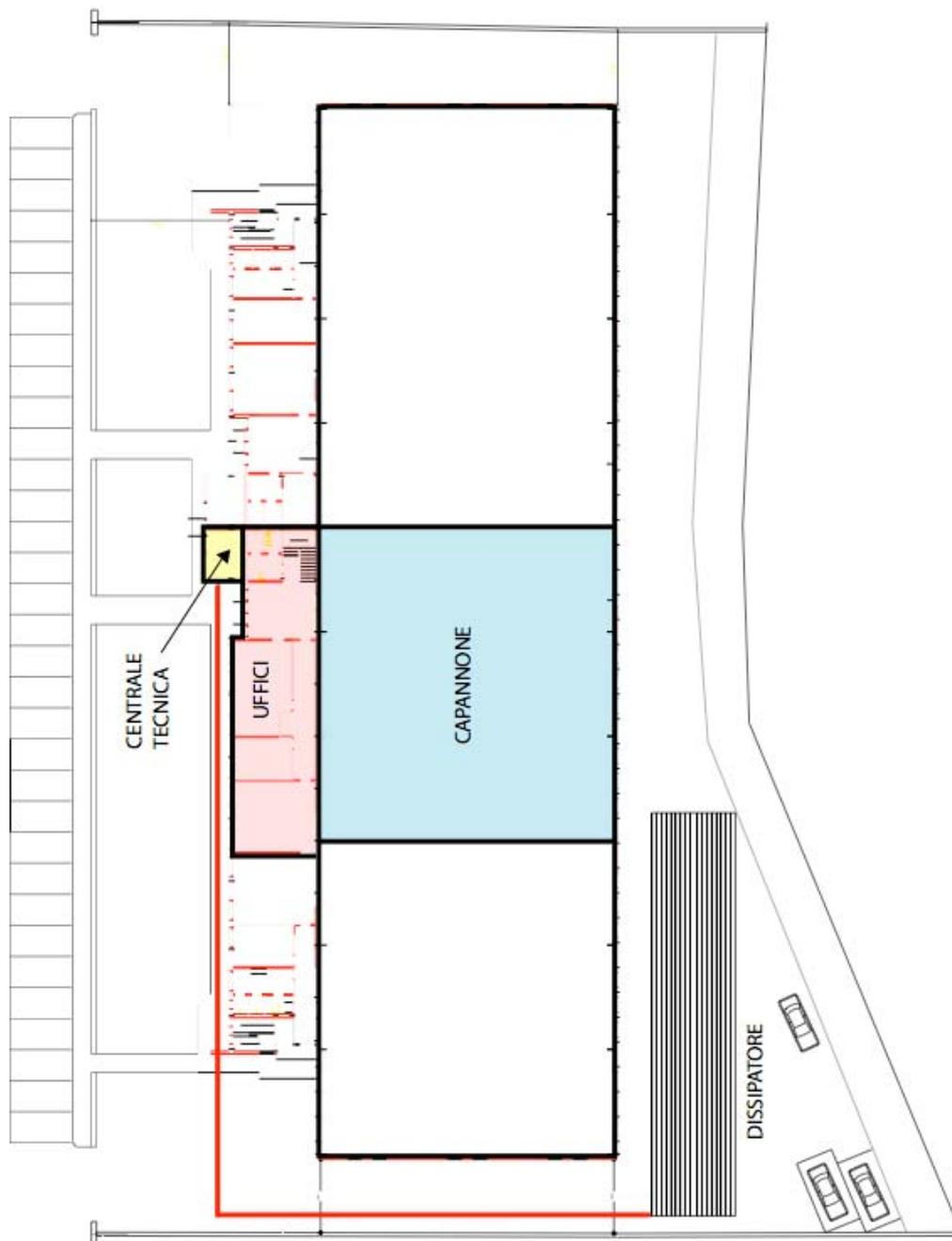
**Tabella 4: Dati del dissipatore**

L'edificio dell'azienda è composto da due piani adibiti ad uffici per una superficie totale di 500 m<sup>2</sup>. Ovviamente il condizionamento interno è affidato a pannelli radianti a pavimento che, come già detto in precedenza, sono la soluzione ideale per un giusto funzionamento della PDC. Il dissipatore si trova nel cortile interno sul retro all'azienda sotto un parcheggio il cui strato superficiale (alcuni cm) è ghiaia.

Per conoscere la stratigrafia del terreno interessato dallo scambio termico si è utilizzata la documentazione di prove geotecniche effettuate durante la costruzione dell'edificio. La conoscenza della stratigrafia e delle caratteristiche termiche del terreno sono di notevole importanza in quanto caratterizzano fortemente il modello ed il profilo disturbato di temperatura.

Terreno	spessore (m)	conducibilità termica (W/mK)
Argilla secca	1	1
sabbia umida	0,5	2,4
argilla umida	1,5	1,7

**Tabella 5: Dati di stratigrafia**



**Figura 20: Ditta Aktis Italia S.r.l. pianta capannone ed uffici con dissipatore geotermico (Fonte Aktis Italia S.r.l.)**

Il modello elaborato vuole mettere in evidenza la variazione di temperatura dovuta all'utilizzo del dissipatore in tre periodi dell'anno (Maggio, Agosto e Dicembre) rispetto il profilo di temperatura indisturbato del terreno stesso. L'andamento della temperatura del terreno indisturbato è stato ricavato con delle misurazioni sperimentali effettuate dall'azienda prima di installare il dissipatore orizzontale durante il corso di un anno. È stata misurata la temperatura con delle sonde posizionate sia in superficie che a varia profondità. Le temperature sono state registrate sempre sullo stesso punto, contemporaneamente alle varie profondità in determinati giorni dell'anno. Queste misure sono molto interessanti in quanto evidenziano la propagazione dell'onda di calore negli strati a bassa profondità. Essi seguono perfettamente l'andamento descritto dal modello elaborato dalla SUPSI (Università Cantone Ticino in Svizzera) esposto all'inizio del terzo capitolo. La variazione della temperatura è elevata in superficie e diminuisce progressivamente con la profondità. Inoltre il picco di temperatura tende a spostarsi in avanti sempre con la profondità. Sono state calcolate medie annuali alle varie profondità e le relative varianze che descrivono appunto la diminuzione di variabilità rispetto al valore medio. Le temperature esposte hanno un supporto di 24 ore.

Profondità (m)	Media annuale (°C)	Varianza
0,0	15,1	73,5
0,5	15,3	43,0
1,5	15,3	18,0
3,0	15,4	4,1

**Tabella 6: Media e Varianza dei dati esposti in tabella 4**

Si nota che la temperatura media annuale rimane pressoché costante rispetto la profondità mentre la varianza diminuisce in quanto è la variabilità delle temperature rispetto al valore medio che diminuisce. Difatti il modello della SUPSI dimostra che il valore di temperatura tende a divenire costante e pari a quello medio annuale con uno scostamento minimo da questo, intorno ai 12 m di profondità. Ciò dimostra che converrebbe installare il dissipatore a questa profondità in quanto si lavorerebbe sempre con un valore costante della temperatura del terreno, ma ciò non è possibile per i costi proibitivi che avrebbe lo scavo.

**Tabella 7: Temperature sperimentali a varie profondità rilevate in località Loreggia (PD) (Fonte Aktis Italia s.r.l.)**

Temperature (°C)		Profondità(m)			
mesi	giorno	0	0,5	1,5	3
Gennaio	5	5,0	8,5	12,4	16,3
	15	4,2	7,6	11,8	15,8
	25	3,8	7,0	11,0	15,0
Febbraio	5	3,5	6,5	10,4	14,8
	15	3,7	6,2	9,8	14,0
	25	4,2	6,1	9,7	13,9
Marzo	5	5,0	6,2	9,5	13,4
	15	6,0	7,0	9,4	13,2
	25	7,2	7,9	9,5	12,9
Aprile	5	9,0	10,0	9,9	12,7
	15	12,0	12,0	10,4	12,6
	25	14,0	13,1	11,1	12,6
Maggio	5	17,0	15,0	12,1	12,5
	15	19,5	17,1	13,4	12,7
	25	21,0	18,8	14,6	12,9
Giugno	5	23,0	20,8	16,5	13,1
	15	24,5	22,0	17,8	13,6
	25	25,2	22,8	18,5	14,0
Luglio	5	26,0	23,2	19,2	14,6
	15	26,3	23,6	19,8	15,0
	25	26,5	23,9	20,0	15,6
Agosto	5	26,7	24,0	20,3	16,2
	15	26,4	23,9	20,7	16,8
	25	25,8	23,7	20,8	17,0
Settembre	5	24,7	22,9	20,8	17,5
	15	23,3	22,0	20,6	17,7
	25	21,9	21,1	20,3	17,9
Ottobre	5	20,0	20,6	20,0	18,0
	15	17,5	18,0	19,4	18,1
	25	15,0	16,8	18,9	18,0
Novembre	5	13,3	15,5	18,0	17,9
	15	12,0	14,0	17,2	17,8
	25	10,0	12,8	16,2	17,7
Dicembre	5	8,0	11,5	14,8	17,6
	15	7,0	10,1	13,6	17,1
	25	5,5	9,0	12,7	16,5

Questi dati sono stati graficati in modo da evidenziare l'evoluzione dell'onda di calore:

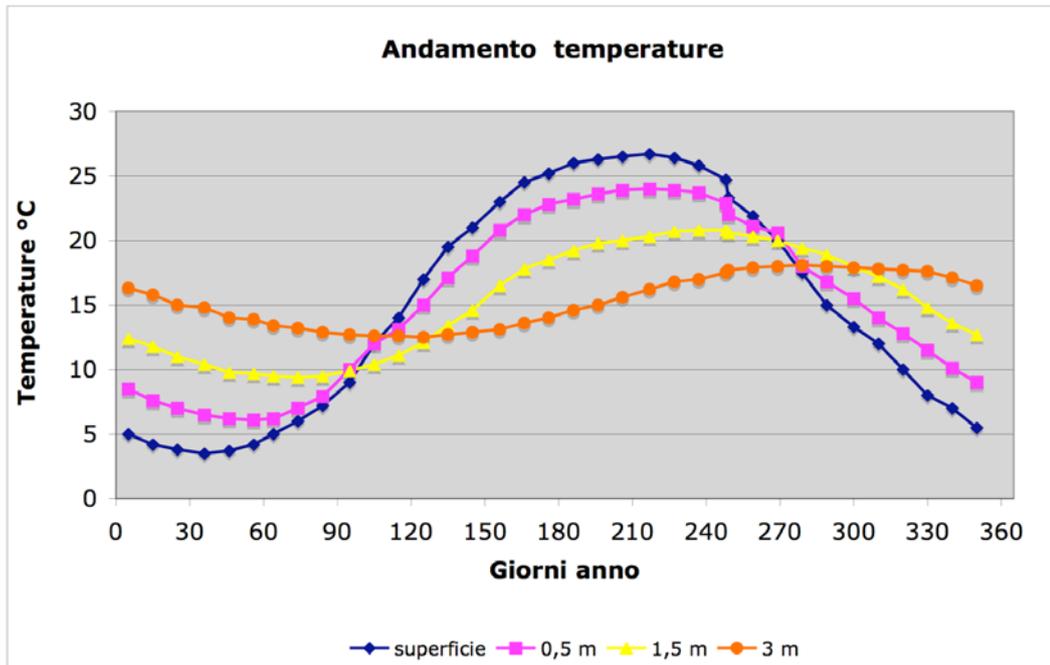


Figura 21: Grafico riferito ai dati in tabella 4, curve di temperatura a varie profondità

Su questi dati è stato calcolato anche il variogramma sperimentale alle varie profondità in funzione di un passo temporale. Il variogramma espresso come a semi varianza della variabile accrescimento è dato da:

$$G(h) = \frac{1}{2} \left( \frac{\sum_{i=1}^{nc} (Z_{i+h} - Z_i)^2}{NC} \right)$$

Dove:

- G(h)= variogramma
- h = passo temporale
- NC = numero di coppie
- Z = variabile accrescimento, in questo caso la temperatura.

passo	superficiale	0,5 m	1,5 m	3 m
1	1	0,7	0,3	0,1
2	5	2,8	1,2	0,3
3	10	6,1	2,5	0,5
4	18	10,6	4,3	0,9
5	28	16,2	6,3	1,3
6	40	22,6	8,6	1,8
7	53	29,9	11,0	2,3

8	67	37,8	13,6	2,9
9	82	45,4	16,2	3,5
10	96	53,2	18,9	4,1
11	109	60,8	21,6	4,7
12	121	67,8	24,1	5,3
13	131	73,9	26,6	5,8
14	139	78,8	29,0	6,4
15	144	82,3	31,1	6,9
16	146	84,1	32,9	7,3

Tabella 8: Valori del variogramma riferiti alla tabella 4

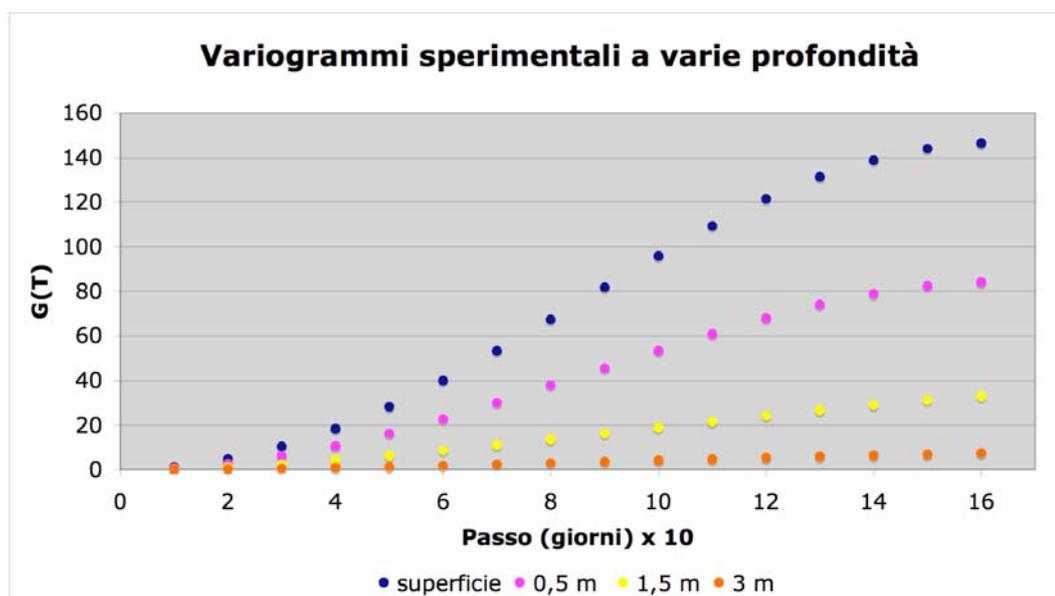


Figura 22: Variogrammi sperimentali a varie profondità, calcolati a passo costante di 10 giorni.

Il grafico mostra il valore del variogramma alle varie profondità, il passo rappresenta i punti in cui è stato calcolato il variogramma, cioè ogni 10, 20, 30 giorni ecc. si è arrivati a 160 giorni in quanto rappresentano circa metà anno. Difatti questi variogrammi sono ciclici con una frequenza pari ad un anno. Il loro valore massimo (sill c) indica di quanto sono differenti i valori di temperatura ad una data profondità in funzione del tempo. Come ci si poteva aspettare il variogramma con il maggior valore è quello in superficie mentre quello con sill più basso è quello a 3 m di profondità. In teoria, un ipotetico variogramma alla profondità di 12 m sarebbe pari a 0 ad ogni passo, poiché il valore di temperatura resta costante durante tutto il periodo dell'anno. La regolarità di questi dati e quindi anche dell'esattezza del modello proposto dalla SUPSI sono riscontrabili grazie alla perfetta modellizzazione che si può fare utilizzando il seguente modello:

$$G(h) = c(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}})$$

Dove:

- c = sill
- a = range

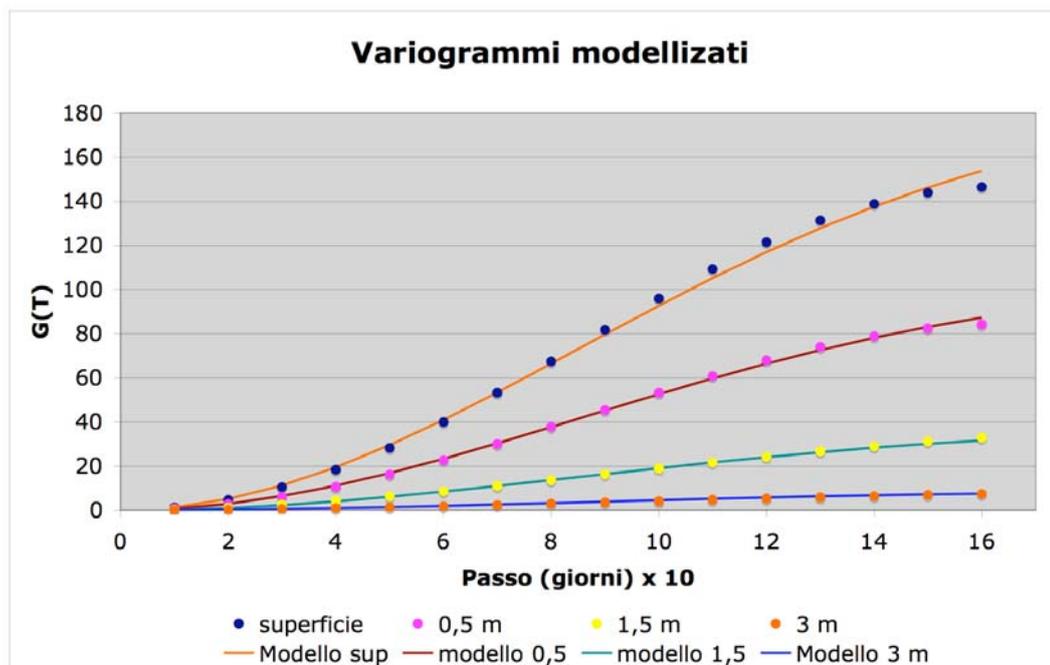


Figura 23: Variogrammi modellizzati utilizzando i valori in tabella 6

	superficie	0,5 m	1,5 m	3 m
a	12	12	12	12
c	185	105	38	9

Tabella 9: Valori di Sill (c) e Range (a) adottati per modellizzare

## 6.2 IL MODELLO DI SCAMBIO TERMICO

Il modello elaborato ha come imput la potenza (W) che la pompa di calore deve smaltire nel terreno attraverso il dissipatore sopra descritto in inverno e la potenza che deve essere assorbita dallo stesso in estate. Le ipotesi di lavoro che sono state fatte sono le seguenti:

- Lo scambiatore è visto come un unico fascio di 9 tubi lungo 100 m.
- Lo scambio di calore avviene solamente sopra e sotto il fascio di tubi e non sono considerati gli effetti di bordo.
- Le temperature d'ingresso ed uscita dal dissipatore sono dati impostati sui quali si calcola la potenza dissipata o assorbita.
- la variazione della temperatura del fluido termovettore all'interno dei tubi viene ipotizzata esponenziale.

- Il calore scambiato dal tubo viene considerato come un valore medio lungo tutta la lunghezza del tubo.

La distribuzione dei tubi a 1,5 m di profondità e la loro configurazione rispetto alla stratigrafia vengono mostrati qui di seguito.

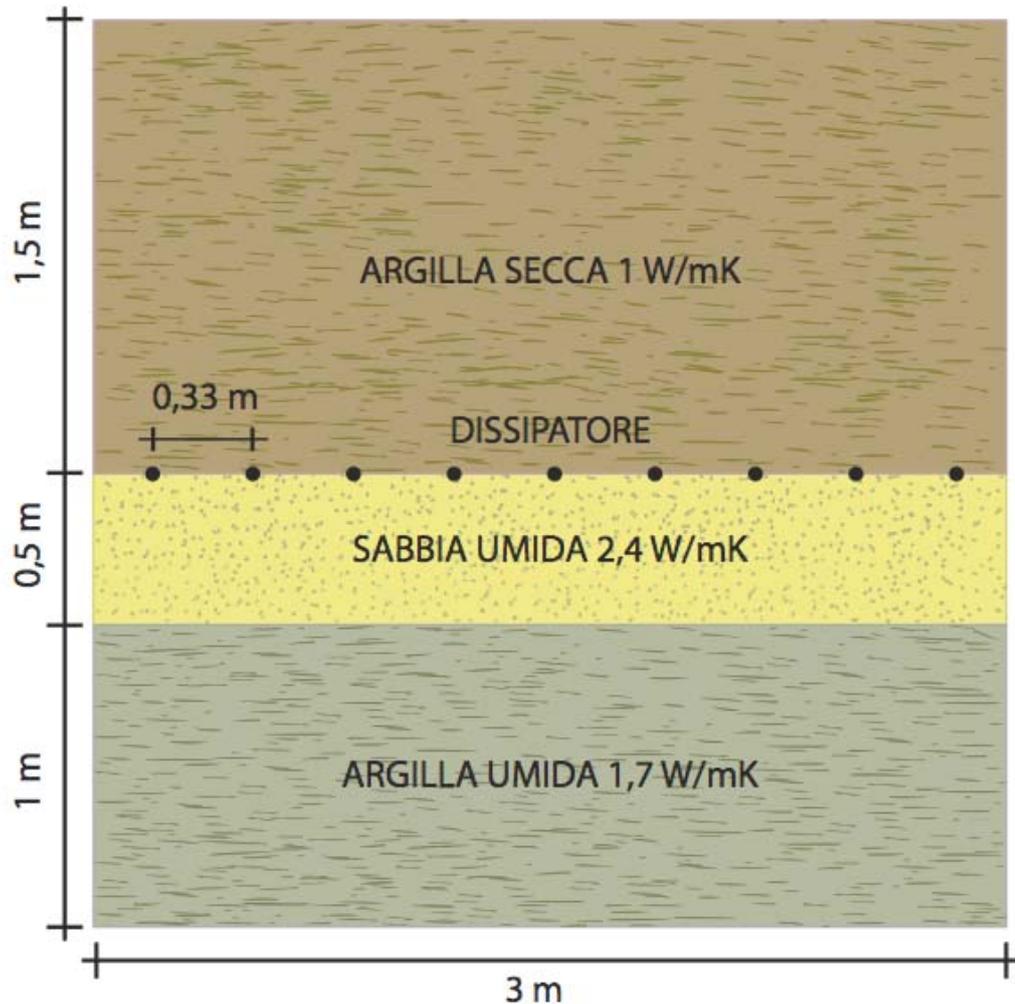


Figura 24: Stratigrafia interessata dal dissipatore presso la ditta Aktis Italia S.r.l.

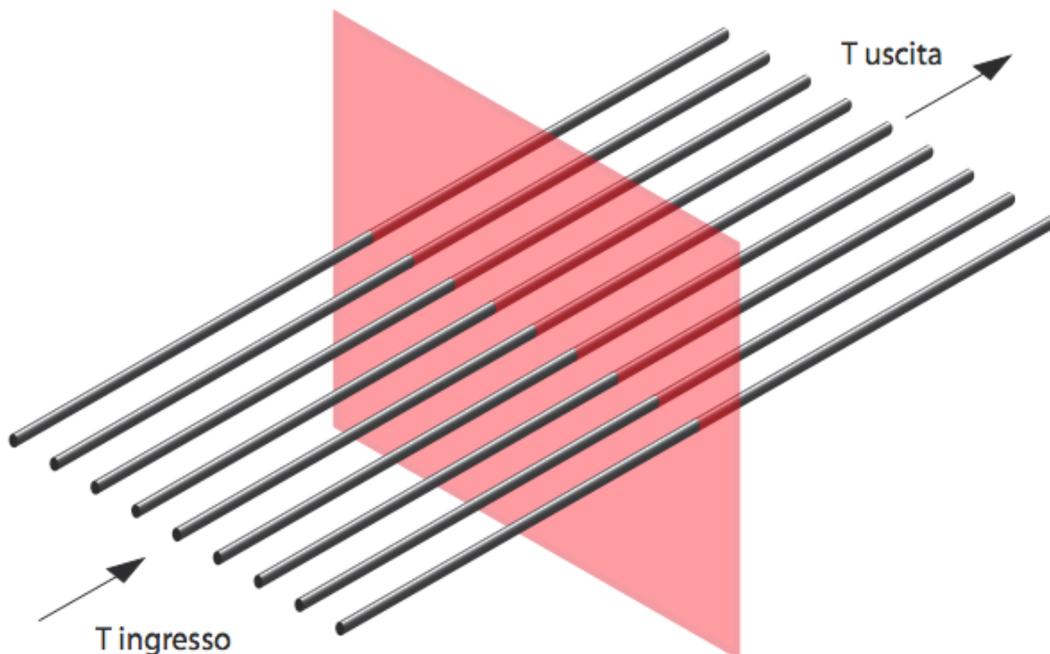
Determiniamo la variazione della temperatura in tre periodi dell'anno:

- **Maggio**, in quanto rappresenta il periodo in cui l'impianto inizia a funzionare in raffrescamento ed è il periodo in cui l'impianto funziona al meglio in quanto deve scaricare calore in un terreno "freddo" proveniente dal periodo invernale.

- **Agosto**, periodo finale di raffreddamento in cui il terreno, oltre ad aver assorbito il calore durante tutto il periodo estivo, ha una temperatura superiore a quella di Maggio e quindi il salto termico che la pompa di calore potrà sfruttare sarà inferiore.
- **Dicembre**, periodo di riscaldamento in cui si è voluto studiare il raffreddamento del terreno.

Lo studio della variazione delle temperature è stato fatto senza considerare il periodo transitorio che intercorre tra una perturbazione della temperatura d'ingresso del fluido termovettore nel dissipatore e la sua ricaduta sul profilo di temperatura nel terreno. Lo studio è stato fatto considerando solo il periodo stazionario quindi con temperature d'ingresso ed uscita dal dissipatore costanti nel tempo poiché il regime transitorio avrebbe richiesto un modello matematico alle differenze finite implementato in un software dedicato. Inoltre, l'intento del modello è quello di vedere i  $\Delta T$  di perturbazione rispetto al profilo originario di temperatura nel terreno. Per ciascun periodo temporale considerato si sono studiati i vari profili a varie distanze sul dissipatore:

- 0 m (Ingresso del fluido termovettore nel dissipatore proveniente dalla PDC)
- 33 m
- 66 m
- 100 m (punto d'uscita del fluido termovettore dal dissipatore e di ritorno alla PDC)



**Figura 25: Tratto lungo 5 m di dissipatore con sezione trasversale (rosso) in cui viene calcolata la variazione termica.**

In questi punti viene considerata la temperatura media su 5 m per il fluido interno al tubo (acqua), mentre per la potenza si utilizza il valore che un singolo tubo deve smaltire od assorbire per una lunghezza di 5 m.

Dalla fisica tecnica si ha che il calore scambiato è esprimibile dalla seguente equazione: (Kreith 1974)

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

dove:

- Q = calore che viene scambiato in (kW)
- m = portata di fluido termovettore all'interno del tubo (kg/s)
- Cp = calore specifico del fluido termovettore (nel nostro caso acqua) ed ha un valore che riteniamo costante di 4,189 (kJ/(kg\*K))
- ΔT è la differenza di temperatura che intercorre tra l'ingresso e l'uscita del dissipatore in (°C).

Se sappiamo la portata della macchina ed il calore che dobbiamo dissipare o assorbire si riesce a trovare il salto termico necessario per il buon funzionamento della macchina. Se non è possibile scaricare la potenza richiesta dalla PDC allora aumenterà il lavoro necessario del compressore della macchina e quindi un COP inferiore e di conseguenza un maggior consumo di energia elettrica. Il calore viene prelevato o ceduto dallo scambiatore al terreno tramite conduzione secondo la seguente formula: (M.C. Potter, 1998)

$$Q = S \cdot \lambda \cdot \Delta T$$

dove:

- Q e ΔT sono sempre potenza (W) e salto termico (°C)
- λ = la conducibilità termica del materiale da attraversare (il terreno nel nostro caso) (W/m\*K)
- S = fattore di forma (m)

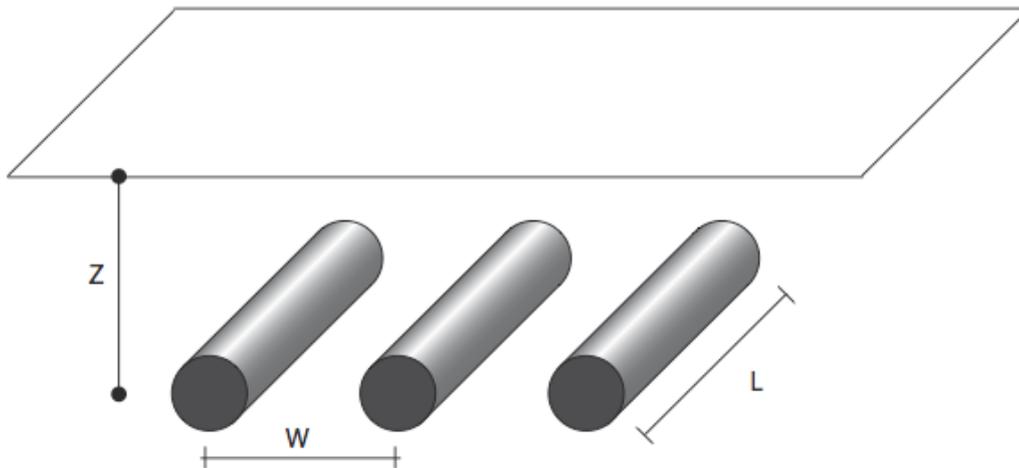
Il fattore di forma utilizzato per questo modello è quello di uno scambiatore composto da diversi tubi ed ha un valore differente a seconda della distanza dal dissipatore alla quale si vuole calcolare la temperatura.

$$S1 = \frac{2\pi L}{\ln \left[ \frac{2W}{\pi D} \sinh \left( \frac{2\pi Z}{W} \right) \right]} \quad (\text{per singolo tubo})$$

Dove:

- S1 = fattore di forma (m)
- W = passo (m)
- D = diametro esterno del tubo (m)

- $Z$  = distanza alla quale si vuole calcolare la temperatura (m)
- $L$  = lunghezza del trancio di tubo (m)



**Figura 26: Schema per il calcolo del fattore di forma (M.C. Potter,1998)**

Questa formula funziona bene se  $L \gg D$  e  $Z$  e  $W > 1,5 \cdot D$ . Queste proporzioni vengono rispettate prendendo  $L$  pari a 5 m in quanto  $z$  al massimo è di 1,5 m poiché visto che il fattore di forma è indipendente dalla conducibilità termica del mezzo, esso viene preso simmetrico sia sopra che sotto il fascio di tubi e la zona indagata è di 3 m. Il valore di  $S$  ottenuto è valido per singolo tubo quindi tutti i calcoli verranno effettuati in relazione ad un singolo tubo di polietilene.

**Tabella 10: Valori calcolati di  $S$  a varie distanze dal dissipatore.**

$Z$ (m)	$S_1$ (m)
0,1	9,468
0,2	5,991
0,3	4,395
0,4	3,470
0,5	2,867
0,6	2,443
0,7	2,128
0,8	1,885
0,9	1,692
1,0	1,534
1,1	1,404
1,2	1,294
1,3	1,200
1,4	1,118
1,5	1,047

Per il calcolo della temperatura esterna al tubo si utilizza invece il seguente fattore di forma S2: (M.C. Potter,1998)

$$S2 = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}$$

Dove:

- L = lunghezza del tubo (m)
- D<sub>2</sub> = diametro esterno del tubo (m)
- D<sub>1</sub> = diametro interno del tubo (m)

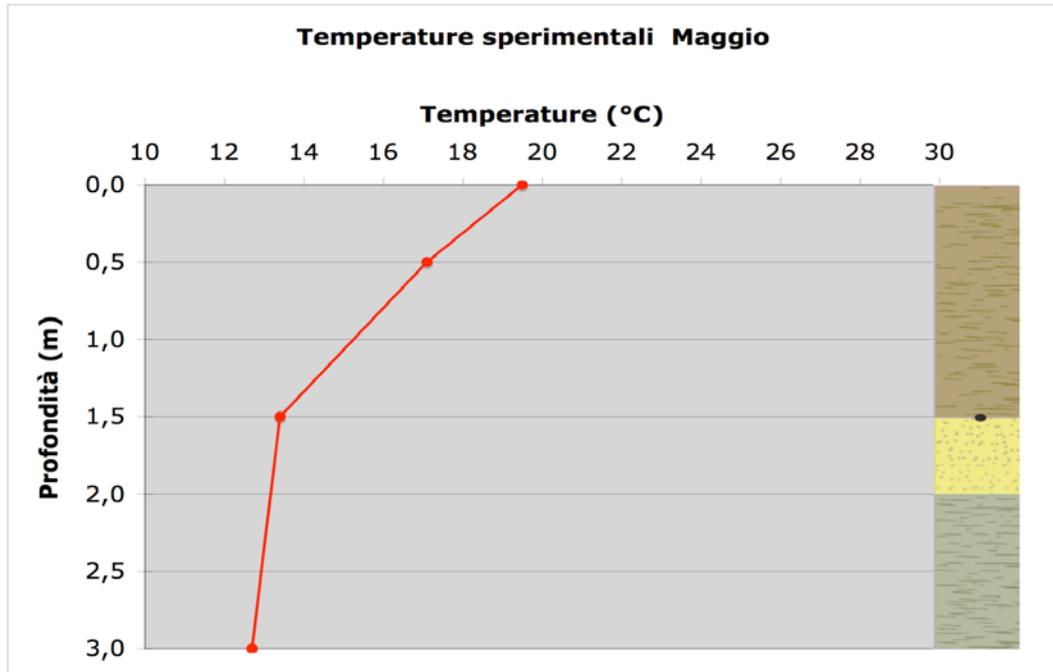
Lavorando in regime di raffrescamento (in estate), sapendo i dati di temperatura del fluido termovettore interno al tubo (che è funzione della posizione che si considera sul dissipatore) e la potenza che un singolo tubo deve dissipare in 5 m si riesce ad ottenere utilizzando S2 la temperatura esterna del tubo. Questa è la temperatura del terreno a 1,5 m di profondità, poi utilizzando il fattore di forma S1 si ottiene la temperatura alle varie profondità e queste vengono confrontate con quelle sperimentali del terreno indisturbato.

### 6.2.1 RAFFRESCAMENTO A MAGGIO

Il profilo di temperatura del terreno indisturbato in questo periodo è il seguente:

Profondità m	temperatura (°C)
0,0	19,5
0,5	17,1
1,5	13,4
3	12,7

**Tabella 11: dati sperimentali di temperatura a Maggio (fonte Aktis ItaliaS.r.l.)**



**Figura 27: Profilo sperimentale di temperatura indisturbata a Maggio in stratigrafia Aktis Italia S.r.l.**

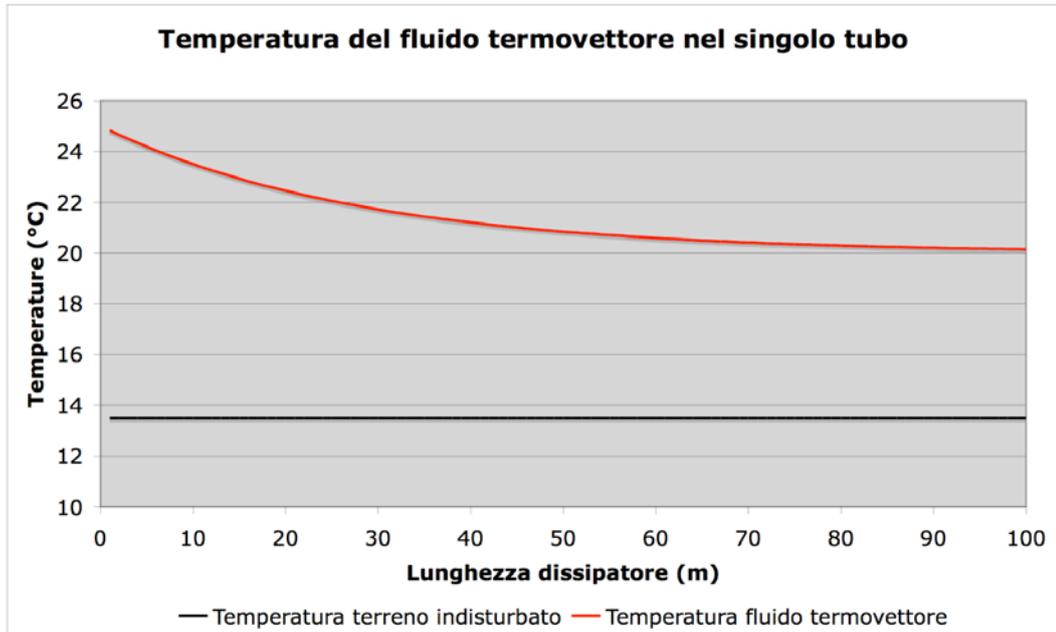
Potenza da dissipare totale	14500	W
Potenza per singolo circuito	1611	W
Potenza per 5 m di tubo	80,6	W
Portata totale	2492	l/h
Portata singolo tubo	277	l/h
T ingresso	25	°C
T uscita	20	°C
Diametro esterno tubo	25	mm
Diametro interno tubo	21	mm
Conducibilità termica del polietilene	0,41	W/mK

**Tabella 12: Dati di progetto**

Ipotizzando un decadimento esponenziale della temperatura interna al tubo più accentuata inizialmente in quanto il salto termico con il valore del terreno è maggiore possiamo ottenere le temperature da cui partire per il calcolo. Usando la media su 5 m di tubo nei punti prestabiliti si ha:

**Tabella 13: Temperature all'interno del tubo**

Posizione sul tubo (m)	Temperatura (°C)
0	24,4
33	21,6
66	20,4
100	20,2



**Figura 28: Andamento della temperatura all'interno del tubo in funzione della lunghezza e temperatura indisturbata del terreno a 1,5 m di profondità**

Considerando di lavorare all'ingresso del dissipatore (0 m) si ha una temperatura interna di 24,4 °C, attraverso il fattore di forma S2 e la conducibilità del materiale  $\lambda$  si ottiene la temperatura esterna al tubo:

L	5	m
Q	80,55	W
D2	0,025	m
D1	0,021	m
D2/D1	1,19047619	
ln(D2/D1)	0,174353387	
2*pi*K*L	12,874	W/K

**Tabella 14**

Ora  $S2*\lambda$  è calcolato (W/k) con i dati del tubo in polietilene, la temperatura esterna sarà inferiore a quella del fluido termovettore la quale è data dalla seguente:

$$T_{esterna} = T_{interna} - \frac{Q}{S\lambda}$$

$$\frac{1}{S\lambda} = R$$

R tubo	0,013543063	K/W
Q*R tubo	1,090893688	°C
T esterna	23,40910631	°C

**Tabella 15**

Il calore dissipato dal singolo tubo di polietilene viene ora ripartito tra sopra e sotto il dissipatore in proporzione alla conducibilità dei vari materiali con cui il tubo è a contatto, difatti esso si trova posizionato tra due strati distinti.

		Conducibilità (W/mK)	Media (W/mK)	Z (m)	%	Q (W)
Sopra	Argilla	1	1	1,5	34	27,4
Sotto	Sabbia	2,4	1,9	0,5	66	53,2
	Argilla	1,7		1		

**Tabella 16**

Sotto il dissipatore, sabbia ed argilla vengono attraversati in serie dal calore, quindi si è utilizzato una conducibilità media tra i due terreni.

La conduzione sopra il conduttore prevede l'utilizzo del 34% di Q ed il fattore di forma S1 che varia a seconda della distanza dal dissipatore (Vedi Tabella 5). In Tabella 14 si è utilizzato un valore che corrisponde a 10 cm sopra il dissipatore e quindi la temperatura che verrà trovata sarà appunto quella corrispondente a 1,4 m di profondità.

$$T_{\text{terreno}} = T_{\text{esterna}} - \frac{Q}{S1 * \lambda_{\text{terreno}}}$$

Dove:

- Testerna = temperatura esterna al tubo precedentemente calcolata e fissa.
- T terreno = temperatura alle varie profondità che si voleva cercare.

34%Q	27,387	W
$\lambda$ Terreno argilloso	1	W/mK
S1 f(Z)	9,467705	m
T esterna	23,4	°C
Q/(S1* $\lambda$ Terreno)	2,9	°C
T terreno	20,5	°C

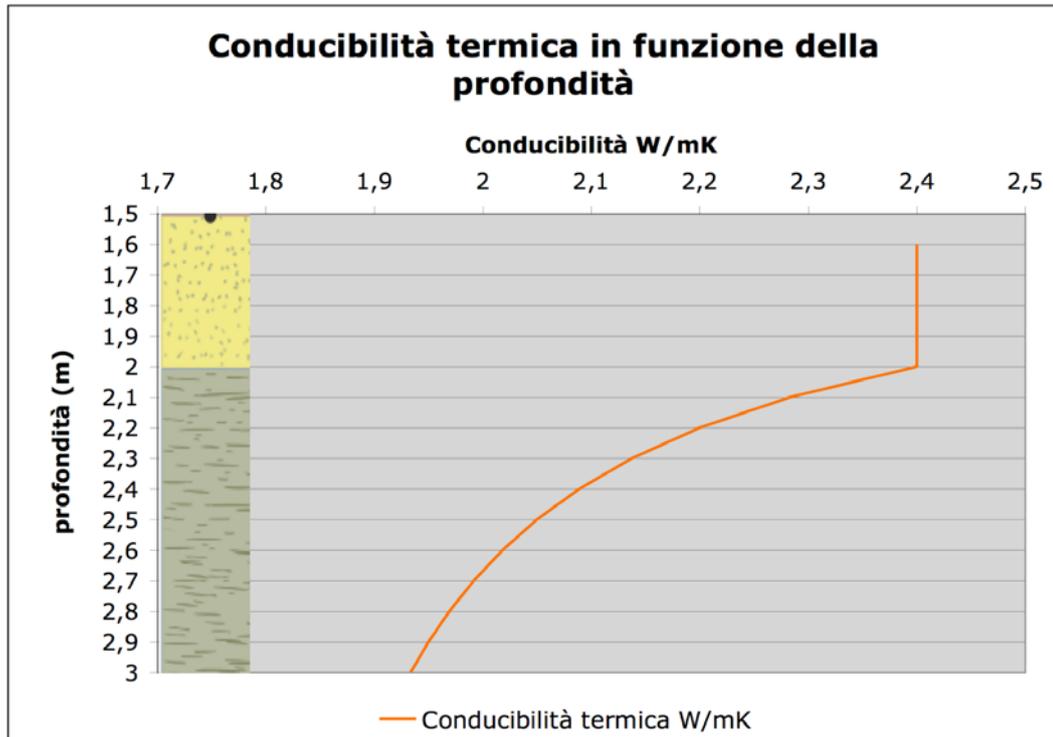
**Tabella 17**

**Tabella 18**

Z (m)	Conducibilità (W/mK)
1,6	2,4
1,7	2,4
1,8	2,4
1,9	2,4
2	2,4
2,1	2,3
2,2	2,2
2,3	2,1
2,4	2,1
2,5	2,1
2,6	2,0
2,7	2,0
2,8	2,0
2,9	2,0
3	1,9

Il procedimento continua allontanandosi dal dissipatore in direzione della superficie variando ogni volta S1. Ci si arresterà quando la temperatura del terreno data dal modello sarà uguale in valore a quella sperimentale del terreno indisturbato. Difatti in quel punto l'influenza del dissipatore finisce e si ha un flusso di calore contrario che impedisce un'ulteriore propagazione del calore.

Lo stesso procedimento viene adottato per la conduzione sotto il dissipatore però qui si avrà una conducibilità variabile in base alla profondità. Difatti se tra 1,5 m e 2 m il calore attraversa solo sabbia con conducibilità costante, da 2 m in poi si aggiunge argilla, che fa diminuire la conducibilità sempre più a mano mano che ci si approfondisce. Viene proposto un grafico dell'andamento della temperatura in funzione della profondità. I dati invece sono esposti in tabella 15.



**Figura 29** Grafico con l'andamento della conducibilità in funzione della profondità, sotto 2 m la conducibilità è variabile poiché sempre più argilla è coinvolta nella media e fa diminuire il valore complessivo pesato con la sabbia

A Maggio è stata valutata la perturbazione a varie distanze sul dissipatore come viene mostrato dal disegno in pianta.



**Figura 30:** Pianta del dissipatore in cui sono state evidenziate le varie sezioni che sono state prese in considerazione.

0 m

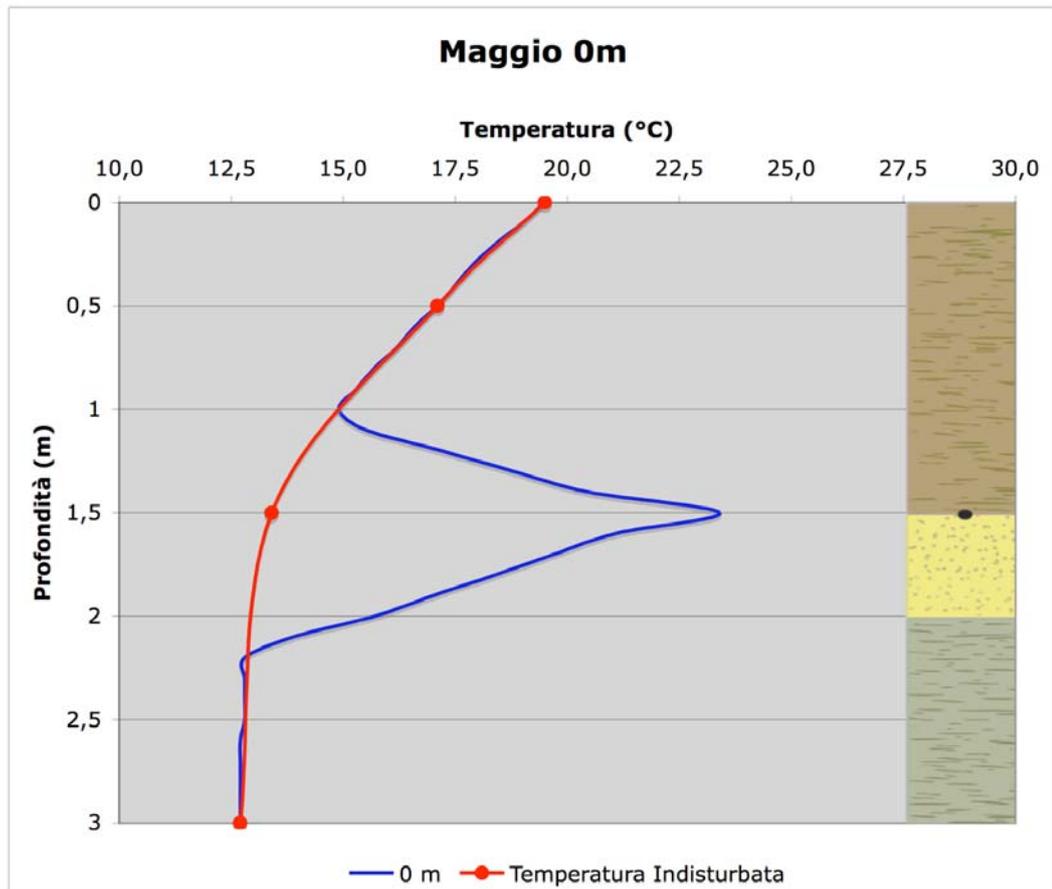


Figura 31: Variazione della temperatura a 0m a Maggio rispetto al profilo indisturbato con temperatura nel tubo di 24,4 °C.

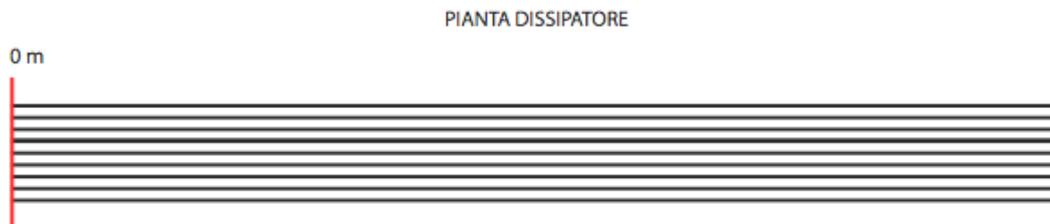


Figura 32: Pianta del dissipatore in cui è evidenziata la sezione di studio.

Si ha un valore massimo di 23,4 °C a 1,5 metri di profondità con un  $\Delta T$  di 10 °C rispetto alla temperatura del terreno indisturbato che era di 13,5 °C. La perturbazione si protrae verso superficie sino a 1 m mentre sotto la temperatura cambia sino a 2,2 m. La variazione maggiore si ha verso la sabbia in quanto più conduttiva, lasciandosi attraversare facilmente dal calore che il tubo sta cedendo. La curva di temperatura ha una inclinazione maggiore quando si ritorna in argilla a 2 m di profondità.

33 m

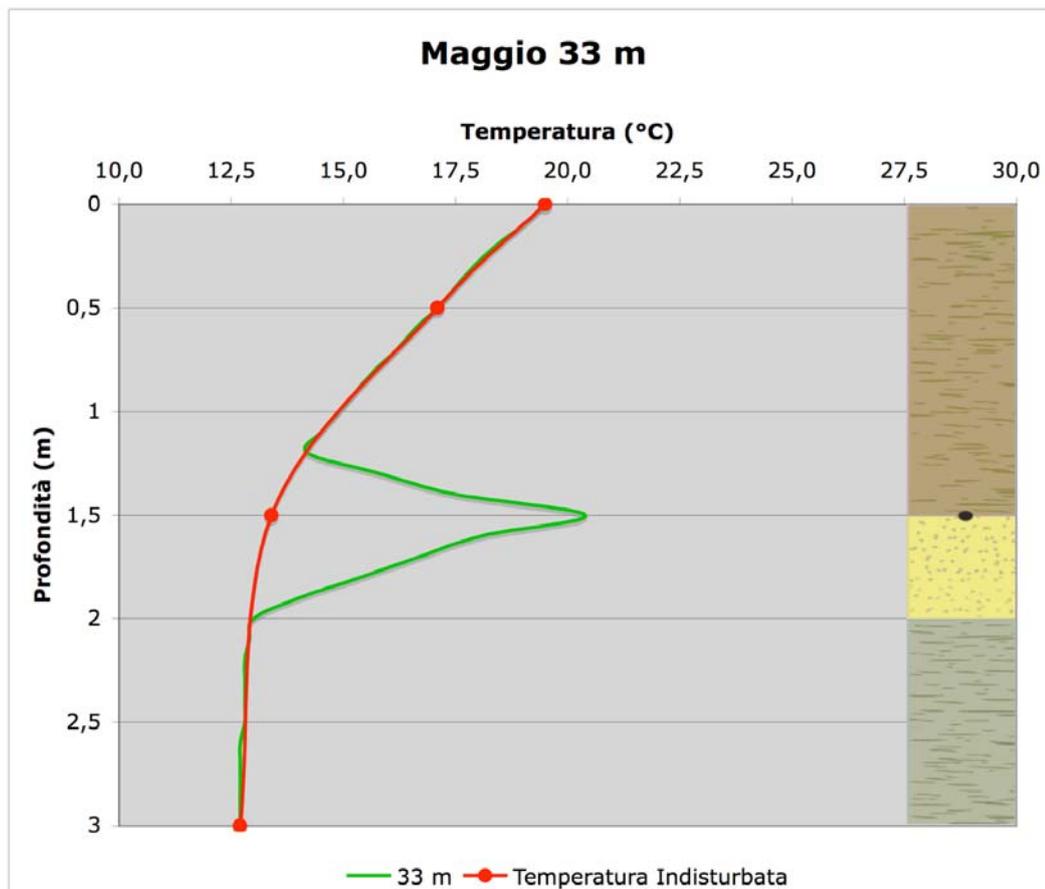


Figura 33: Variazione della temperatura a 33m a Maggio rispetto al profilo indisturbato con temperatura nel tubo di 21,6 °C.

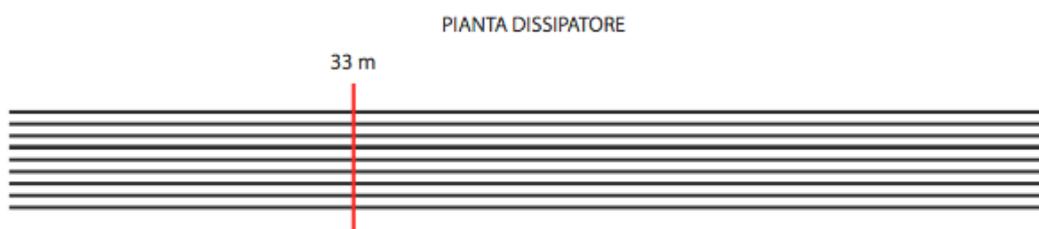


Figura 34: Pianta del dissipatore in cui è evidenziata la sezione di studio.

La temperatura a 1,5 m di profondità è di 20,4 °C e le perturbazioni vanno da 1,2 m a 2 m.

66 m

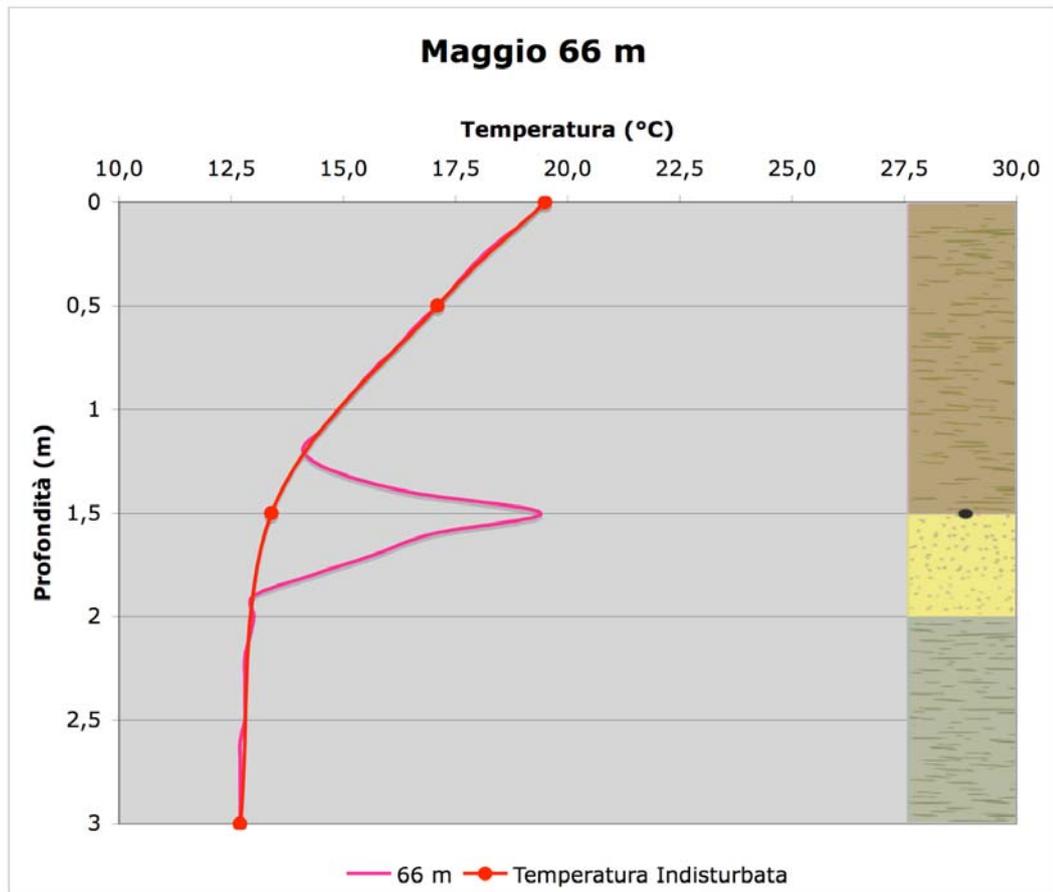


Figura 35: Variazione della temperatura a 66m a Maggio rispetto al profilo indisturbato con temperatura nel tubo di 20,4 °C.

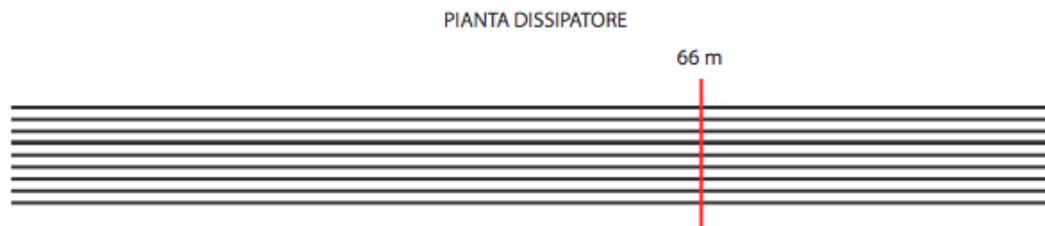


Figura 36: Pianta del dissipatore in cui è evidenziata la sezione di studio.

La temperatura massima è di 19,4 °C per un  $\Delta T$  di 6 °C, la perturbazione va dai 1,3 m ai 1,8 m.

100 m

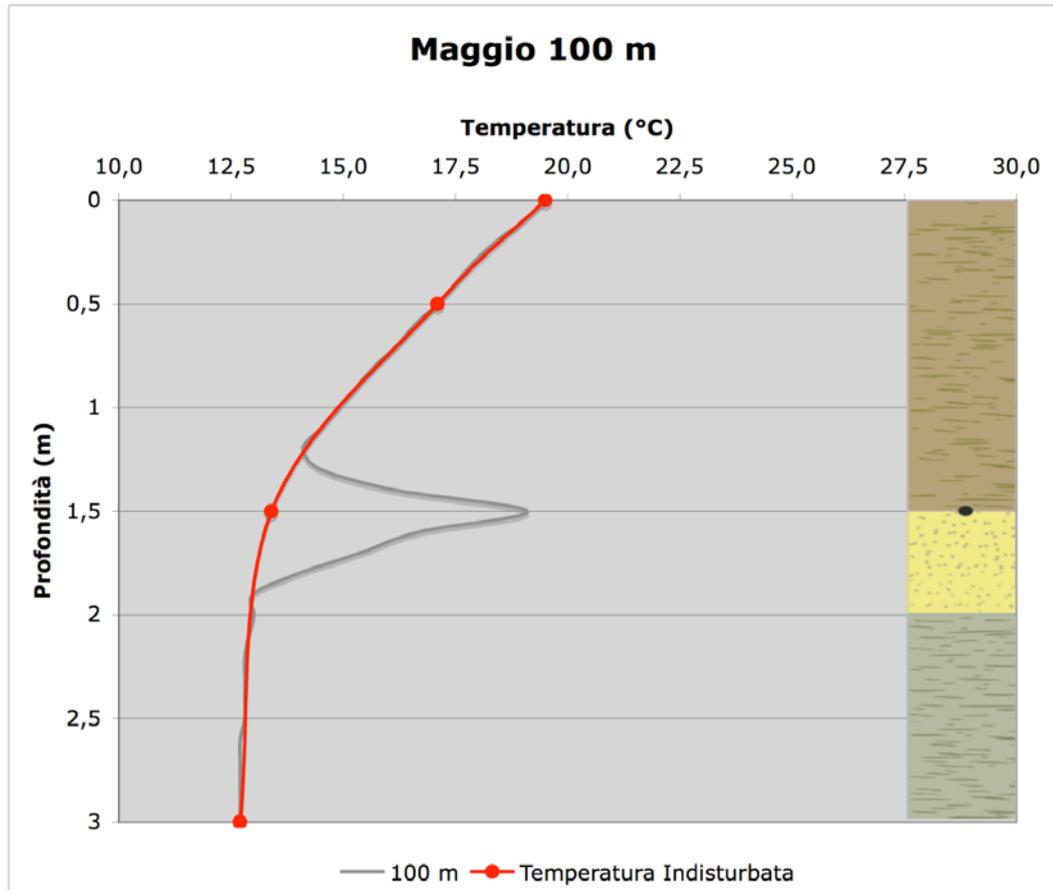


Figura 37: Variazione della temperatura a 100m a Maggio rispetto al profilo indisturbato con temperatura nel tubo di 20,2 °C.

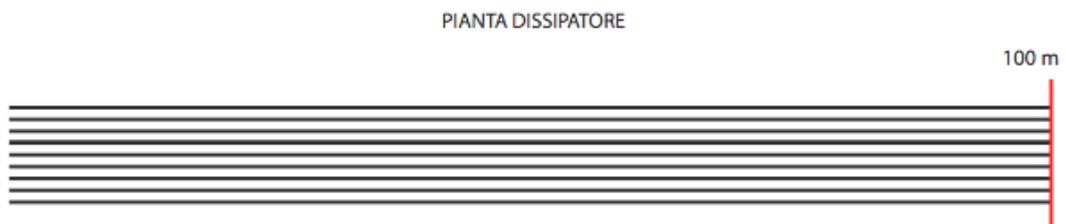


Figura 38: Pianta del dissipatore in cui è evidenziata la sezione di studio.

Il valore di temperatura massimo in corrispondenza della fine del dissipatore è di 19,1 °C in quanto la temperatura del fluido in quel punto è vicino ai 20°C, il limite di perturbazione si è ridotto notevolmente rispetto l'ingresso al dissipatore e va dai 1,3 m ai 1,8 m.

Ovviamente la situazione maggiormente critica è all'ingresso del dissipatore dove la variazione di temperatura è maggiore con un  $\Delta T$  di 10 °C ed una perturbazione di 1,2 m.

Di seguito vengono riportate tutte le temperature di perturbazione in regime di raffreddamento a Maggio.

**Tabella 19: Temperature di raffreddamento a Maggio**

z (m)	T indis. (°C)	T 0m (°C)	T 33m (°C)	T 66m (°C)	T 100m (°C)
0	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
0,1	19	19	19	19	19
0,2	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4
0,3	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9
0,4	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
0,5	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1
0,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6
0,7	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2
0,8	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7
0,9	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3
1	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9
1,1	14,5	15,5	14,5	14,5	14,5
1,2	14,1	17,2	14,2	14,1	14,1
1,3	13,8	18,8	15,8	14,8	14,5
1,4	13,6	20,5	17,5	16,5	16,2
1,5	13,5	23,4	20,4	19,4	19,1
1,6	13,2	21,1	18,1	17	16,7
1,7	13,1	19,7	16,7	15,7	15,4
1,8	13,1	18,4	15,4	14,3	14
1,9	13	17	14	13	13
2	13	15,7	13	13	13
2,1	12,9	13,9	12,9	12,9	12,9
2,2	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8
2,3	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8
2,4	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8
2,5	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8
2,6	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
2,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
2,8	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
2,9	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
3	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7

Sono evidenziate le caselle in cui la temperatura risulta essere modificata dal funzionamento in raffreddamento dell'impianto.

## 6.2.2 RAFFRESCAMENTO AD AGOSTO

Il profilo di temperatura del terreno indisturbato in questo periodo è il seguente:

Profondità m	temperatura (°C)
0,0	26,4
0,5	23,9
1,5	20,7
3	16,8

Tabella 20: dati sperimentali di temperatura ad Agosto (fonte Aktis ItaliaS.r.l.)

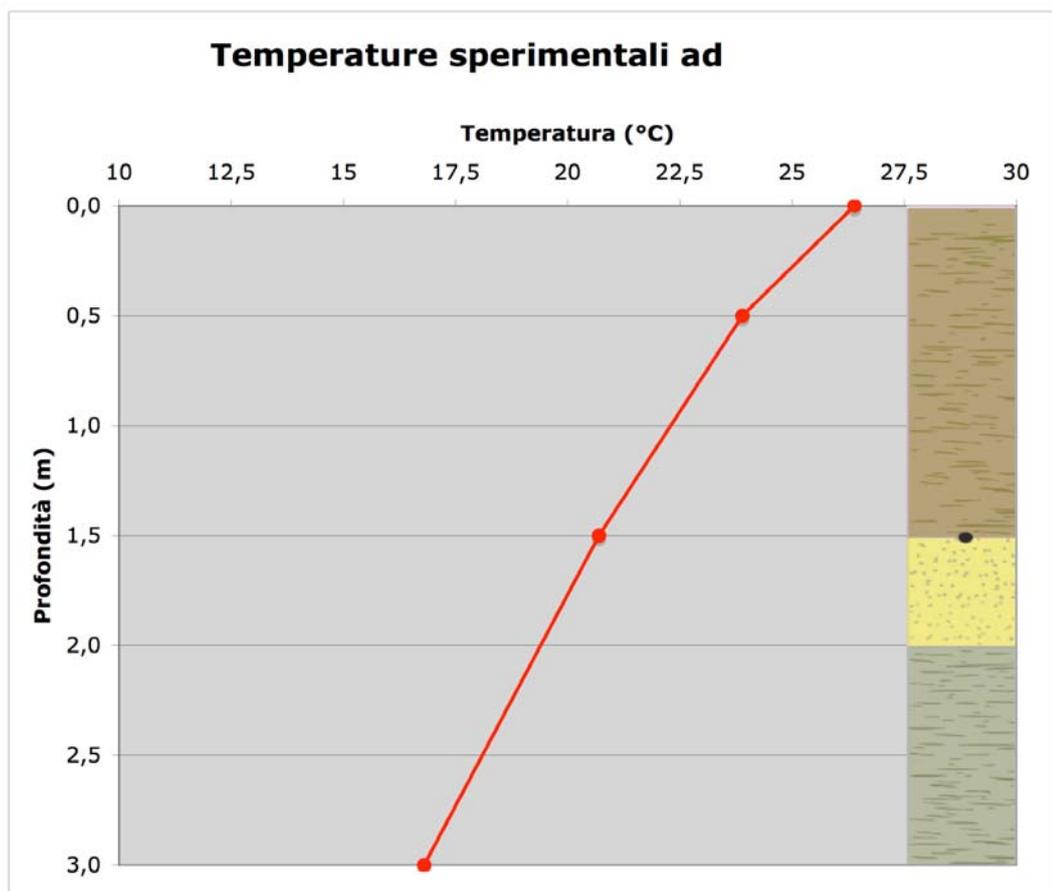


Figura 39: Profilo sperimentale di temperatura indisturbata ad Agosto.

Dati di progetto:

Potenza da dissipare totale	8700	W
Potenza per singolo circuito	967	W
Potenza per 5 m di tubo	48,3	W
Portata totale	2492	l/h
Portata singolo tubo	277	l/h
T ingresso	25	°C

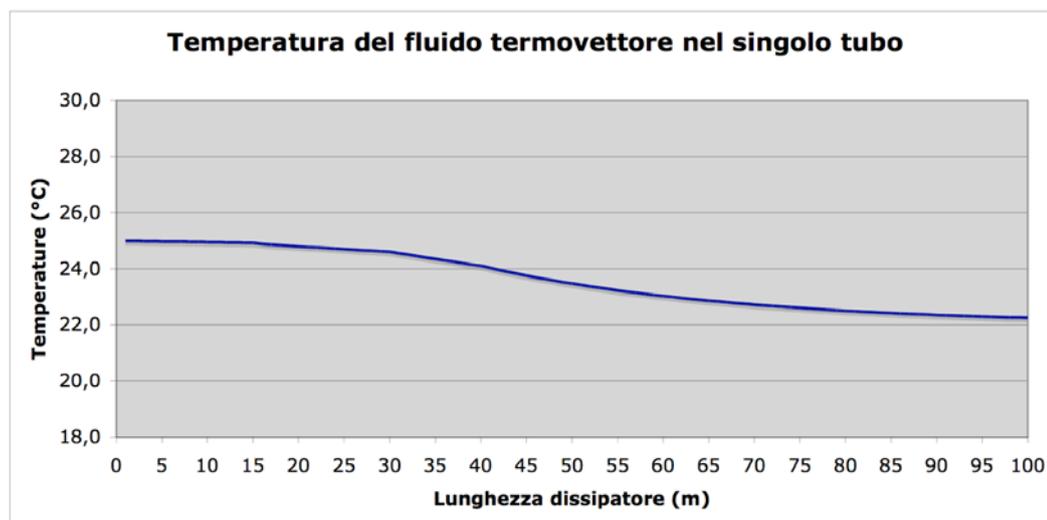
T uscita	22	°C
Diametro esterno tubo	25	mm
Diametro interno tubo	21	mm
Conduktività termica del polietilene	0,41	W/mK

**Tabella 21: dati di progetto**

Qui il salto termico richiesto dalla macchina è inferiore in quanto il terreno è più caldo e si ha a disposizione solo un salto termico di 3 °C potendo così scaricare solo una potenza di 8700 W. Chiaramente il COP della macchina sarà inferiore.

Posizione sul tubo (m)	Temperatura (°C)
0	25
33	24,5
66	22,8
100	22,3

**Tabella 22: Temperature all'interno del tubo in raffrcamento ad Agosto**



**Figura 40: Andamento della temperatura all'interno del tubo in funzione della lunghezza.**

Questo è il profilo interno della temperatura del termovettore ipotizzato, rispetto a Maggio il profilo è meno pendente nella parte iniziale in quanto il terreno in quella zona risulta riscaldato dall'utilizzo nei mesi precedenti dell'impianto.

Il procedimento per il calcolo delle variazioni di temperatura è sempre lo stesso di quello descritto per Maggio e qui vengono proposti i risultati.

0 m

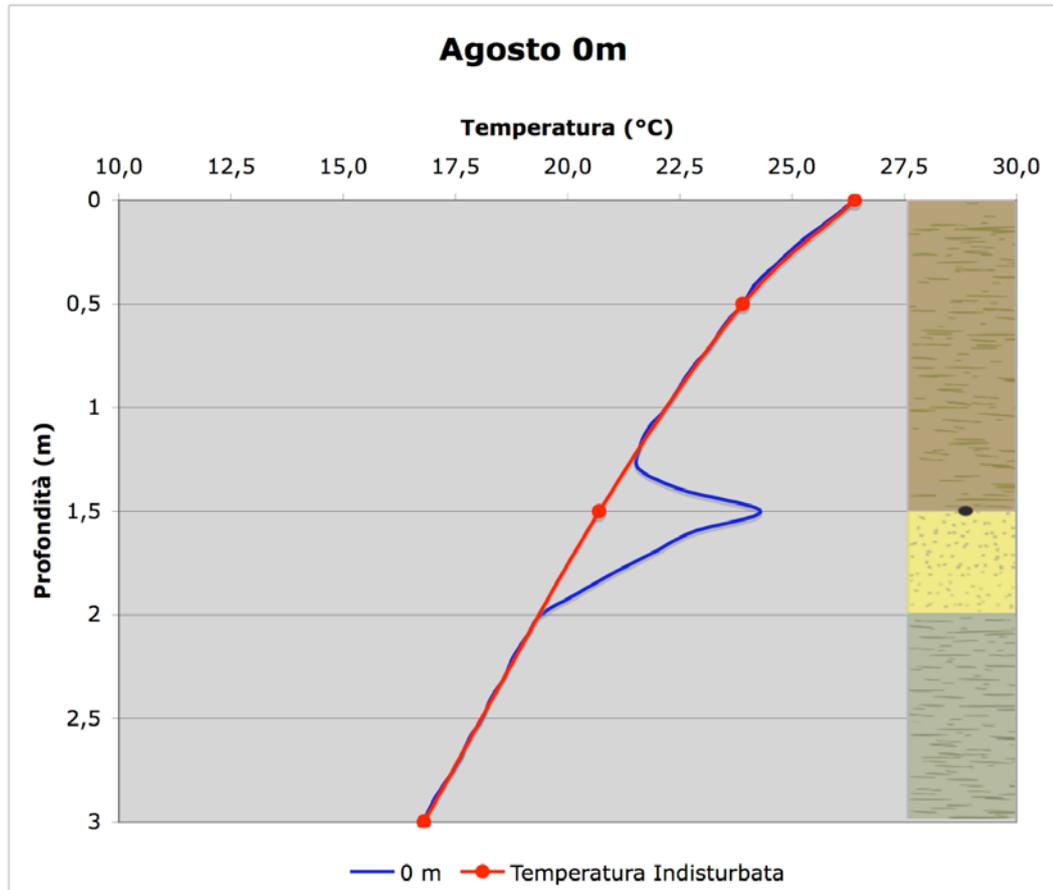


Figura 41: Variazione della temperatura a 0m ad Agosto rispetto al profilo indisturbato con temperatura nel tubo di 25 °C.

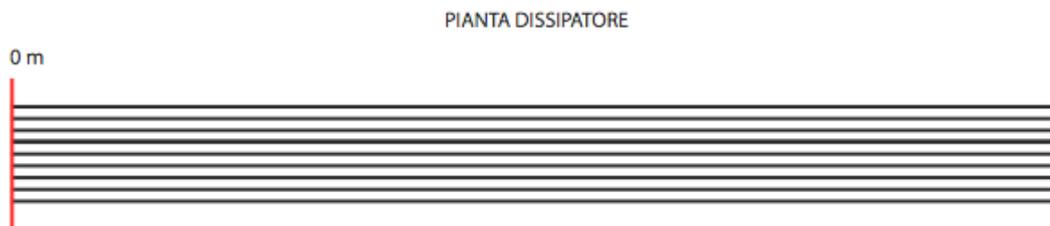


Figura 42: Pianta del dissipatore in cui è evidenziata la sezione di studio.

Si ha un valore massimo di 24,3 °C a 1,5 metri di profondità con un  $\Delta T$  di solo 3,6 °C rispetto alla temperatura del terreno indisturbato che era di 20,7°C. La perturbazione si protrae verso superficie sino a 1,2 m mentre sotto la temperatura cambia sino a 1,9 m.

33 m

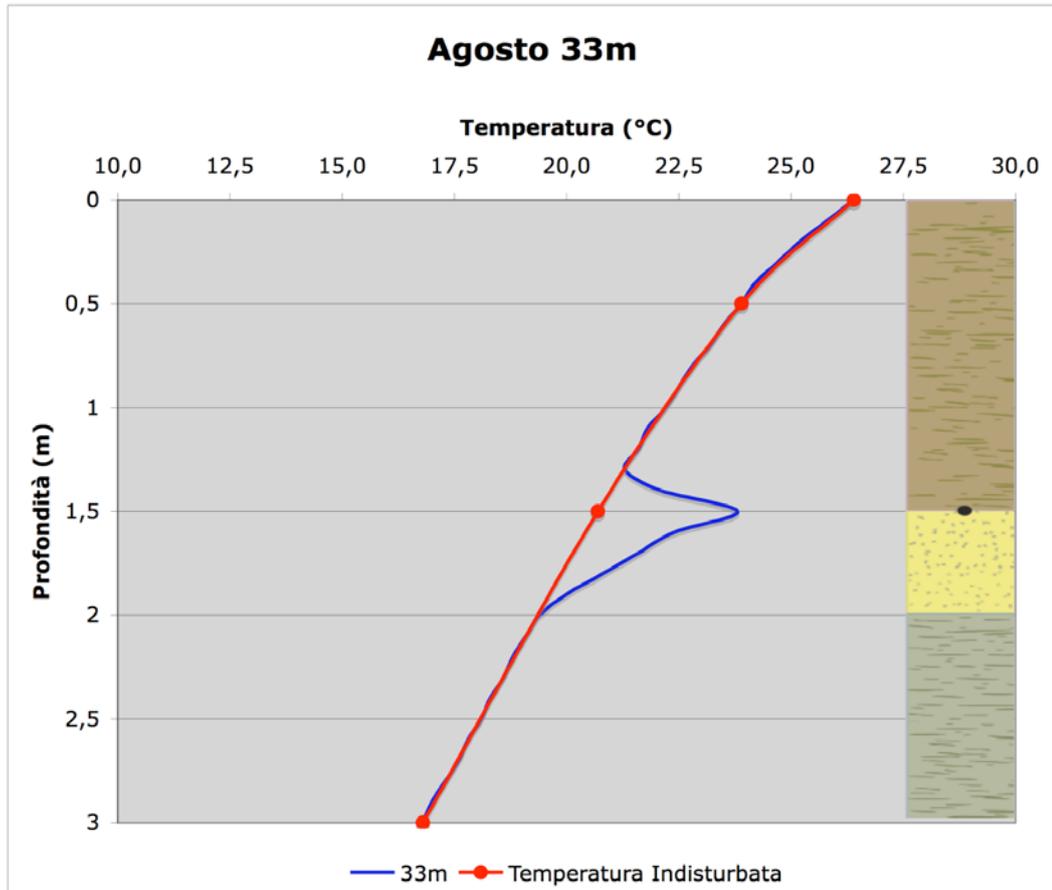


Figura 43 : Variazione della temperatura a 33m ad Agosto rispetto al profilo indisturbato con temperatura nel tubo di 24,5°C.

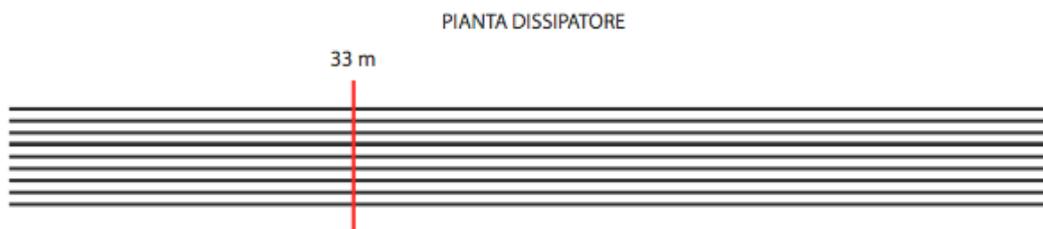


Figura 44: Pianta del dissipatore in cui è evidenziata la sezione di studio.

La temperatura a 1,5 m di profondità è di 23,8 °C e le perturbazioni vanno da 1,4 m a 1,9 m.

66 m

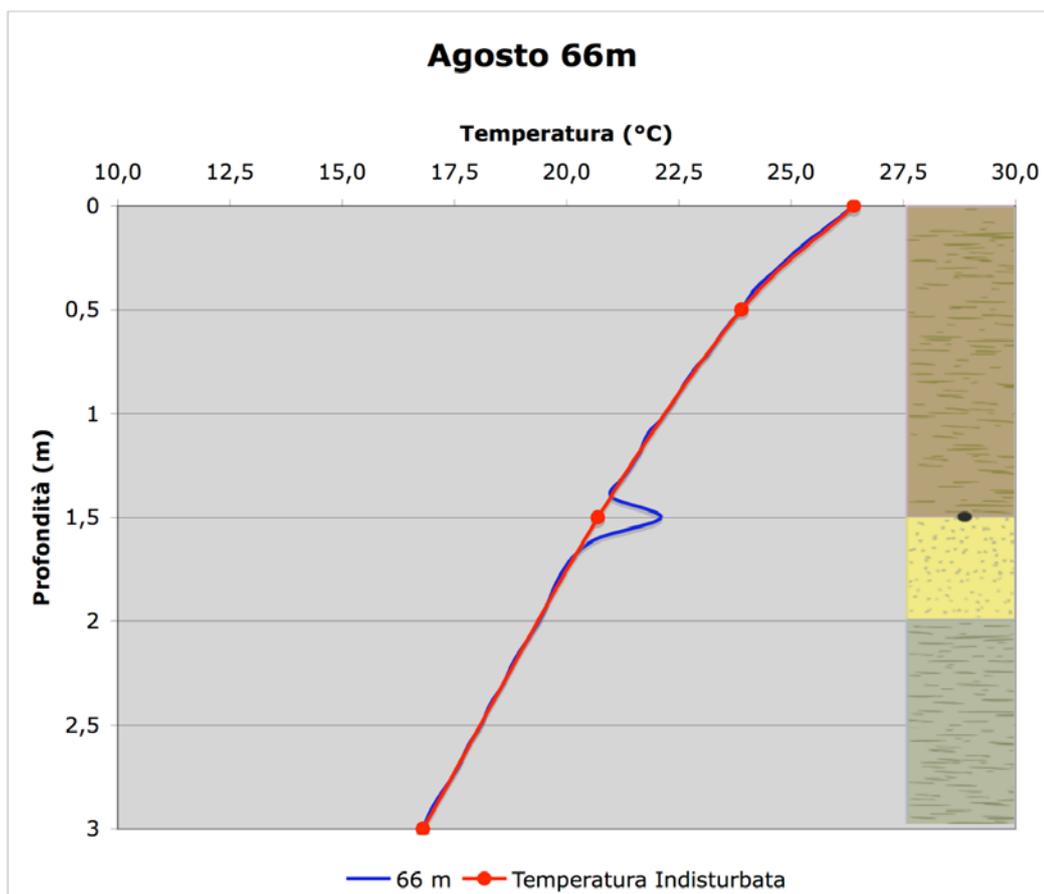


Figura 45: Variazione della temperatura a 66m ad Agosto rispetto al profilo indisturbato con temperatura nel tubo di 22,8°C.

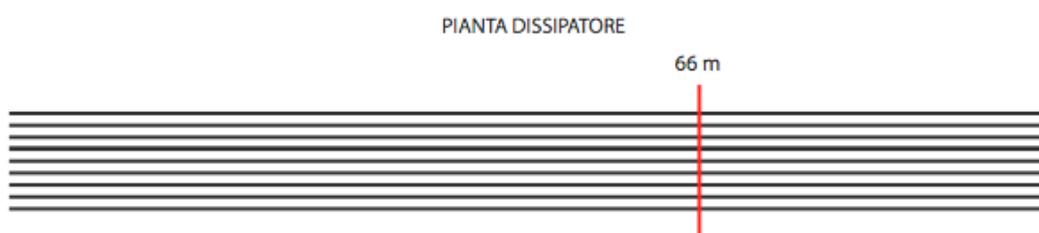


Figura 46: Pianta del dissipatore in cui è evidenziata la sezione di studio.

La temperatura massima è di 22,1 °C. La perturbazione è minima e va dai 1,4 m ai 1,6 m, ciò implica che il salto termico da sfruttare è pressoché nullo poiché il terreno essendo già molto caldo per motivi stagionali non risulta molto influenzato dal dissipatore.

100 m

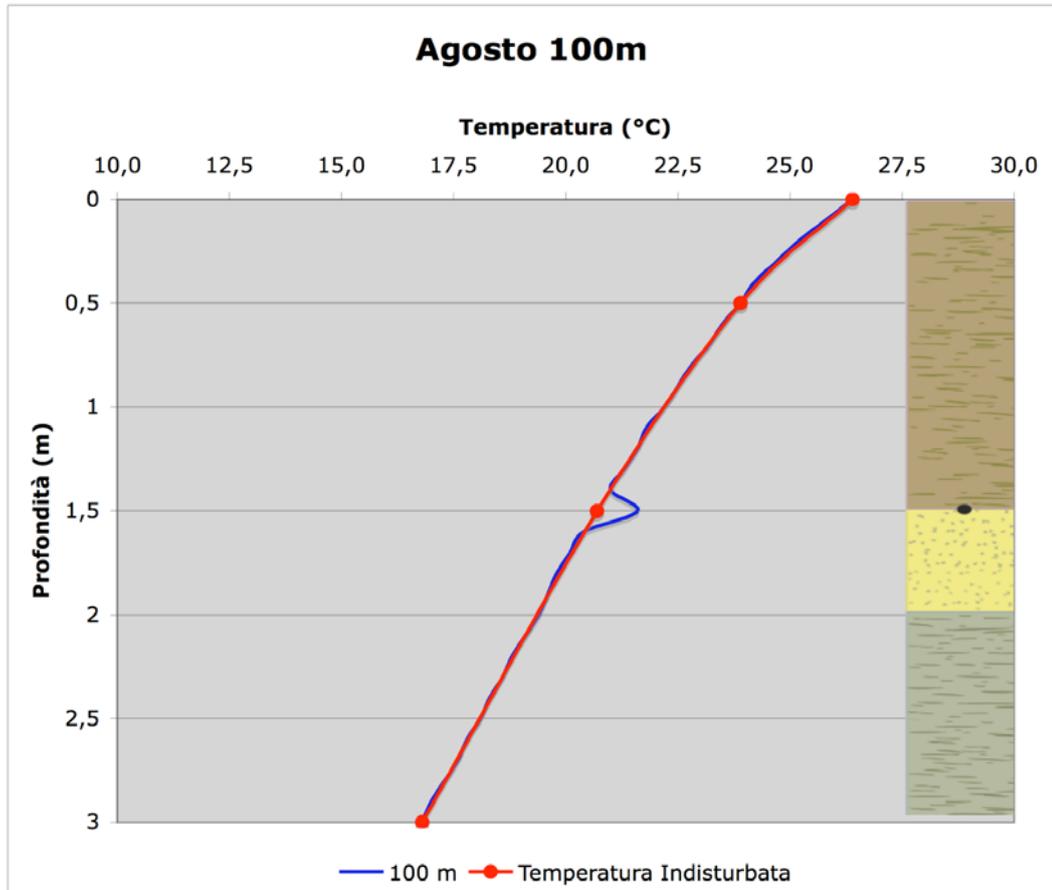


Figura 47: Variazione della temperatura a 100m ad Agosto rispetto al profilo indisturbato con temperatura nel tubo di 22,3°C.

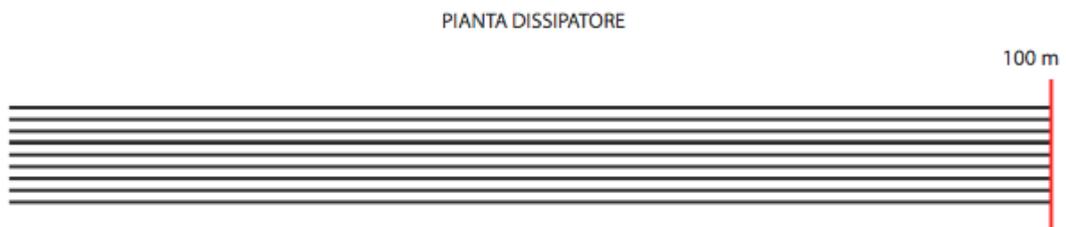


Figura 48: Pianta del dissipatore in cui è evidenziata la sezione di studio.

Di seguito vengono riportate tutte le temperature di perturbazione in regime di raffreddamento ad Agosto.

**Tabella 23: Temperature di reffrescamento ad Agosto**

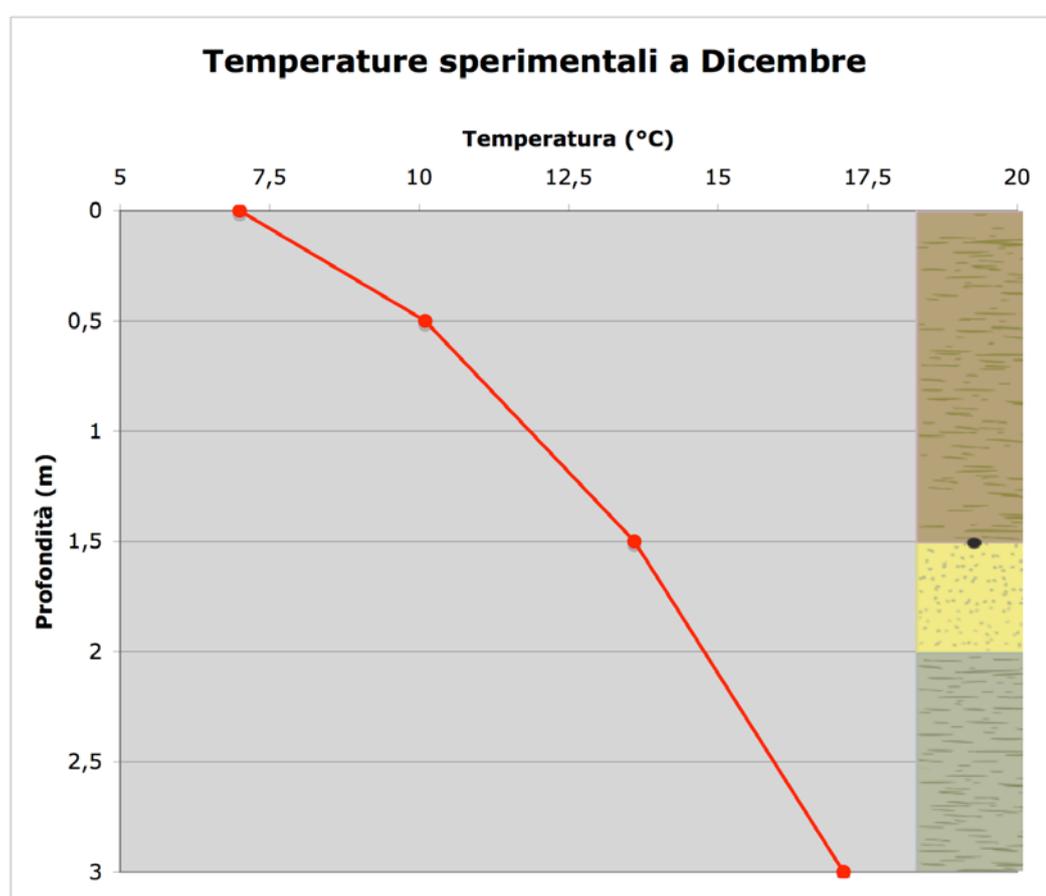
z (m)	T indis. (°C)	T 0m (°C)	T 33m (°C)	T 66m (°C)	T 100m (°C)
0	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4
0,1	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8
0,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2
0,3	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7
0,4	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2
0,5	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9
0,6	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
0,7	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2
0,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8
0,9	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
1	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2
1,1	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8
1,2	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6
1,3	21,3	21,6	21,3	21,3	21,3
1,4	21	22,6	22,1	21	21
1,5	20,7	24,3	23,8	22,1	21,6
1,6	20,4	22,8	22,4	20,7	20,4
1,7	20,1	21,9	21,6	20,1	20,1
1,8	19,8	21	20,8	19,8	19,8
1,9	19,6	20,2	20	19,6	19,6
2	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
2,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1
2,2	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8
2,3	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6
2,4	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
2,5	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1
2,6	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8
2,7	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6
2,8	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3
2,9	17	17	17	17	17
3	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8

### 6.2.3 RISCALDAMENTO IN DICEMBRE

Il profilo di temperatura del terreno indisturbato in questo periodo è il seguente:

Profondità m	temperatura (°C)
0,0	7
0,5	10,1
1,5	13,6
3	17,1

Tabella 24: dati sperimentali di temperatura a Dicembre (fonte Aktis ItaliaS.r.l.)



Dati sperimentali di temperatura indisturbata a Dicembre con stratigrafia Aktis Italia S.r.l.

Dati di progetto:

Potenza da dissipare totale	6900	W
Potenza per singolo circuito	767	W
Potenza per 5 m di tubo	38,3	W
Portata totale	1188	l/h

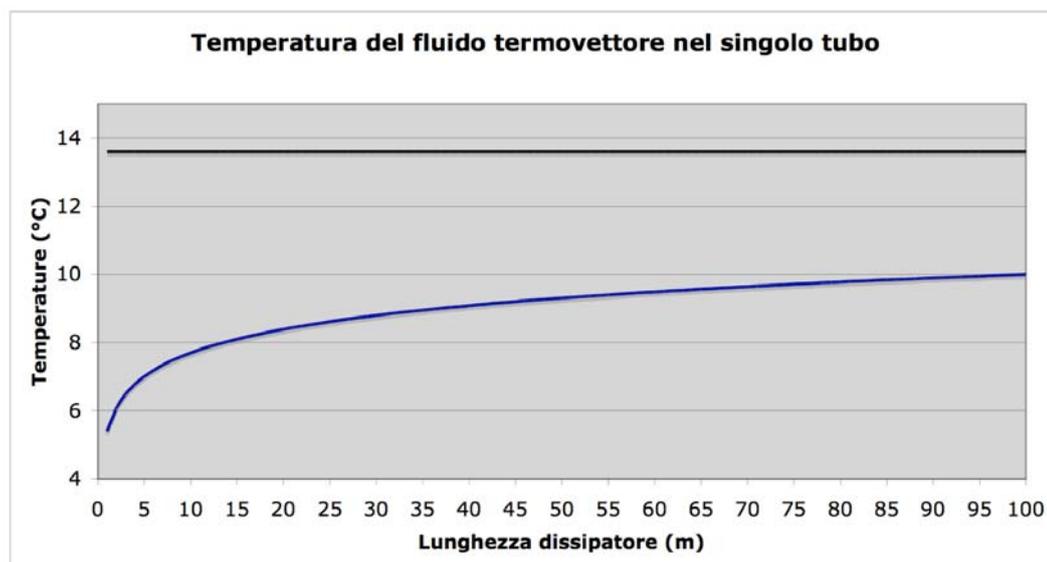
Portata singolo tubo	132	l/h
T ingresso	5	°C
T uscita	10	°C
Diametro esterno tubo	25	mm
Diametro interno tubo	21	mm
Conduttività termica del polietilene	0,41	W/mK

**Tabella 25: dati di progetto**

Questo impianto non è stato dimensionato per il riscaldamento invernale e dunque lo scambiatore risulta molto lungo. La potenza necessaria richiesta dalla PDC è bassa pari a 6,9 kW e ciò comporta che per un salto dempre di 5°C la portata deve essere circa la metà di quella estiva. La ditta utilizza una caldaia tradizionale per il riscaldamento del capannone e quindi il riscaldamento del geotermico serve solo per gli uffici (superficie 500 m<sup>2</sup>).

Posizione sul tubo (m)	Temperatura (°C)
0	6,4
33	8,9
66	9,6
100	10

**Tabella 26: Temperature all'interno del tubo**

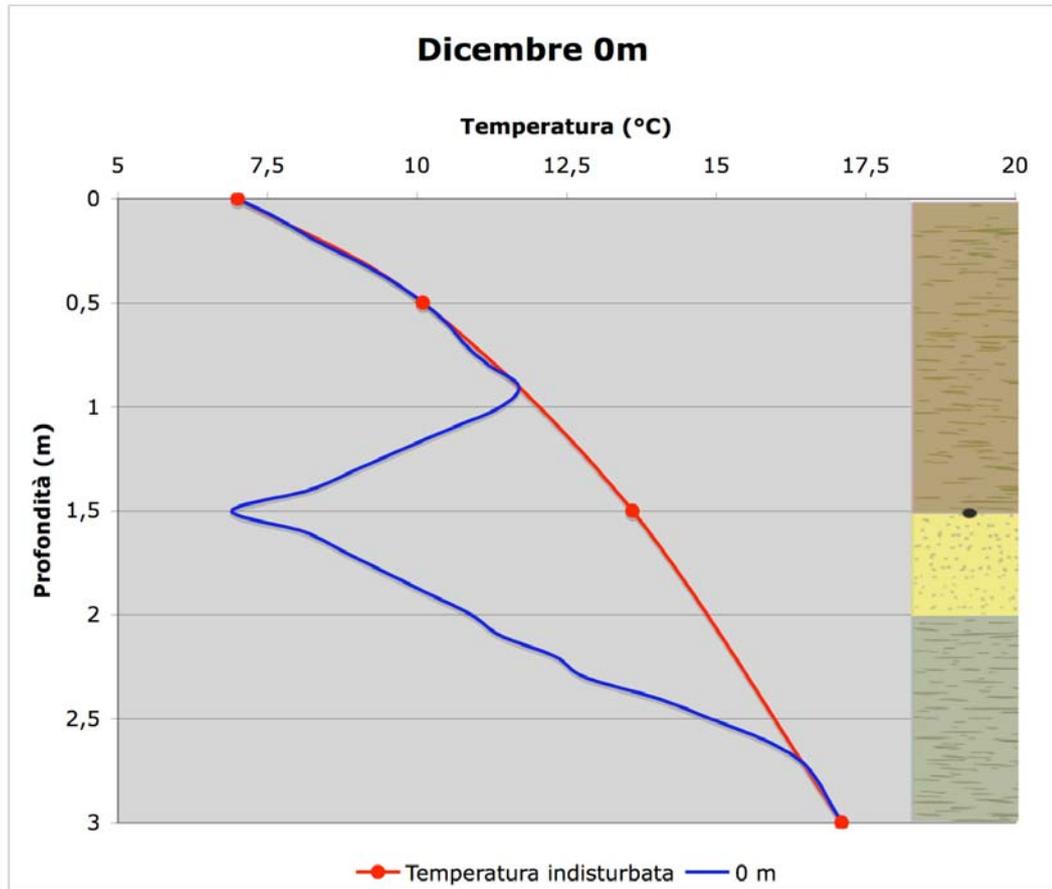


**Figura 49: Profilo di temperatura nel tubo in funzione della lunghezza a Dicembre e temperatura indisturbata del terreno a 1,5 m.**

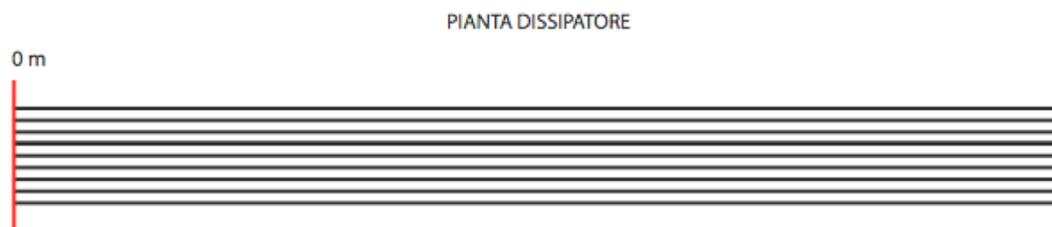
Questo è il profilo interno della temperatura del termovettore ipotizzato, ha un andamento esponenziale molto accentuato nella parte iniziale dove di ha un grande salto termico (7,3°C) tra temperatura indisturbata del terreno e temperatura del fluido.

Il procedimento per il calcolo delle variazioni di temperatura è sempre lo stesso di quello descritto per il reffrescamento estivo e qui vengono proposti i risultati.

**0 m**



**Figura 50: Variazione della temperatura a 0m a Dicembre rispetto al profilo indisturbato con temperatura nel tubo di 6,4°C.**



**Figura 51: Pianta del dissipatore in cui è evidenziata la sezione di studio.**

All'ingresso nel dissipatore si ha la più ampia variazione, la temperatura minima si ha a 1,5 m di profondità ed ha un valore di 6,9 con un  $\Delta T$  di 7 gradi. La temperatura risulta superiore allo zero termico e quindi non ci sono problemi di congelamento del terreno e di forti ripercussioni sulla flora. La variazione di temperatura va dai 0,9 m ai 2,6 m di profondità.

33 m

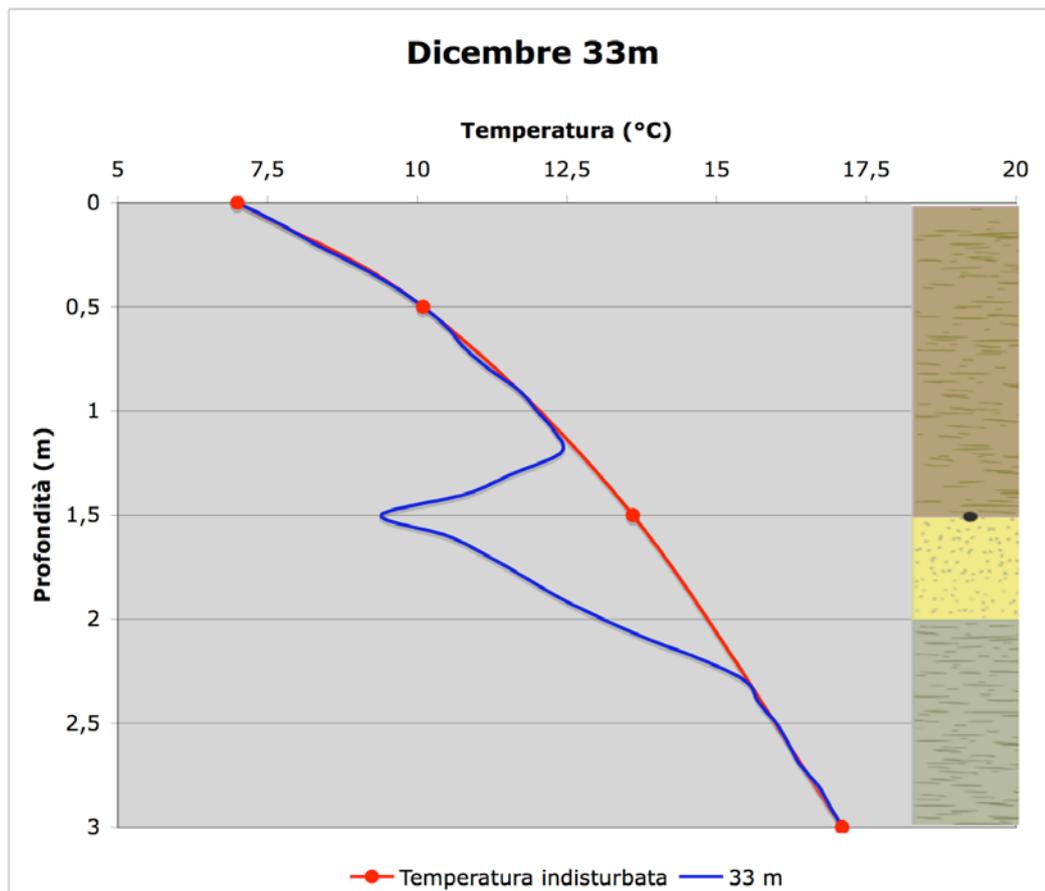


Figura 52: Variazione della temperatura a 33m a Dicembre rispetto al profilo indisturbato con temperatura nel tubo di 8,9°C.

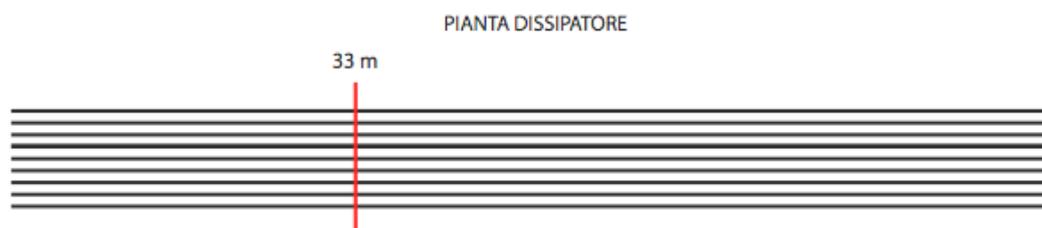


Figura 53: Pianta del dissipatore in cui è evidenziata la sezione di studio.

Il cono di variazione, come aspettato, diminuisce partendo da una temperatura di 9,4 °C e propagandosi in superficie sino a 1,2 m ed in profondità 2,2 m.

66 m

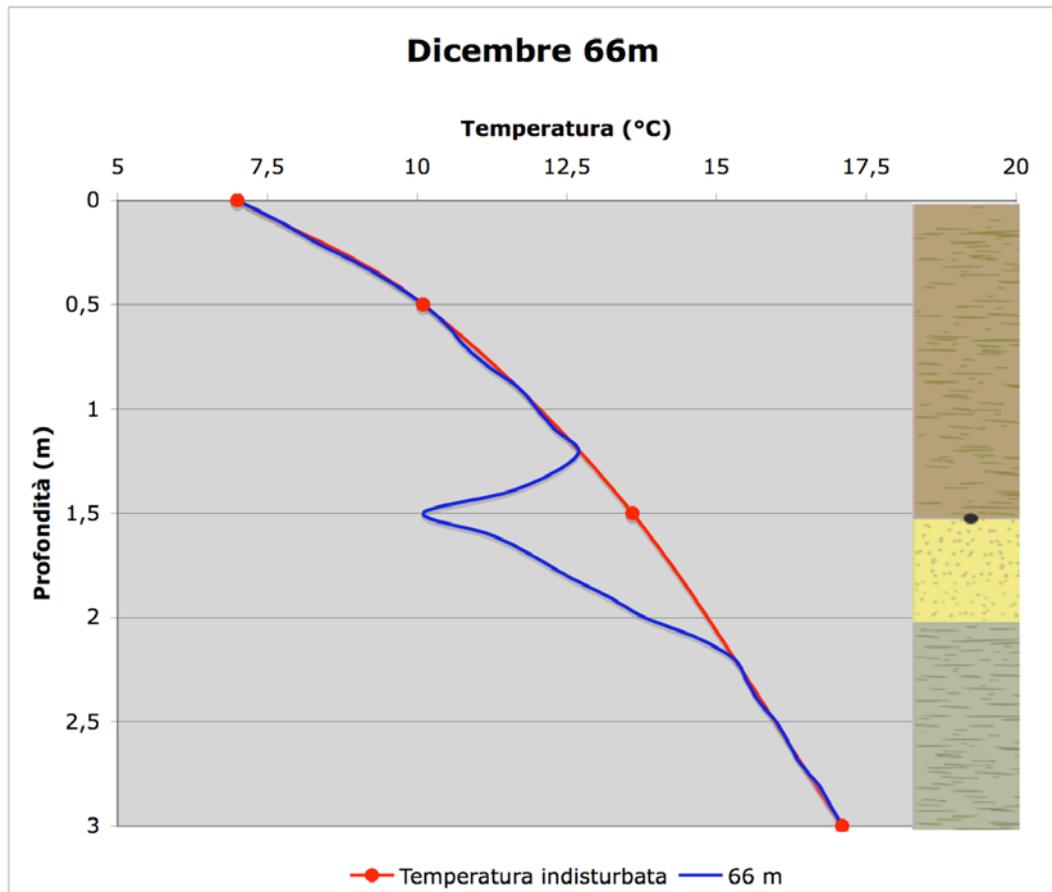


Figura 54: Variazione della temperatura a 66 m a Dicembre rispetto al profilo indisturbato con temperatura nel tubo di 9,6°C.

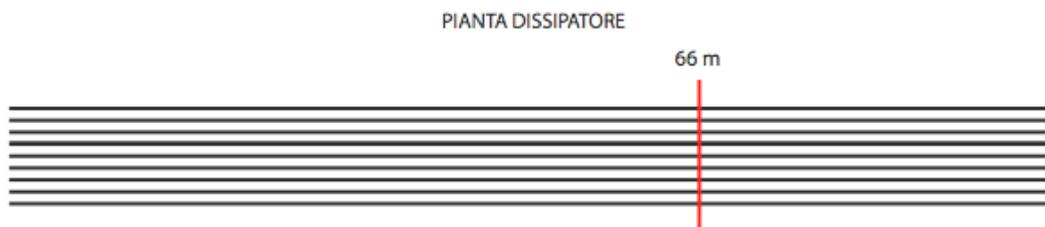


Figura 55: Pianta del dissipatore in cui è evidenziata la sezione di studio.

Temperatura minima di 10,1 °C con  $\Delta T$  di 3,5°C ad 1,5 m di profondità, la variazione va da 1,3 m a 2,1 m.

100 m

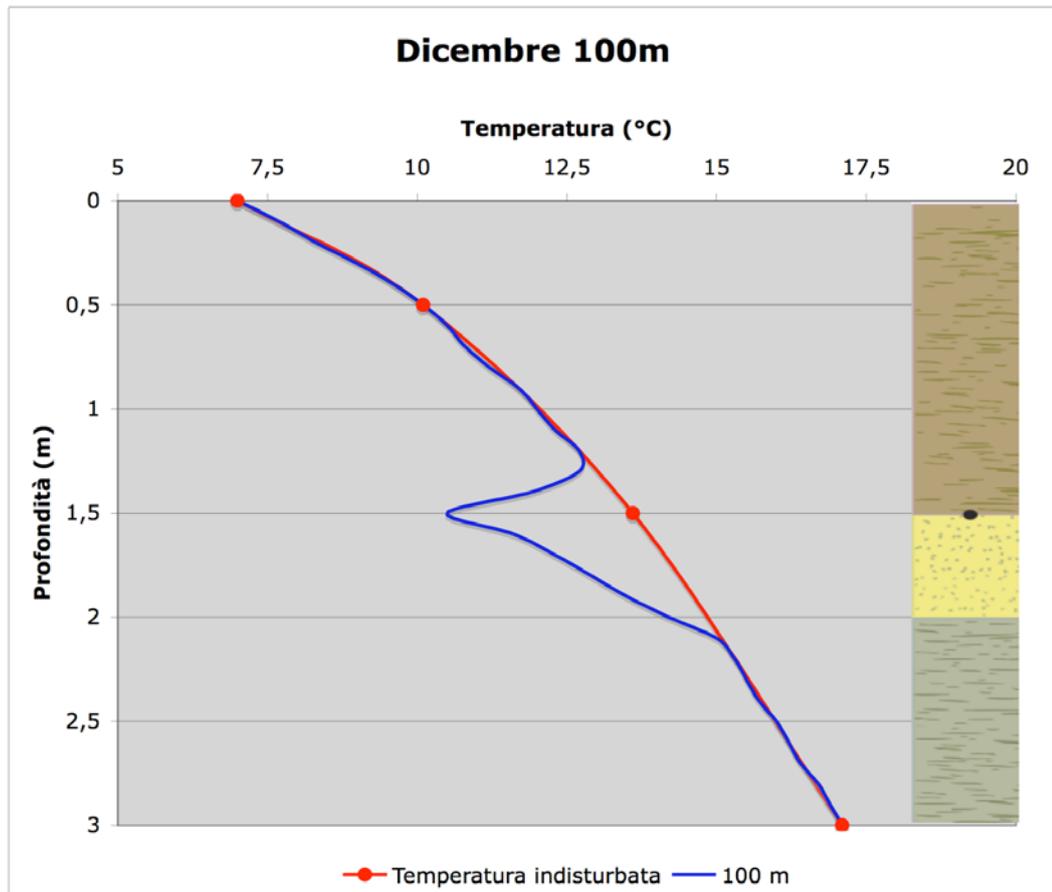


Figura 56: Variazione della temperatura a 100 m a Dicembre rispetto al profilo indisturbato con temperatura nel tubo di 10°C.

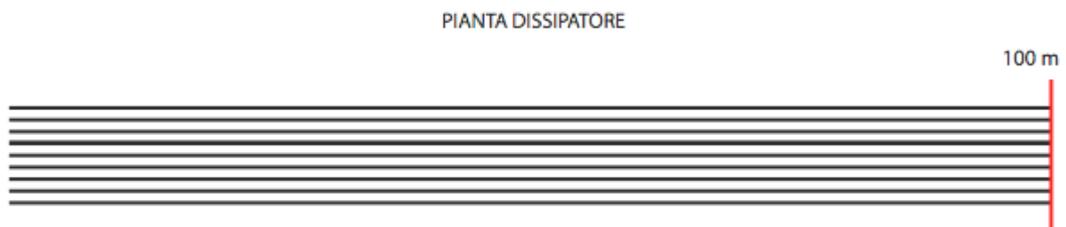


Figura 57: Pianta del dissipatore in cui è evidenziata la sezione di studio.

Molto simile al profilo di temperatura precedente in quanto c'è solo una variazione di 0,4 °C tra 66m e 100m (uscita dal dissipatore) esso mostra che si potrebbe sfruttare maggiormente il salto termico avvicinandosi ad una temperatura d'uscita dell'acqua pari a 13,6 °C (temperatura indisturbata del terreno). Questa è una scelta dell'impiantista che in inverno non ha bisogno di assorbire molta potenza poiché è installata una caldaia di compensazione.

Qui di seguito vengono riportate le temperature e variazioni di Dicembre.

**Tabella 27: Temperature di Dicembre**

z (m)	T indis. (°C)	T 0m (°C)	T 33m (°C)	T 66m (°C)	T 100m (°C)
0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
0,1	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7
0,2	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
0,3	9	9	9	9	9
0,4	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
0,5	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1
0,6	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
0,7	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8
0,8	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
0,9	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
1	12	11,4	12	12	12
1,1	12,3	10,6	12,3	12,3	12,3
1,2	12,7	9,8	12,4	12,7	12,7
1,3	13	9	11,6	12,3	12,7
1,4	13,3	8,2	10,8	11,5	11,9
1,5	13,6	6,9	9,4	10,1	10,5
1,6	13,8	8,1	10,5	11,2	11,6
1,7	14,1	8,8	11,2	11,9	12,3
1,8	14,3	9,5	11,8	12,5	12,9
1,9	14,6	10,2	12,4	13,2	13,5
2	14,8	10,9	13,1	13,8	14,2
2,1	15,1	11,4	13,9	14,7	15
2,2	15,3	12,3	14,8	15,3	15,3
2,3	15,5	12,8	15,5	15,5	15,5
2,4	15,7	14	15,7	15,7	15,7
2,5	16	14,9	16	16	16
2,6	16,2	15,8	16,2	16,2	16,2
2,7	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4
2,8	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7
2,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9
3	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1

### 6.3 MISURE SPERIMENTALI E SUGGERIMENTI DI CONVALIDA DEL MODELLO

Il modello presentato è basato sulla stratigrafia, la sua interazione con le temperature di ingresso ed uscita dal dissipatore, la geometria dello stesso e le potenze richieste dalla pompa di calore. Per verificare l'attendibilità del modello sono stati fatti due sondaggi di misurazione della temperatura a varie profondità presso l'azienda Aktis Italia S.r.l. dove è appunto ubicato l'impianto geotermico in questione. Essi sono stati fatti all'ingresso del dissipatore dove la variazione di temperatura risulta essere più marcata.



**Figura 58: Ubicazione dei sondaggi sperimentali**

Per la perforazione dei primi 50 cm di terreno è stato utilizzato un trapano munito di punta da 21mm, in seguito si è proceduto con l'infissione di un tondino di diametro 10 mm sino alla profondità di 2,7 m. Una volta effettuato il foro, è stata calata una verga di rame cava sempre da 10 mm con in punta un termometro collegato ad una centralina di lettura che ha permesso l'ottenimento delle temperature del terreno.



**Figura 59: Foto del termometro sonda utilizzato per l'ottenimento delle misure sperimentali**

**Figura 60: Foto della centralina di acquisizione dati.**



Purtroppo non è stato possibile fare un elevato numero di sondaggi, ad esempio lungo lo sviluppo longitudinale del dissipatore, in quanto i metodi di perforazione adottati non permettevano una rapida ed agevole perforazione del suolo. Non è stato possibile utilizzare una tecnica a roto-percussione che avrebbe velocizzato le operazioni, in quanto era concreta

la possibilità di forare i tubi di polietilene dell'impianto posizionato a 1,5 m di profondità.

I due sondaggi sono stati fatti nei primi giorni di Settembre, un periodo in cui il funzionamento a raffrescamento dell'impianto non è più a regime in quanto sia la stagione che l'utenza non lo prevedevano più. Di questo ne bisogna tenere conto nella lettura dei dati, considerando un periodo di transitorio non ben definito in cui il terreno si scalda e si raffredda a seconda del numero di ore di funzionamento dell'impianto.

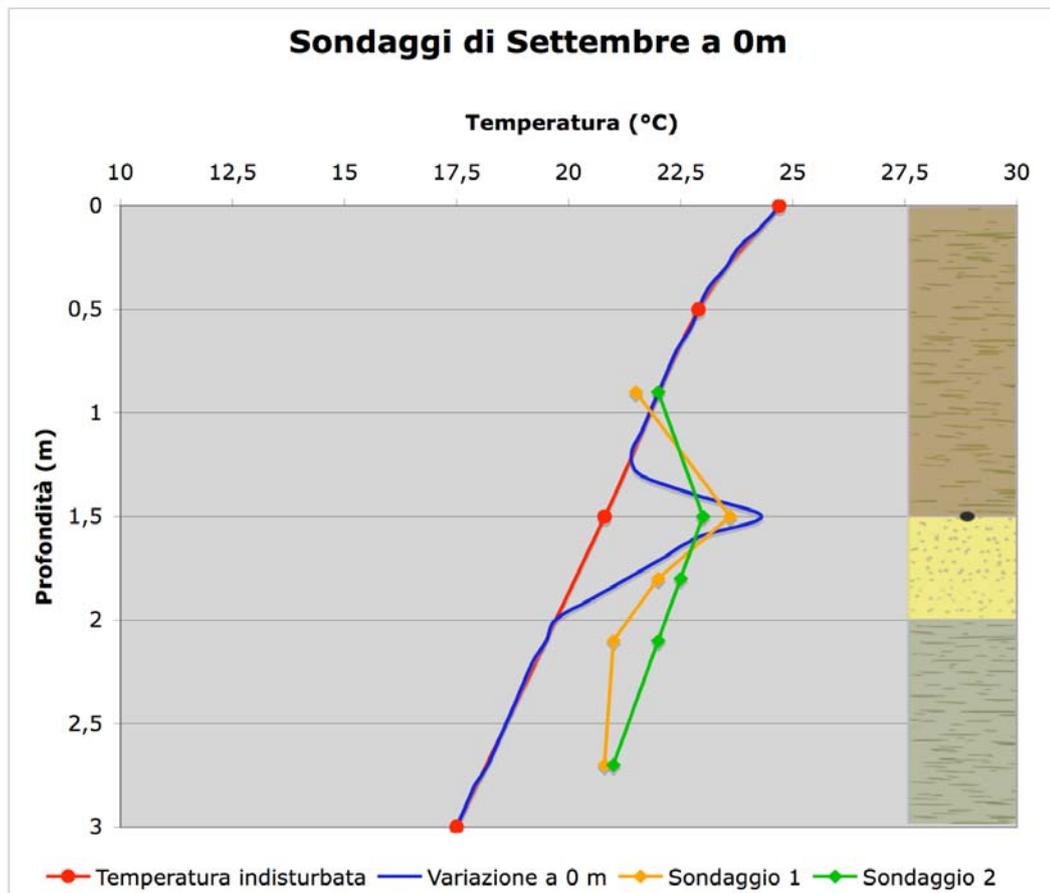


**Figura 61: Verga di rame con in fondo un termometro collegato con un cavo alla centralina di lettura**

Z(m)	Sondaggio 1 (°C)	Sondaggio 2 (°C)
0,9	21,5	22
1,5	23,6	23
1,8	22	22,5
2,1	21	22
2,7	20,8	21

**Tabella 28: Temperature sperimentali dei due sondaggi**

Le temperature sono state prese a varie profondità compresa a 1,5 m, alla quale il dissipatore era posato. Queste sono state confrontate con i risultati di un ipotetico funzionamento a regime nel mese di Settembre a 0 m sul dissipatore. I dati del terreno indisturbato sono sempre sperimentali e derivano dalla tabella 4.



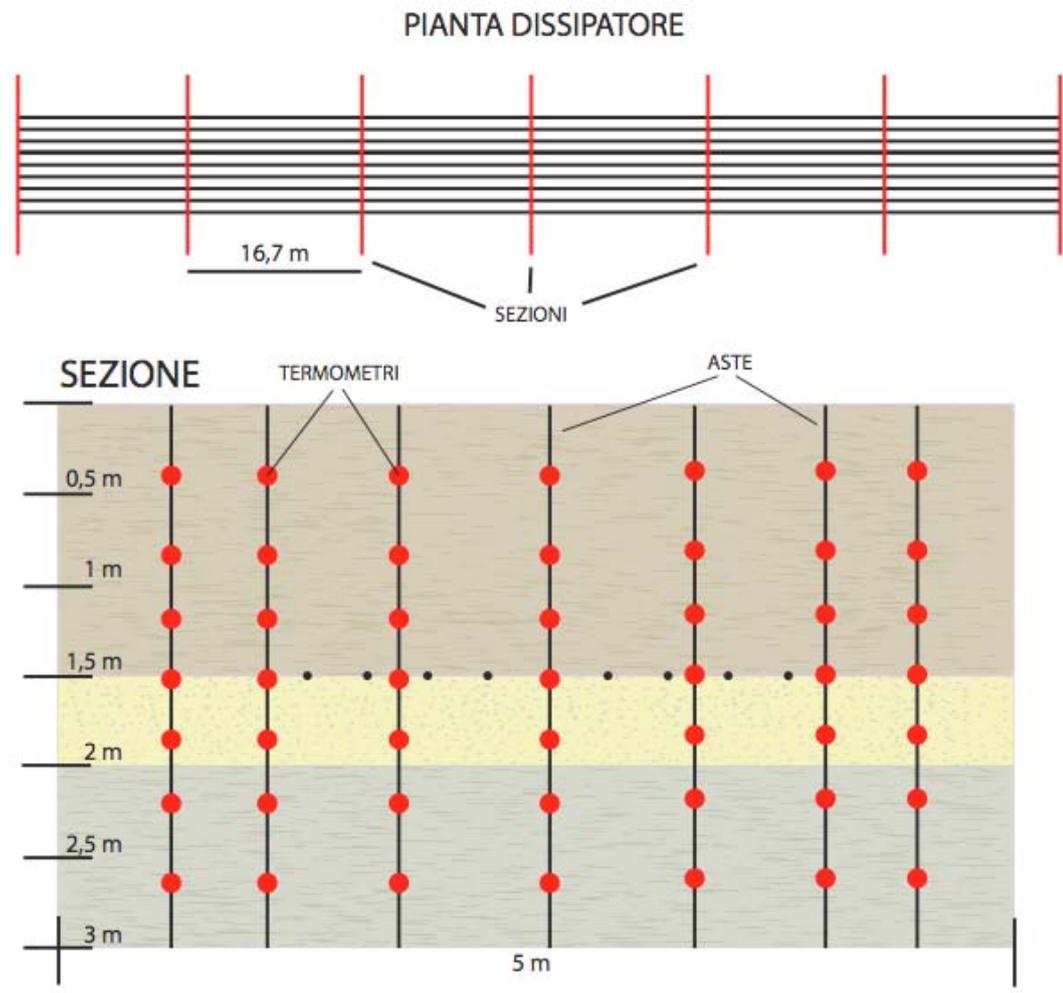
**Figura 62: Profilo di temperatura individuato nei due sondaggi e paragonato al funzionamento a regime in raffrescamento a Settembre.**

I risultati sperimentali tendono a confermare l'andamento della temperatura calcolato dal modello ma sono da fare alcune precisazioni:

1. Le temperature del terreno sperimentale non sono state prese nello stesso punto dove sono stati fatti i due sondaggi, quindi il profilo potrebbe essere diverso leggermente se cambia leggermente la stratigrafia.
2. Il supporto temporale delle misure è differente: il profilo di temperatura indisturbato è il risultato di 24 ore di misurazione, quindi valori molto più stabili. Al contrario le temperature nei due sondaggi hanno un supporto temporale di circa 30 minuti e quindi i dati restano molto variabili.
3. Le temperature del terreno indisturbato e quelle dei due sondaggi sono di settembre ma di anni differenti nei quali la temperatura superficiale era diversa.
4. Il modello restituisce il profilo di temperatura disturbata a 0m in regime stazionario, cioè funzionamento in continuo dell'impianto, mentre durante il campionamento nei due sondaggi l'impianto era in una fase di "attacca e stacca". dovuto all'utenza.

Benché inquinati dal regime in transitorio, i dati non sembrano discostarsi molto dai risultati del modello di scambio. Essi però non sono sufficienti a convalidare in modello, in futuro si è suggerito all'azienda di effettuare un monitoraggio durante un periodo temporale esteso, ad esempio un anno di funzionamento dell'impianto. Le misure necessarie sono:

- **Temperature sui tubi di polietilene:** Posizionare una serie di termometri all'interno dei tubi di polietilene a varie distanze lungo lo sviluppo longitudinale del dissipatore in modo tale da ricostruire l'andamento della temperatura del fluido termovettore lungo il dissipatore. (profilo che in questo modello è stato ipotizzato).
- **Temperature del terreno a varie profondità:** In fase di messa in opera del dissipatore, inglobare aste di materiale plastico (non conduttore) in posizione verticale e trasversali al dissipatore con termometri collocati a varie profondità nel terreno. Sarebbe utile posizionarne anche nelle zone limitrofe al dissipatore in modo da indagare l'effetto di esso sul terreno circostante.
- **Registrazione della temperatura indisturbata del terreno:** posizionare un'asta verticale con termometri a varie profondità in una zona di terreno non influenzata dal dissipatore.
- **Registrazioni dei dati d'impianto:** Funzionale alla convalida del modello è un report con le temperature d'ingresso ed uscita dal dissipatore e la potenza scambiata nello stesso.



**Figura 63: Layout delle sezioni in cui rilevare le temperature e una sezione in cui vengono evidenziate le aste con i termometri.**

La registrazione dei dati potrebbe essere fatta in automatico con il collegamento a centraline durante un lungo periodo in modo da studiare il comportamento in varie stagioni di questa tipologia di impianti pressoché sconosciuti. Una gran mole di dati raccolti potrebbe essere studiata geostatisticamente o utilizzata per una elaborazione di un modello alla differenze finite per uno studio di dettaglio del campo termico nell'intorno del dissipatore.

## CAPITOLO 7

### SENSIVITA' DEL MODELLO TERMICO IN SABBIA ED ARGILLA

#### 7.1 IL TERRENO E LE CARATTERISTICHE TERMICHE

Il dimensionamento dei dissipatori orizzontali, presentati nei capitoli precedenti, si basa essenzialmente sulla conducibilità termica e capacità d'estrazione dei vari terreni o rocce su cui si va a lavorare. I dati presi in considerazione sono solitamente tabellati e presenti in bibliografia e a disposizione dei tecnici del settore:

Tipologia di Roccia o terreno	Conducibilità termica (W/mK)			Capacità termica (MJ/m <sup>3</sup> K)
	minimo	medio	massimo	
<b>Rocce Magmatiche</b>				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3-2,6
Diorite	2	2,6	2,9	2,9
Gabbro	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1-3
Peridotite	3,8	4	5,3	2,7
Riolite	3,1	3,3	3,4	2,1
<b>Rocce Metamorfiche</b>				
Gneiss	1,9	2,9	4	1,8-2,4
Marmo	1,3	2,1	3,1	2
Metaquarzite	–	5,8	–	2,1
Micaschisti	1,5	2	3,1	2,2
Argilloschisti	1,5	2,1	2,2	2,2-2,5
<b>Rocce Sedimentarie</b>				
Calcare	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marne	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Quarzite	3,6	6	6,6	2,1-2,2
Sale	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenaria	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
<b>Terreni non consolidati</b>				
Ghiaia secca	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Ghiaia satura d'acqua	–	1,8	–	2,4
Sabbia secca	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Sabbia satura d'acqua	1,7	2,4	5	2,2-2,9
Argilla/limo secchi	0,4	0,5	1	1,5-1,6

Argilla/limo saturi d'acqua	0,9	1,7	2,3	1,6-3,4
Torba	0,2	0,4	0,7	0,5-3,8
<b>Altri materiali</b>				
Bentonite	0,5	0,6	0,8	3,9
Calcestruzzo	0,9	1,6	2	1,8
Ghiaccio (-10°C)	–	2,32	–	1,87
Plastica (PE)	–	0,39	–	–
Aria secca (0-20°C)	–	0,02	–	0,0012
Acciaio	–	60	–	3,12
Acqua(+10°C)	–	0,58	–	4,19

TERRENO	ESTRAZIONE SPECIFICA	
	funz. 1800 ore	funz. 2400 ore
Valori generali		
Sedimenti secchi < 1,5 W/mK	25 W/m	20 W/m
Sedimenti saturi 1,5-3 W/mK	60 W/m	50 W/m
Rcce consolidate conduttive > 3 W/mK	84 W/m	70 W/m
Singole rocce		
Sassi, sabbia secchi	< 25 W/m	< 20 W/m
Sassi, sabbia saturi d'acqua	65-80 W/m	55-65 W/m
Falda in movimento in sabbia e sassi	80-100 W/m	80-100 W/m
Argilla, terriccio umido	35-50 W/m	30-40 W/m
Calcere massiccio	55-70 W/m	45-60 W/m
Arenaria	65-80 W/m	55-65 W/m
Granito	65-85 W/m	55-70 W/m
Basalto	40-65 W/m	35-55 W/m
Gneiss	70-85 W/m	60-70 W/m

**Tabella 29: Sopra conducibilità e capacità termiche (SUPSI)**

**Tabella 30: Sotto: Capacità estrattive (VDI 4640)**

Come si può notare dalle tabelle, per la stessa tipologia di materiale esistono diversi valori, in quanto in natura nessun terreno è uguale ad un altro. Ciò spinge i tecnici ad assumere valori medi a cui applicare discreti margini di sicurezza, sovradimensionando leggermente gli scambiatori ma assicurandosi allo stesso tempo un adeguato funzionamento degli stessi. A fronte di un maggior costo per materiali e manodopera si è sicuri che lo scambiatore sarà in

grado di smaltire o assorbire tutta la potenza richiesta, perlomeno per la maggior parte della stagione.

In questo capitolo si vuole studiare la variazione che l'impianto descritto nel capitolo 6 (presente e funzionante presso l'azienda Aktis Italia S.r.l. Loreggia Padova) provoca in due terreni con caratteristiche termiche opposte: Una argilla poco conduttiva ed una sabbia al contrario con generose capacità termiche.

	Conducibilità termica W/mK	Capacità termica MJ/m³K	Diffusività termica m²/s
Sabbia	4	2,9	1,37E-06
Argilla	1	1,5	6,66E-07

**Tabella 31: Dati dei terreni utilizzati per la sensitività del modello**

Ricordiamo in questa sede che la diffusività termica è:

$$a = \frac{\lambda}{\rho C} \text{ m}^2/\text{s}, \text{ dove } \rho C \text{ è la capacità termica del terreno.}$$

In questo caso non abbiamo le temperature indisturbate del terreno in quanto questi due terreni (a singolo strato) non esistono e quindi si è ricorsi al modello dell'onda di calore fornito dalla SUPSI. Questo modello, già presentato nel capitolo 3, descrive l'andamento della temperatura negli strati superficiali del terreno in funzione dell'onda termica presente in superficie. Esso dimostra che la temperatura si stabilizza intorno ad un valore pari alla media annuale esterna già ad una profondità di 10 m circa. Il profilo di temperatura differisce da terreno a terreno in base alla diffusività termica. Il modello viene qui presentato:

$$T(z,t) = T_0 + dT_0 \cdot \exp(-z / \delta) \cdot \cos(\omega(t - t_0) - z / \delta)$$

Dove:

- $T(z,t)$  temperatura del terreno (°C) alla profondità  $z$  (m) ed al tempo  $t$  (s)
- $T_0$  temperatura media annuale esterna (°C)
- $dT_0$  variazione d'ampiezza dell'onda di calore in superficie (K)
- $\delta = \sqrt{2a / \omega} = \sqrt{aT / \pi}$  profondità di penetrazione dell'onda di calore (m)
- $a$  = diffusività termica del mezzo (m²/s)
- $t_0$  tempo per il quale la temperatura resta massima in superficie.

Questo è stato applicato per i due terreni descritti in tabella 1 utilizzando come media esterna annuale quella registrata a Loreggia (PD) dalla tabella 3 nel capitolo 6.

**Sabbia:**

I dati con cui si è lavorato sono i seguenti:

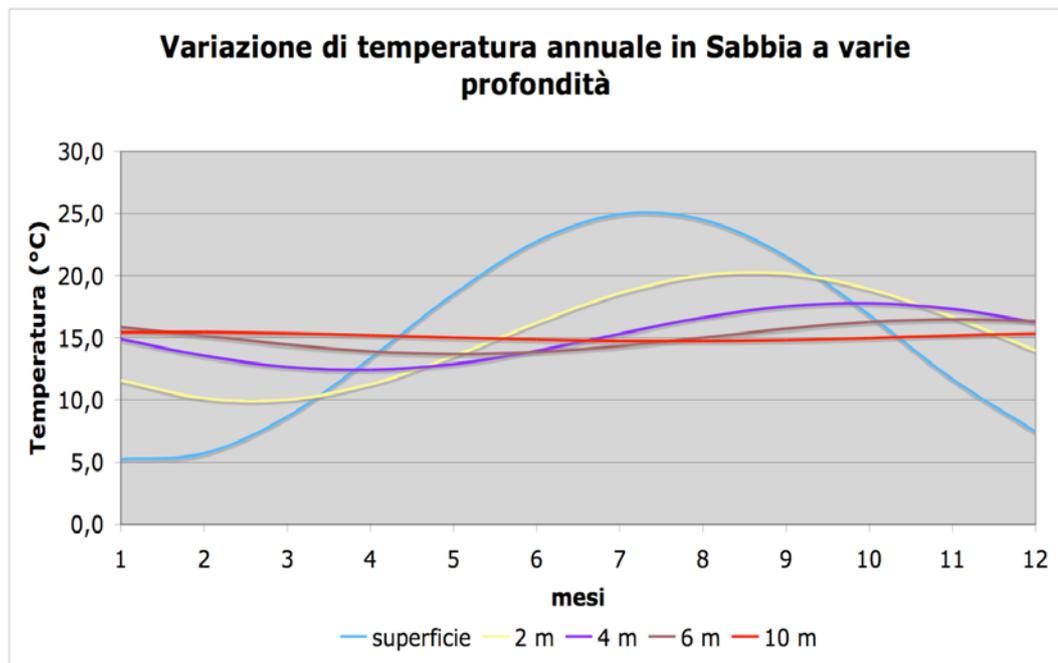
Conducibilità termica	4	W/mK
$\rho C$	2,9	MJ/m <sup>3</sup> K
$\alpha$	1,38E-06	m <sup>2</sup> /s
T0 temperatura media annua	15,1	°C
$\omega=2\pi/T$	2,01903E-07	1/s
$\delta= \text{rad}q(aT/\pi)$	3,683863937	m
dT0	13	°C
t0= 10 giorni	864000	s

È stata calcolata la temperatura sino ad una profondità di 20 m per ciascun mese dell'anno e qui vengono proposti i risultati:

**Tabella 32**

z (m)	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug
0	27,3	23,5	17,4	10,7	5,2	2,3	2,9	6,7	12,8	19,5	25,0	27,9
0,5	26,2	23,5	18,6	12,7	7,9	4,7	4,2	6,7	11,4	17,1	22,3	25,5
1	25,0	23,3	19,4	14,3	10,3	6,9	5,7	7,1	10,6	15,3	19,9	23,3
1,5	23,7	22,8	19,9	15,6	12,2	8,9	7,2	7,7	10,2	14,0	18,0	21,3
2	22,5	22,2	20,1	16,6	13,7	10,6	8,7	8,5	10,1	13,0	16,5	19,6
2,5	21,3	21,6	20,1	17,2	14,8	12,0	10,0	9,4	10,3	12,5	15,4	18,2
3	20,2	20,8	19,9	17,7	15,6	13,2	11,2	10,3	10,6	12,2	14,6	17,0
3,5	19,2	20,1	19,6	17,9	16,2	14,1	12,2	11,1	11,1	12,1	14,0	16,1
4	18,4	19,4	19,3	18,1	16,6	14,8	13,1	11,9	11,6	12,2	13,6	15,4
4,5	17,6	18,7	18,9	18,0	16,8	15,3	13,8	12,7	12,1	12,4	13,4	14,9
5	16,9	18,1	18,4	17,9	16,9	15,7	14,4	13,3	12,6	12,7	13,3	14,5
5,5	16,3	17,5	18,0	17,8	16,8	15,9	14,9	13,8	13,1	13,0	13,4	14,2
6	15,8	17,0	17,6	17,5	16,7	16,1	15,2	14,3	13,6	13,3	13,5	14,1
6,5	15,4	16,5	17,2	17,3	16,6	16,1	15,4	14,6	14,0	13,6	13,6	14,1
7	15,1	16,1	16,8	17,0	16,4	16,1	15,6	14,9	14,3	13,9	13,8	14,1
7,5	14,9	15,8	16,5	16,8	16,2	16,1	15,7	15,1	14,6	14,1	14,0	14,1
8	14,7	15,5	16,2	16,5	16,0	16,0	15,7	15,3	14,8	14,4	14,2	14,2
8,5	14,6	15,3	15,9	16,3	15,9	15,9	15,7	15,4	15,0	14,6	14,3	14,3
9	14,5	15,1	15,7	16,1	15,7	15,8	15,7	15,4	15,1	14,8	14,5	14,4
9,5	14,5	15,0	15,5	15,9	15,6	15,7	15,6	15,5	15,2	14,9	14,6	14,5

10	14,5	14,9	15,3	15,7	15,4	15,6	15,6	15,5	15,3	15,0	14,8	14,6
10,5	14,5	14,8	15,2	15,5	15,3	15,5	15,5	15,5	15,3	15,1	14,9	14,7
11	14,5	14,8	15,1	15,4	15,2	15,4	15,5	15,4	15,3	15,1	15,0	14,8
11,5	14,6	14,7	15,0	15,3	15,2	15,3	15,4	15,4	15,3	15,2	15,0	14,9
12	14,6	14,7	15,0	15,2	15,1	15,2	15,3	15,4	15,3	15,2	15,1	15,0
12,5	14,7	14,7	14,9	15,1	15,1	15,2	15,3	15,3	15,3	15,2	15,1	15,0
13	14,7	14,8	14,9	15,1	15,1	15,2	15,2	15,3	15,3	15,2	15,1	15,1
13,5	14,8	14,8	14,9	15,0	15,0	15,1	15,2	15,2	15,3	15,2	15,2	15,1
14	14,8	14,8	14,9	15,0	15,0	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,1
14,5	14,9	14,8	14,9	15,0	15,0	15,1	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	15,1
15	14,9	14,9	14,9	15,0	15,0	15,1	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	15,1
15,5	15,0	14,9	14,9	15,0	15,0	15,1	15,1	15,1	15,2	15,2	15,2	15,1
16	15,0	14,9	14,9	15,0	15,0	15,1	15,1	15,1	15,2	15,2	15,2	15,1
16,5	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,2	15,2	15,1
17	15,0	15,0	15,0	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
17,5	15,1	15,0	15,0	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
18	15,1	15,0	15,0	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
18,5	15,1	15,1	15,0	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
19	15,1	15,1	15,0	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
19,5	15,1	15,1	15,1	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
20	15,1	15,1	15,1	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1



**Figura 64 Fluttazione della temperatura durante l'anno alle varie profondità date dal modello SUPSI**

Come si può notare la variabilità diminuisce con l'aumentare della profondità e ciò è anche supportato dai dati sperimentali analizzati nel capitolo 6.

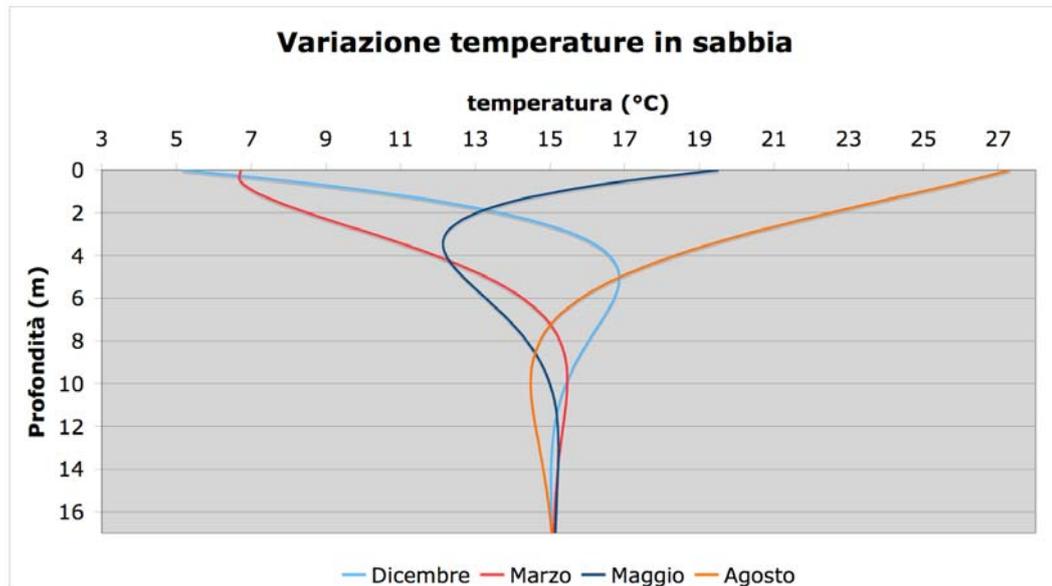


Figura 65: Andamento verticale delle profondità per quattro mesi dell'anno in sabbia.

È confermato definitivamente che la temperatura può essere considerata costante a 11-12 m di profondità con una variazione minima intorno ad un valore pari alla media annuale esterna.

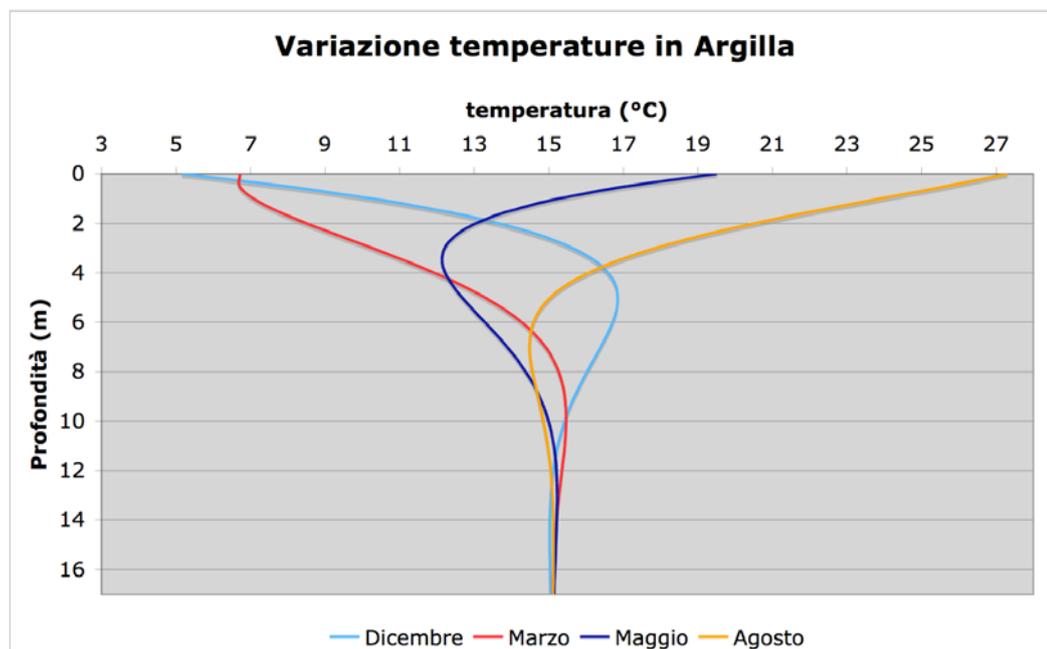
### Argilla:

Conducibilità termica	1	W/mK
$\rho C$	1,5	MJ/m <sup>3</sup> K
$a$	6,66E-07	m <sup>2</sup> /s
$T_0$ temperatura media annua	15,1	°C
$\omega = 2\pi/T$	2,01903E-07	1/s
$\delta = \text{rad}q(aT/\pi)$	2,56850498	m
$dT_0$	13	°C
$t_0 = 10$ giorni	864000	s

**Tabella 33**

z(m)	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug
0	27,3	23,5	17,4	10,7	5,2	2,3	2,9	6,7	12,8	19,5	25,0	27,9
0,5	25,7	23,4	19,0	13,5	7,9	4,7	4,2	6,7	11,4	17,1	22,3	25,5
1	23,9	22,9	19,8	15,5	10,3	6,9	5,7	7,1	10,6	15,3	19,9	23,3
1,5	22,2	22,1	20,1	16,8	12,2	8,9	7,2	7,7	10,2	14,0	18,0	21,3
2	20,5	21,0	20,0	17,6	13,7	10,6	8,7	8,5	10,1	13,0	16,5	19,6
2,5	19,1	20,0	19,6	18,0	14,8	12,0	10,0	9,4	10,3	12,5	15,4	18,2
3	17,9	19,0	19,0	18,1	15,6	13,2	11,2	10,3	10,6	12,2	14,6	17,0
3,5	16,9	18,0	18,4	17,9	16,2	14,1	12,2	11,1	11,1	12,1	14,0	16,1
4	16,1	17,2	17,8	17,7	16,6	14,8	13,1	11,9	11,6	12,2	13,6	15,4
4,5	15,5	16,5	17,2	17,3	16,8	15,3	13,8	12,7	12,1	12,4	13,4	14,9
5	15,0	16,0	16,7	17,0	16,9	15,7	14,4	13,3	12,6	12,7	13,3	14,5
5,5	14,8	15,6	16,2	16,6	16,8	15,9	14,9	13,8	13,1	13,0	13,4	14,2
6	14,6	15,2	15,8	16,2	16,7	16,1	15,2	14,3	13,6	13,3	13,5	14,1
6,5	14,5	15,0	15,5	15,9	16,6	16,1	15,4	14,6	14,0	13,6	13,6	14,1
7	14,5	14,9	15,3	15,7	16,4	16,1	15,6	14,9	14,3	13,9	13,8	14,1
7,5	14,5	14,8	15,1	15,5	16,2	16,1	15,7	15,1	14,6	14,1	14,0	14,1
8	14,6	14,7	15,0	15,3	16,0	16,0	15,7	15,3	14,8	14,4	14,2	14,2
8,5	14,6	14,7	14,9	15,2	15,9	15,9	15,7	15,4	15,0	14,6	14,3	14,3
9	14,7	14,8	14,9	15,1	15,7	15,8	15,7	15,4	15,1	14,8	14,5	14,4
9,5	14,8	14,8	14,9	15,0	15,6	15,7	15,6	15,5	15,2	14,9	14,6	14,5
10	14,9	14,8	14,9	15,0	15,4	15,6	15,6	15,5	15,3	15,0	14,8	14,6
10,5	14,9	14,9	14,9	15,0	15,3	15,5	15,5	15,5	15,3	15,1	14,9	14,7
11	15,0	14,9	14,9	15,0	15,2	15,4	15,5	15,4	15,3	15,1	15,0	14,8
11,5	15,0	15,0	15,0	15,0	15,2	15,3	15,4	15,4	15,3	15,2	15,0	14,9
12	15,1	15,0	15,0	15,0	15,1	15,2	15,3	15,4	15,3	15,2	15,1	15,0
12,5	15,1	15,0	15,0	15,0	15,1	15,2	15,3	15,3	15,3	15,2	15,1	15,0
13	15,1	15,1	15,0	15,0	15,1	15,2	15,2	15,3	15,3	15,2	15,1	15,1
13,5	15,1	15,1	15,0	15,0	15,0	15,1	15,2	15,2	15,3	15,2	15,2	15,1
14	15,1	15,1	15,1	15,0	15,0	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,1
14,5	15,1	15,1	15,1	15,1	15,0	15,1	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	15,1
15	15,1	15,1	15,1	15,1	15,0	15,1	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	15,1
15,5	15,1	15,1	15,1	15,1	15,0	15,1	15,1	15,1	15,2	15,2	15,2	15,1
16	15,1	15,1	15,1	15,1	15,0	15,1	15,1	15,1	15,2	15,2	15,2	15,1
16,5	15,1	15,1	15,1	15,1	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,2	15,2	15,1
17	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
17,5	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
18	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
18,5	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
19	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1

19,5	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
20	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1



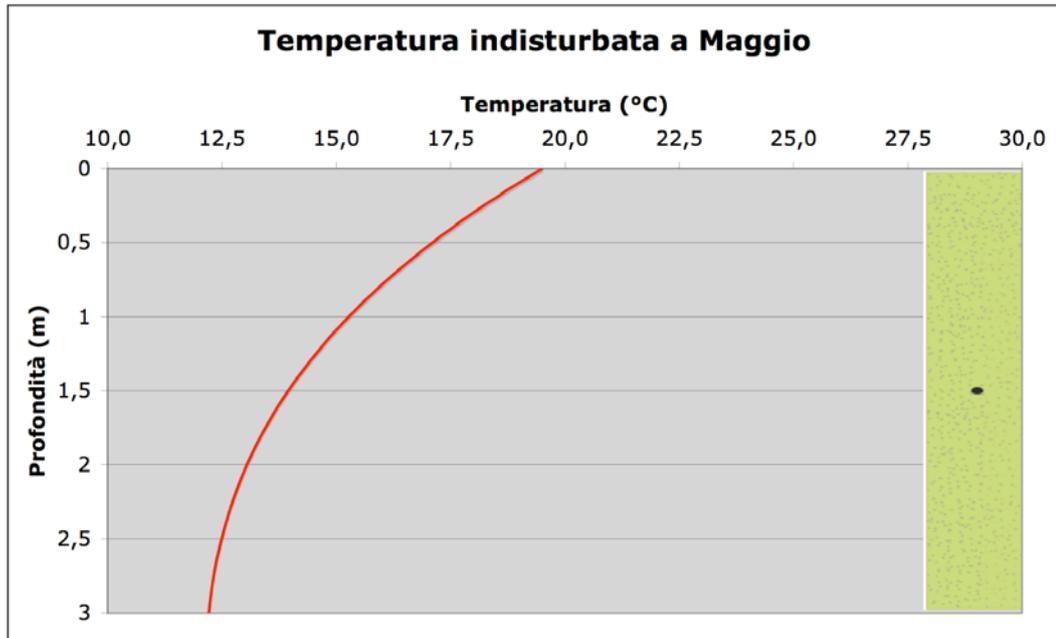
**Figura 66: Andamento verticale delle profondità per quattro mesi dell'anno in argilla.**

Partendo da questi dati, il modello è stato applicato come nel capitolo precedente sulla stratigrafia presente presso Loreggia (PD). Le variazioni sono state calcolate lungo il dissipatore a 0, 33, 66 e 100 m . I profili di temperatura del fluido termovettore all'interno dei tubi di polietilene sono stati ipotizzati partendo dalle temperature d'ingresso ed uscita dal dissipatore. La loro variazione in funzione del tipo di terreno e del regime di funzionamento influiscono sulla potenza che si può assorbire o dissipare nel terreno.

## 7.2 SENSITIVITA' IN SABBIA

### 7.2.1 RAFFRESCAMENTO A MAGGIO

Il profilo di temperatura del terreno indisturbato in questo periodo è stato trovato con il modello SUPSI ed è illustrato in tabella 2. Qui viene inserito il grafico del suo profilo sino a una profondità di 3 m.



**Figura 67: Profilo di temperatura indisturbato a Maggio in sabbia**

Dati di progetto:

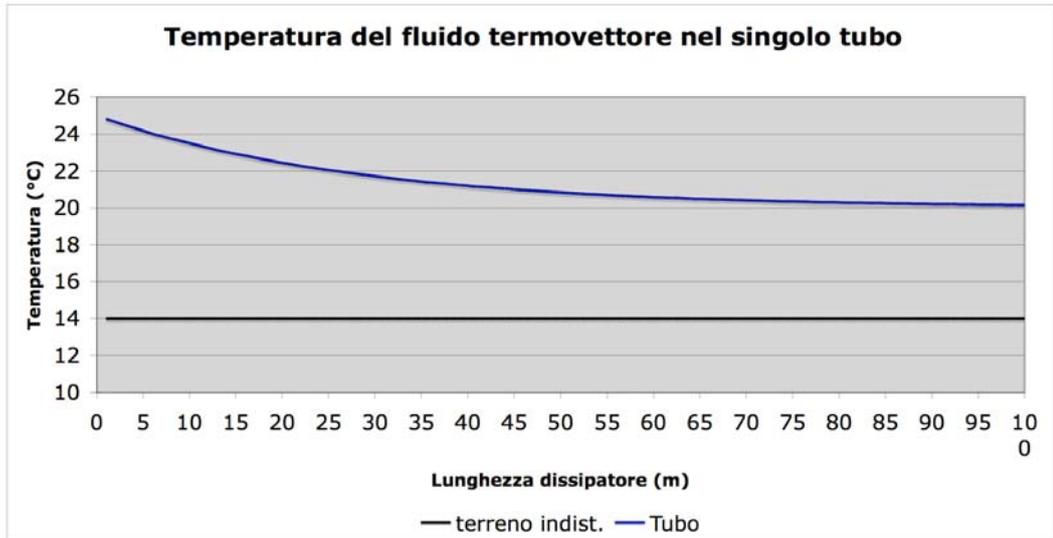
Potenza da dissipare totale	14500	W
Potenza per singolo circuito	1611	W
Potenza per 5 m di tubo	80,6	W
Portata totale	2492	l/h
Portata singolo tubo	277	l/h
T ingresso	25	°C
T uscita	20	°C
Diametro esterno tubo	25	mm
Diametro interno tubo	21	mm
Conduktività termica del polietilene	0,41	W/mK

**Tabella 34: dati di progetto**

Viene ora riportato il profilo di temperatura all'interno del dissipatore, il terreno essendo ancora freddo non ha nessun problema a smaltire un salto termico di 5 °C.

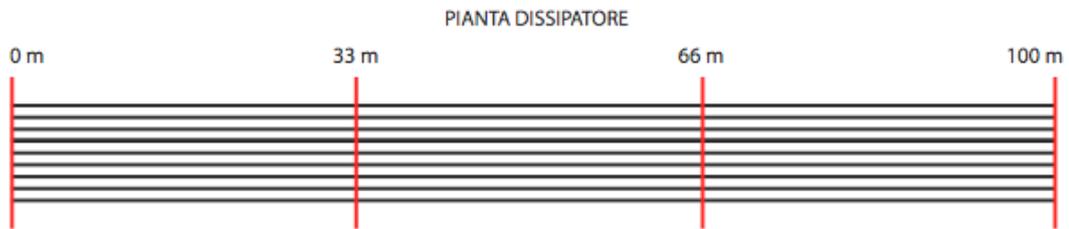
Posizione sul tubo (m)	Temperatura (°C)
0	24,5
33	21,5
66	20,4
100	20,2

**Tabella 35: Temperature all'interno del tubo**

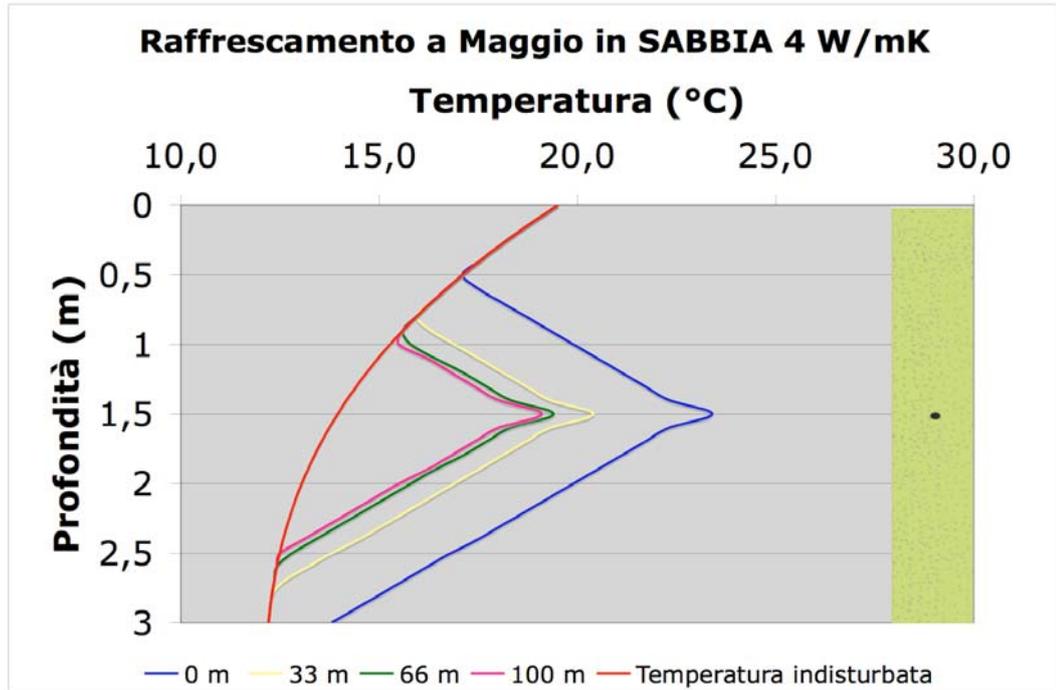


**Figura 68: profilo di temperatura del fluido nel tubo a Maggio e temperatura del terreno indisturbato a 1,5 m di profondità**

Per semplicità e chiarezza di lettura verranno ora proposti i risultati in un unico grafico sommando le variazioni di temperatura a 0 m, 33 m, 66 m e 100 m rispetto il profilo di temperatura indisturbato.



**Figura 69: Pianta del dissipatore in cui sono evidenziate tutte le sezioni di studio.**



**Figura 70: Tutti i profili di temperatura perturbata a 0, 33, 66 e 100 m in raffrescamento a Maggio rispetto il profilo indisturbato che rimane costante per tutto la lunghezza del dissipatore.**

Si riporta qui di seguito la tabella con le temperature e le variazioni segnate in arancio.

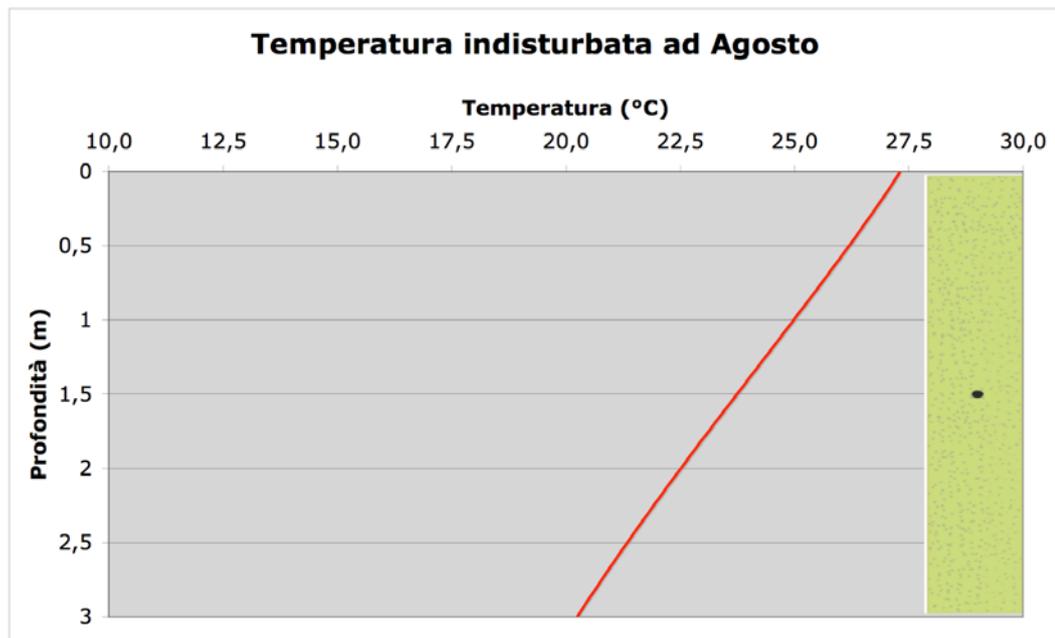
**Tabella 36**

z (m)	T indist. (°C)	T 0m (°C)	T 33m (°C)	T 66m (°C)	T 100m (°C)
0	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
0,1	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
0,2	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
0,3	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
0,4	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
0,5	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1
0,6	16,7	17,5	16,7	16,7	16,7
0,7	16,3	18,1	16,3	16,3	16,3
0,8	15,9	18,7	15,9	15,9	15,9
0,9	15,6	19,3	16,3	15,6	15,6
1	15,3	19,9	16,9	15,8	15,5
1,1	15,0	20,5	17,5	16,4	16,2
1,2	14,7	21,1	18,1	17,1	16,8
1,3	14,4	21,7	18,7	17,7	17,4
1,4	14,2	22,3	19,3	18,3	18
1,5	14,0	23,4	20,4	19,4	19,1
1,6	13,7	22,3	19,3	18,3	18

1,7	13,5	21,7	18,7	17,7	17,4
1,8	13,4	21,1	18,1	17,1	16,8
1,9	13,2	20,5	17,5	16,4	16,2
2	13,0	19,9	16,9	15,8	15,5
2,1	12,9	19,3	16,3	15,2	14,9
2,2	12,8	18,7	15,7	14,6	14,3
2,3	12,7	18,1	15,1	14	13,7
2,4	12,6	17,5	14,5	13,4	13,1
2,5	12,5	16,8	13,8	12,8	12,5
2,6	12,4	16,2	13,2	12,4	12,4
2,7	12,3	15,6	12,6	12,3	12,3
2,8	12,3	15	12,3	12,3	12,3
2,9	12,2	14,4	12,2	12,2	12,2
3	12,2	13,8	12,2	12,2	12,2

### 7.2.2 RAFFRESCAMENTO AD AGOSTO

Il profilo di temperatura del terreno indisturbato in questo periodo è stato trovato con il modello SUPSI ed è illustrato in tabella 2. Qui viene inserito il grafico del suo profilo sino a una profondità di 3 m.



**Figura 71: Profilo di temperatura indisturbato ad Agosto in sabbia**

Dati di progetto:

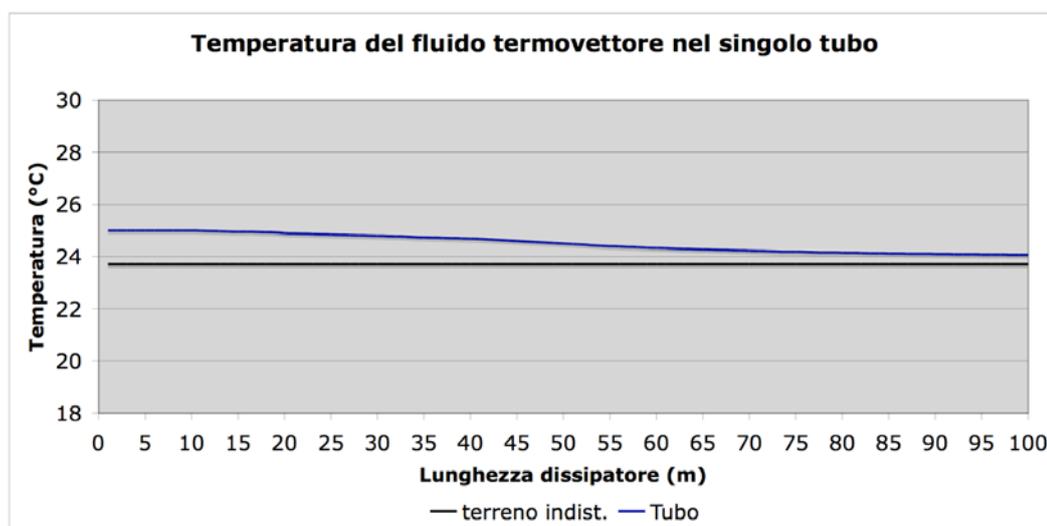
Potenza da dissipare totale	2900	W
Potenza per singolo circuito	322	W
Potenza per 5 m di tubo	16,11	W
Portata totale	2492	l/h
Portata singolo tubo	277	l/h
T ingresso	25	°C
T uscita	24	°C
Diametro esterno tubo	25	mm
Diametro interno tubo	21	mm
Conducibilità termica del polietilene	0,41	W/mK

**Tabella 37: dati di progetto**

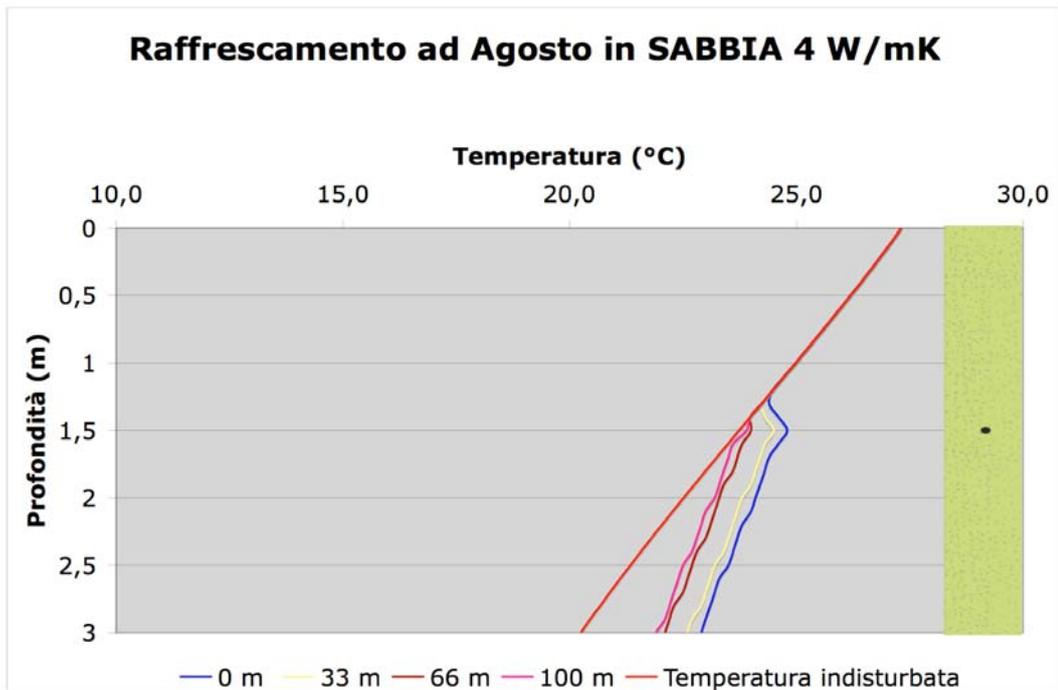
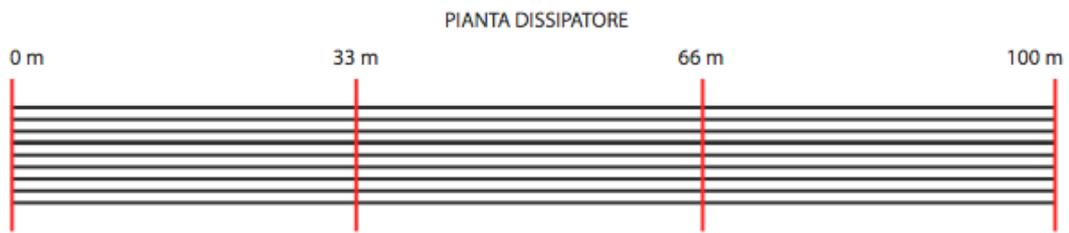
Viene ora riportato il profilo di temperatura all'interno del dissipatore, il terreno essendo sabbia ad elevata conducibilità termica risulta notevolmente riscaldato dal clima estivo e quindi pressoché incapace di scambiare molta potenza. Difatti il salto termico ed di solo 1 °C per una potenza ceduta di soli 2,9 kW.

**Tabella 38: Temperature all'interno del tubo**

Posizione sul tubo (m)	Temperatura (°C)
0	25
33	24,8
66	24,2
100	24,1



**Figura 72: profilo di temperatura del fluido nel tubo ad Agosto e temperatura del terreno indisturbato a 1,5 m di profondità.**



**Figura 73 Tutti i profili di temperatura perturbata a 0, 33, 66 e 100 m in raffrescamento ad Agosto rispetto il profilo indisturbato che rimane costante per tutto la lunghezza del dissipatore.**

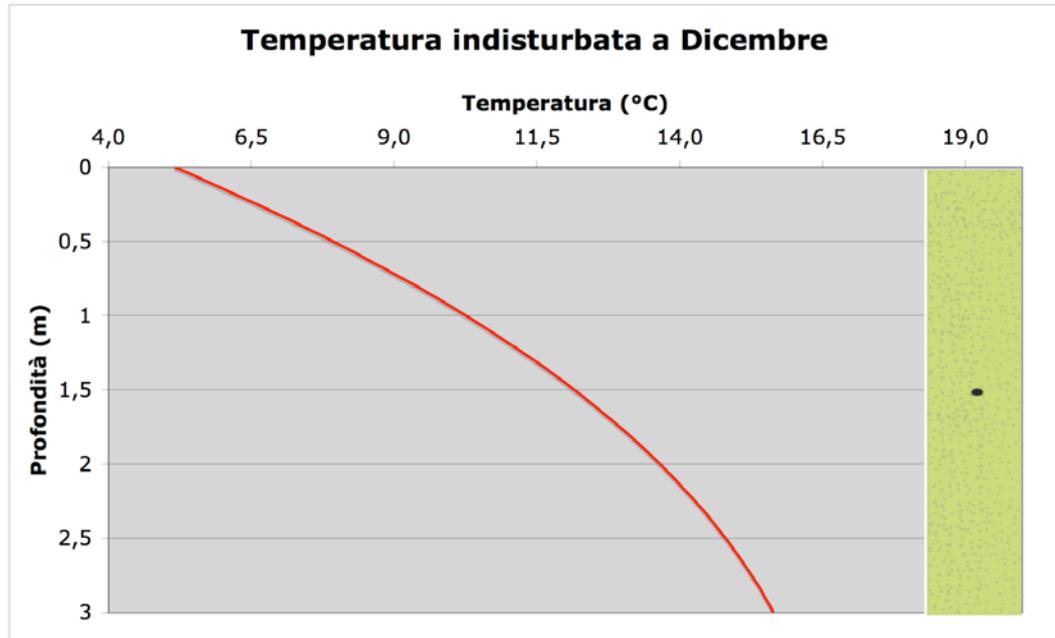
Come si nota dal grafico il terreno risulta molto riscaldato verso la superficie e ciò non permette scambio in quella direzione, difatti esso è rivolto verso il basso.

z (m)	T indist. (°C)	T 0m (°C)	T 33m (°C)	T 66m (°C)	T 100m (°C)
0	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
0,1	27,1	27,1	27,1	27,1	27,1
0,2	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9
0,3	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7
0,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4
0,5	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2
0,6	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0
0,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7
0,8	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5

0,9	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2
1	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
1,1	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7
1,2	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5
1,3	24,2	24,4	24,2	24,2	24,2
1,4	24,0	24,6	24,3	24,0	24,0
1,5	23,7	24,8	24,5	24,0	23,9
1,6	23,5	24,6	24,3	23,8	23,6
1,7	23,2	24,4	24,2	23,7	23,5
1,8	23,0	24,3	24,1	23,6	23,4
1,9	22,8	24,2	24	23,4	23,3
2	22,5	24,1	23,8	23,3	23,2
2,1	22,3	24	23,7	23,2	23
2,2	22,0	23,8	23,6	23,1	22,9
2,3	21,8	23,7	23,5	23	22,8
2,4	21,6	23,6	23,4	22,8	22,7
2,5	21,3	23,5	23,2	22,7	22,5
2,6	21,1	23,3	23,1	22,6	22,4
2,7	20,9	23,2	23	22,5	22,3
2,8	20,7	23,1	22,9	22,3	22,2
2,9	20,5	23	22,7	22,2	22,1
3	20,2	22,9	22,6	22,1	21,9

### 7.2.3 RISCALDAMENTO A DICEMBRE

Ricordiamo che questo impianto risulta essere sovradimensionato per la stagione invernale in quanto poco sfruttato visto che è presente una caldaia per la compensazione estiva. Il profilo di temperatura del terreno indisturbato in questo periodo è stato trovato con il modello SUPSI ed è illustrato in tabella 2. Qui viene inserito il grafico del suo profilo sino a una profondità di 3 m.



**Figura 74 Profilo di temperatura indisturbato a Dicembre in sabbia**

Dati di progetto:

Potenza da dissipare totale	6900	W
Potenza per singolo circuito	767	W
Potenza per 5 m di tubo	38,3	W
Portata totale	1188	l/h
Portata singolo tubo	132	l/h
T ingresso	5	°C
T uscita	10	°C
Diametro esterno tubo	25	mm
Diametro interno tubo	21	mm
Conduktività termica del polietilene	0,41	W/mK

Il terreno caldo in profondità non ha nessun problema a cedere la potenza richiesta dalla pompa di calore, la temperatura d'uscita dal dissipatore si mantiene al di sotto della temperatura indisturbata del terreno.

**Tabella 39: Temperature all'interno del tubo**

Posizione sul tubo (m)	Temperatura (°C)
0	6,4
33	8,9
66	9,6
100	10

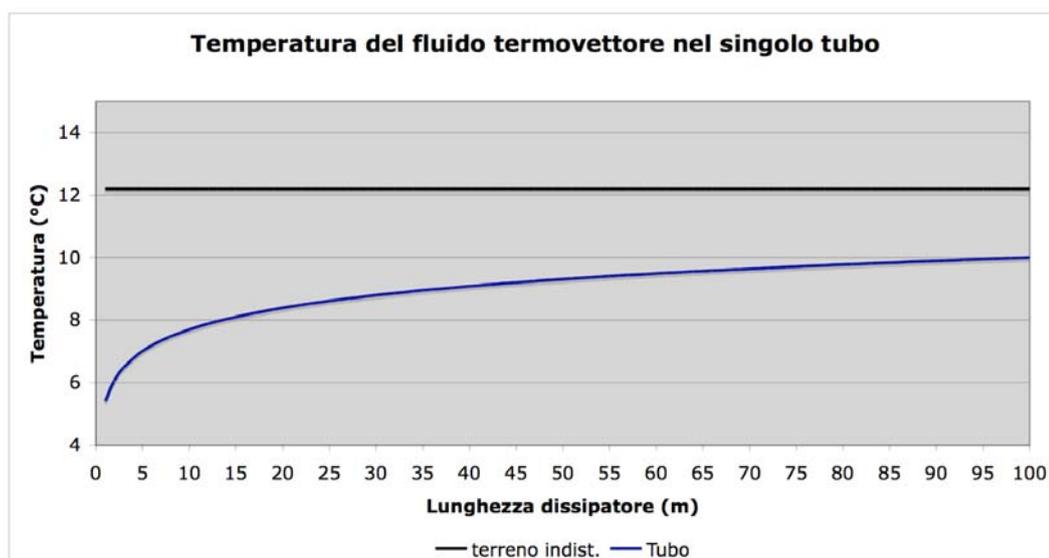


Figura 75: Profilo di temperatura del fluido nel tubo a Dicembre e temperatura del terreno indisturbato a 1,5 m di profondità.



Qui viene sempre proposta l'analisi delle temperature in un unico grafico che sovrappone la situazione nelle quattro posizioni standard sul dissipatore. Come si può vedere nel grafico la perturbazione (il raffreddamento del terreno avviene verso il basso dove la temperatura naturale è già più elevata. I valori restano notevolmente al di sopra dello zero termico e ciò non comporta congelamento e quindi problemi di ordine ambientale. La fine della propagazione sarà al contatto con uno strato sottostante meno conduttivo oppure sempre in sabbia quando la temperatura naturale si stabilizzerà intorno ai 15,1 °C.

Tabella 40

z (m)	T indist. (°C)	T 0m (°C)	T 33m (°C)	T 66m (°C)	T 100m (°C)
0	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
0,1	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
0,2	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3

0,3	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
0,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
0,5	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
0,6	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4
0,7	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
0,8	9,4	9,1	9,4	9,4	9,4
0,9	9,8	8,8	9,8	9,8	9,8
1	10,3	8,5	10,3	10,3	10,3
1,1	10,7	8,3	10,7	10,7	10,7
1,2	11,1	8	10,5	11,1	11,1
1,3	11,4	7,7	10,2	10,9	11,3
1,4	11,8	7,4	9,9	10,6	11
1,5	12,2	6,9	9,4	10,1	10,5
1,6	12,5	7,4	9,9	10,6	11
1,7	12,8	7,7	10,2	10,9	11,3
1,8	13,1	8	10,5	11,2	11,6
1,9	13,4	8,3	10,8	11,5	11,9
2	13,7	8,5	11,1	11,8	12,2
2,1	13,9	8,8	11,4	12,1	12,5
2,2	14,2	9,1	11,7	12,4	12,8
2,3	14,4	9,4	12	12,7	13
2,4	14,6	9,7	12,2	13	13,3
2,5	14,8	10	12,5	13,3	13,6
2,6	15,0	10,3	12,8	13,5	13,9
2,7	15,2	10,6	13,1	13,8	14,2
2,8	15,3	10,9	13,4	14,1	14,5
2,9	15,5	11,2	13,7	14,4	14,8
3	15,6	11,4	14	14,7	15,1

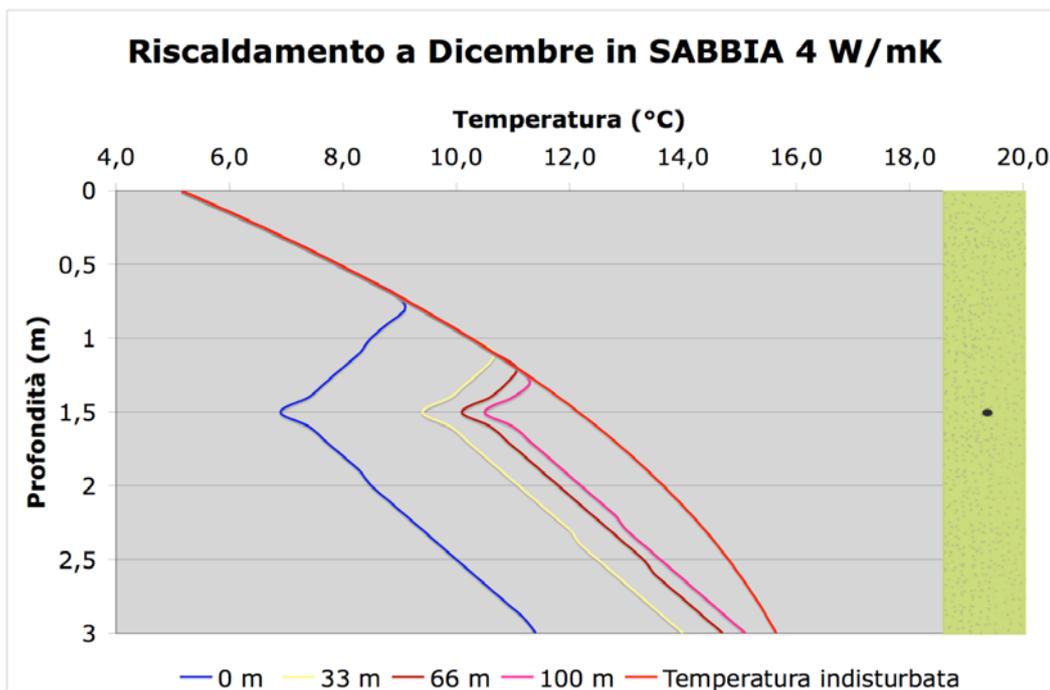
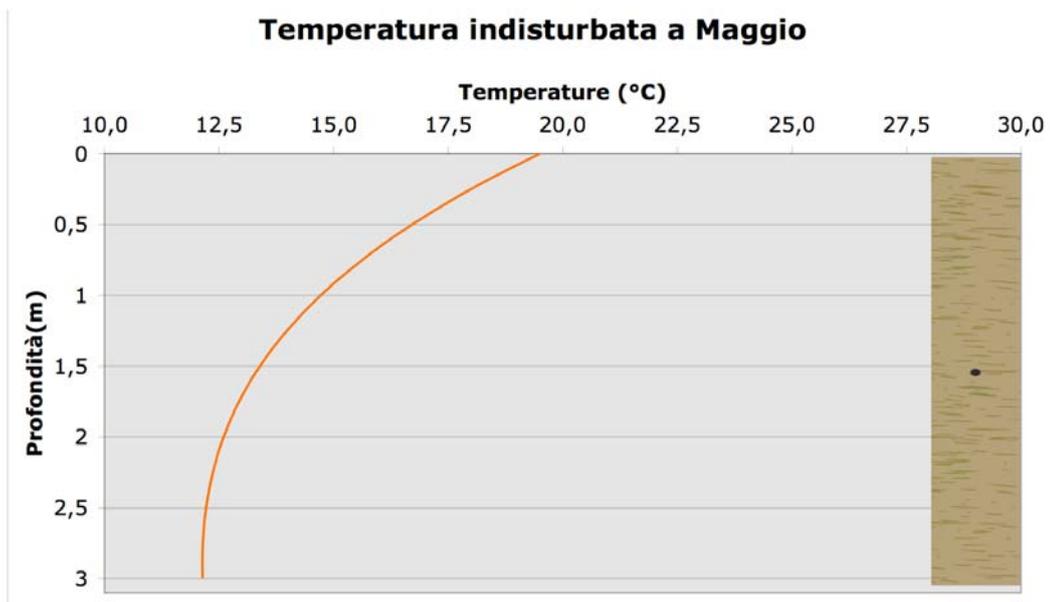


Figura 76: Tutti i profili di temperatura perturbata a 0, 33, 66 e 100 m in riscaldamento a Dicembre rispetto il profilo indisturbato che rimane costante per tutto la lunghezza del dissipatore.

### 7.3 SENSITIVITA' IN ARGILLA

#### 7.3.1 RAFFRESCAMENTO A MAGGIO

Figura 77: Profilo di temperatura indisturbato a Maggio in Argilla



L'applicazione è stata fatta su una argilla secca poco conduttiva alla quale è stato applicato lo stesso impianto geotermico con dissipatore orizzontale precedentemente descritto. Il profilo di temperatura del terreno indisturbato di riferimento è quello trovato con il modello SUPSI ed è illustrato in tabella 2. Qui viene inserito il grafico del suo profilo sino a una profondità di 3 m.

Dati di progetto:

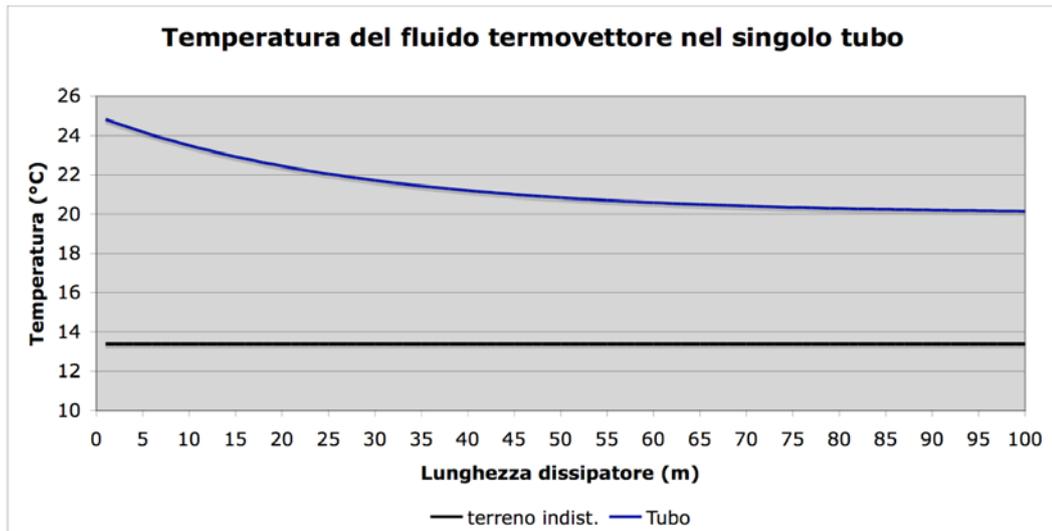
Potenza da dissipare totale	14500	W
Potenza per singolo circuito	1611	W
Potenza per 5 m di tubo	80,6	W
Portata totale	2492	l/h
Portata singolo tubo	277	l/h
T ingresso	25	°C
T uscita	20	°C
Diametro esterno tubo	25	mm
Diametro interno tubo	21	mm
Conduttività termica del polietilene	0,41	W/mK

**Tabella 41: dati di progetto**

Viene ora riportato l'ipotetico profilo di temperatura all'interno del tubo considerando un elevato decadimento iniziale visto il salto termico presente tra temperatura del fluido termovettore e quella del terreno indisturbato.

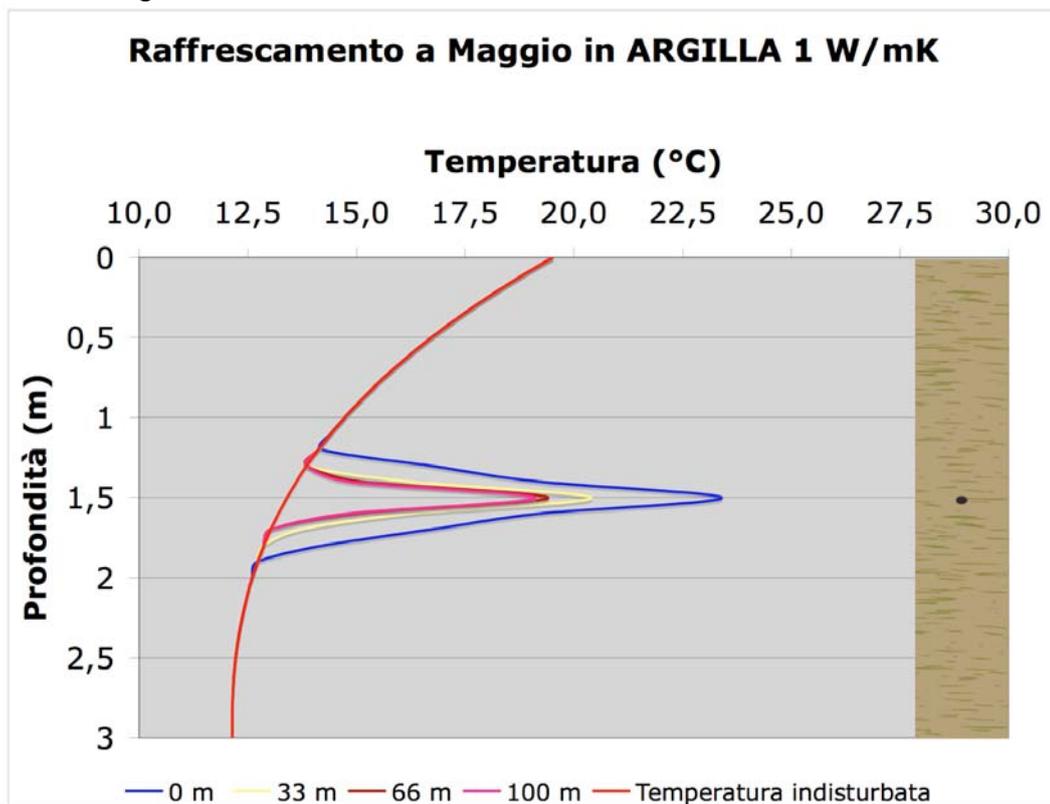
**Tabella 42: Temperature all'interno del tubo**

Posizione sul tubo (m)	Temperatura (°C)
0	24,5
33	21,5
66	20,4
100	20,2



**Figura 78: Profilo di temperatura del fluido nel tubo a Maggio e temperatura del terreno indisturbato a 1,5 m di profondità.**

Considerando anche per l'argilla le variazioni nei quattro punti standard su un unico grafico si ha:



**Figura 79: Tutti i profili di temperatura perturbata a 0, 33, 66 e 100 m in raffrescamento a Maggio rispetto il profilo indisturbato che rimane costante per tutto la lunghezza del dissipatore.**

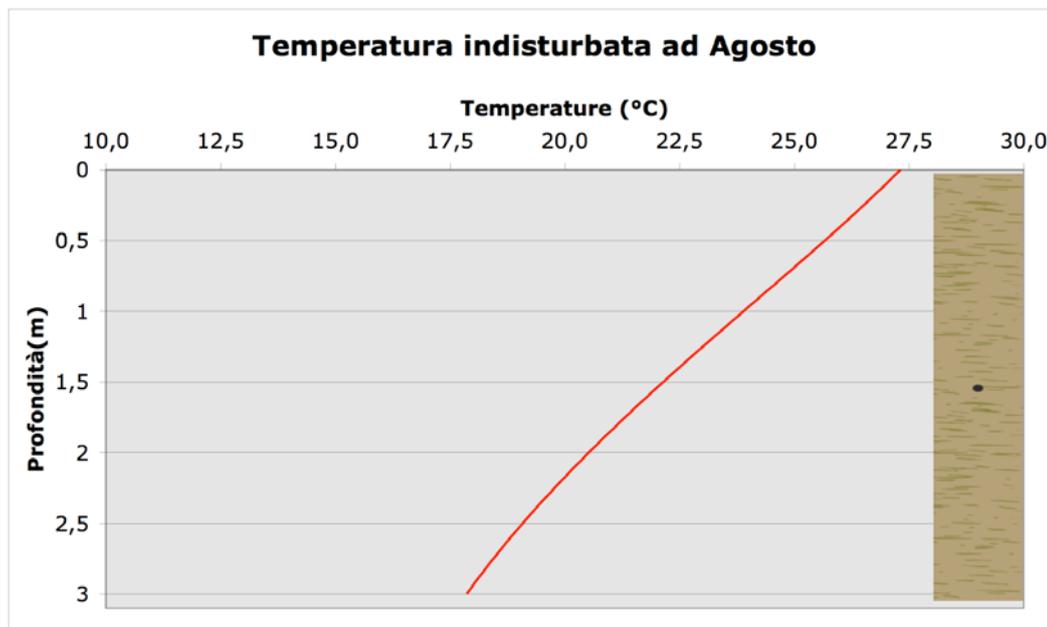
Come si può notare dal grafico, paragonando i profoli di temperatura creati dall'impianto in argilla con quelli in sabbia sempre a Maggio, si nota una parità nei valori massimi a 1,5 m di profondità ma una propagazione della

perturbazione molto inferiore. Dittati l'argilla è molto più resistente e non permette al dissipatore di scaricare la potenza nel terreno il quale si riscalda molto ma solo a ridosso dei tubi.

z (m)	T indist. (°C)	T 0m (°C)	T 33m (°C)	T 66m (°C)	T 100m (°C)
0	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
0,1	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9
0,2	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
0,3	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7
0,4	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2
0,5	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7
0,6	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3
0,7	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8
0,8	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4
0,9	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
1	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
1,1	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
1,2	14,1	14,2	14,1	14,1	14,1
1,3	13,9	16,7	13,9	13,9	13,9
1,4	13,6	19,2	16,2	15,1	14,8
1,5	13,4	23,4	20,4	19,4	19,1
1,6	13,2	19,2	16,2	15,1	14,8
1,7	13,0	16,7	13,7	13,0	13,0
1,8	12,9	14,2	12,9	12,9	12,9
1,9	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
2	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6
2,1	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
2,2	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
2,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
2,4	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
2,5	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
2,6	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
2,7	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
2,8	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
2,9	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
3	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1

### 7.3.2 RAFFRESCAMENTO AD AGOSTO

Viene riportato il profilo indisturbato di temperatura ad Agosto trovato usando il modello SUPSI dell'onda di calore:



**Figura 80 : Profilo di temperatura indisturbato ad Agosto in Argilla**

Dati di progetto:

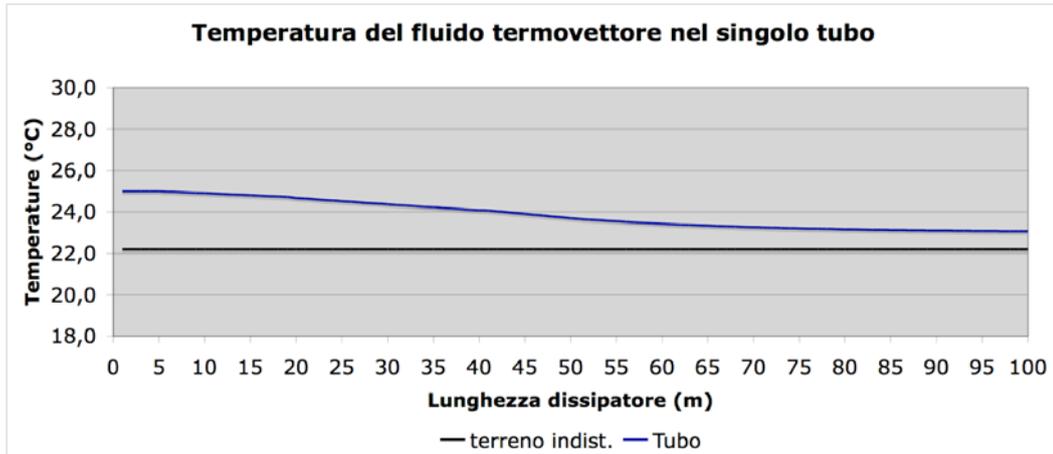
Potenza da dissipare totale	5800	W
Potenza per singolo circuito	645	W
Potenza per 5 m di tubo	32,22	W
Portata totale	2492	l/h
Portata singolo tubo	277	l/h
T ingresso	25	°C
T uscita	23	°C
Diametro esterno tubo	25	mm
Diametro interno tubo	21	mm
Conducibilità termica del polietilene	0,41	W/mK

**Tabella 43: dati di progetto**

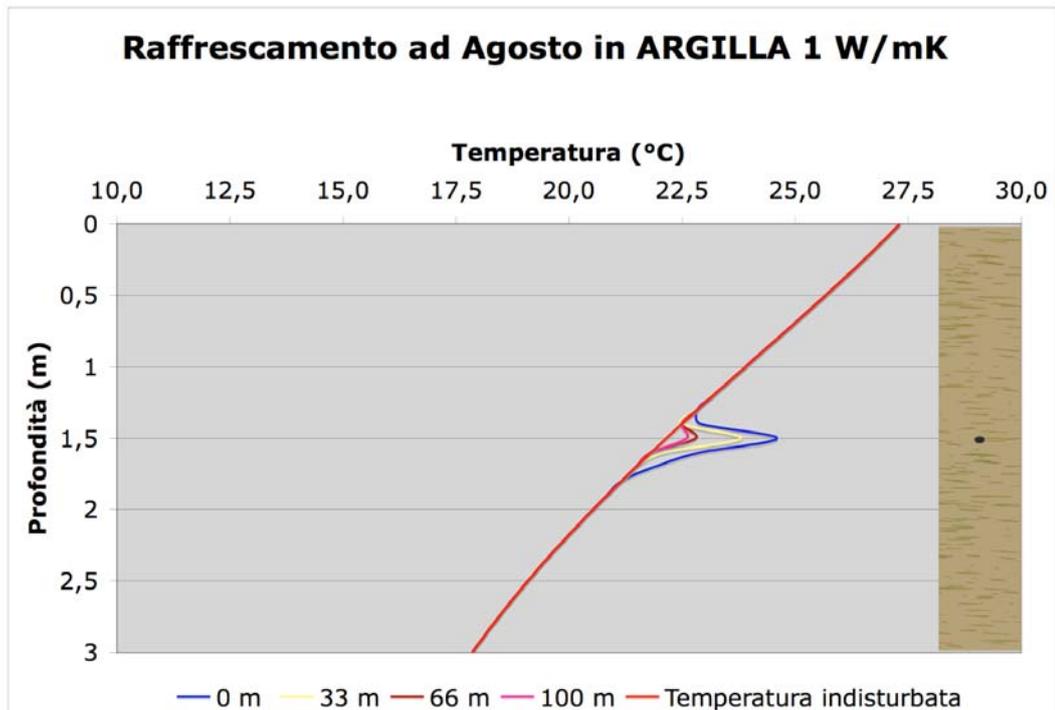
La temperatura d'uscita dal dissipatore resta alta, pari a 23°C in quanto l'argilla è più calda in questo periodo dell'anno e questo implica uno scambio di potenza di solo 5800 W. Il profilo di temperatura nel tubo ipotizzato ne risente e risulta notevolmente "appiattito".

**Tabella 44: Temperature all'interno del tubo**

Posizione sul tubo (m)	Temperatura (°C)
0	25
33	24,3
66	23,3
100	23,1



**Figura 81: Profilo di temperatura del fluido nel tubo ad Agosto e temperatura del terreno indisturbato a 1,5 m di profondità.**



**Figura 82: Tutti i profili di temperatura perturbata a 0, 33, 66 e 100 m in raffrescamento ad Agosto rispetto il profilo indisturbato che rimane costante per tutto la lunghezza del dissipatore.**



Le variazioni risultano minime per due motivi principalmente: il primo è sicuramente dovuto alla forte resistività dell'argilla che non permette di scaricare la potenza lontano dal dissipatore, il secondo è la bassa potenza scambiata dal dissipatore con il terreno in questo periodo, con riduzione del COP della pompa di calore.

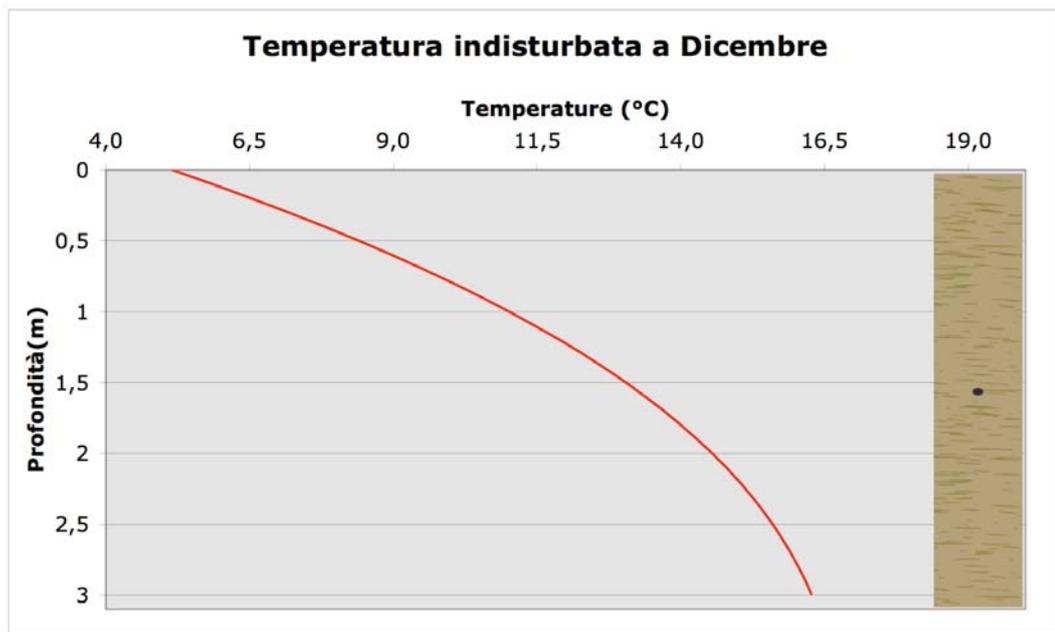
**Tabella 45**

z (m)	T indist. (°C)	T 0m (°C)	T 33m (°C)	T 66m (°C)	T 100m (°C)
0	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
0,1	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0
0,2	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7
0,3	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4
0,4	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0
0,5	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7
0,6	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3
0,7	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
0,8	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6
0,9	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3
1	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9
1,1	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
1,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2
1,3	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8
1,4	22,5	22,9	22,5	22,5	22,5
1,5	22,2	24,6	23,8	22,8	22,6
1,6	21,8	22,9	22,1	21,8	21,8
1,7	21,5	21,9	21,5	21,5	21,5
1,8	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2
1,9	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8
2	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5
2,1	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2
2,2	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9
2,3	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6
2,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
2,5	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1
2,6	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8

2,7	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6
2,8	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
2,9	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1
3	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9

### 7.3.3 RISCALDAMENTO A DICEMBRE

Viene riportato il profilo indisturbato di temperatura a Dicembre in argilla, sempre trovato con il modello SUPSI.



**Figura 83: Profilo di temperatura indisturbato a Dicembre in Argilla**

Potenza da dissipare totale	6900	W
Potenza per singolo circuito	767	W
Potenza per 5 m di tubo	38,3	W
Portata totale	1188	l/h
Portata singolo tubo	132	l/h
T ingresso	5	°C
T uscita	10	°C
Diametro esterno tubo	25	mm
Diametro interno tubo	21	mm
Conduktività termica del polietilene	0,41	W/mK

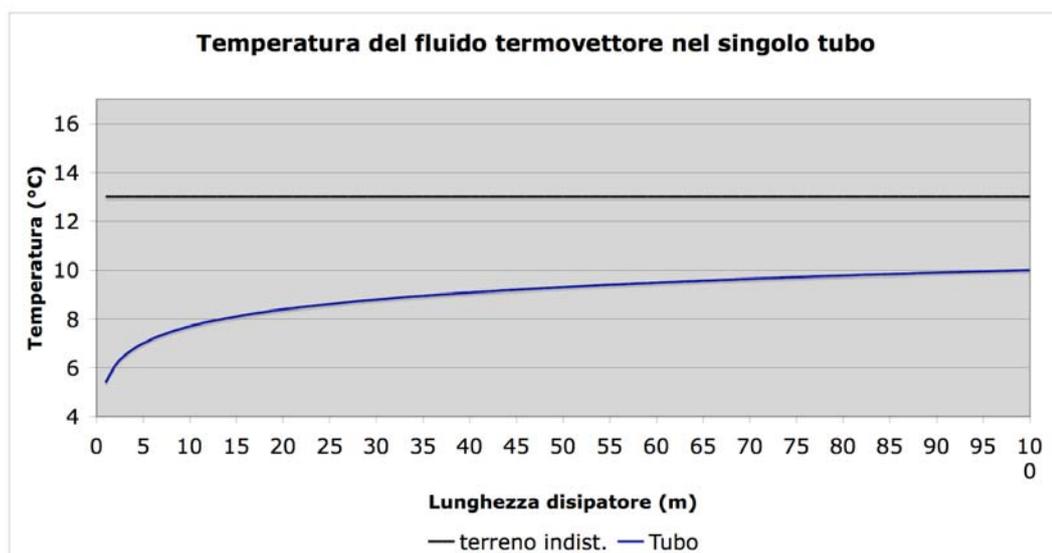
**Tabella 46: dati di progetto**

Ricordiamo che l'impianto in inverno non è molto sfruttato in quanto è presente una caldaia di compensazione, Il dissipatore così risulta molto lungo e poco fruttato visto che all'uscita da esso il fluido termovettore è a 10 °C ma il terreno indisturbato a quella profondità è a 13°C.

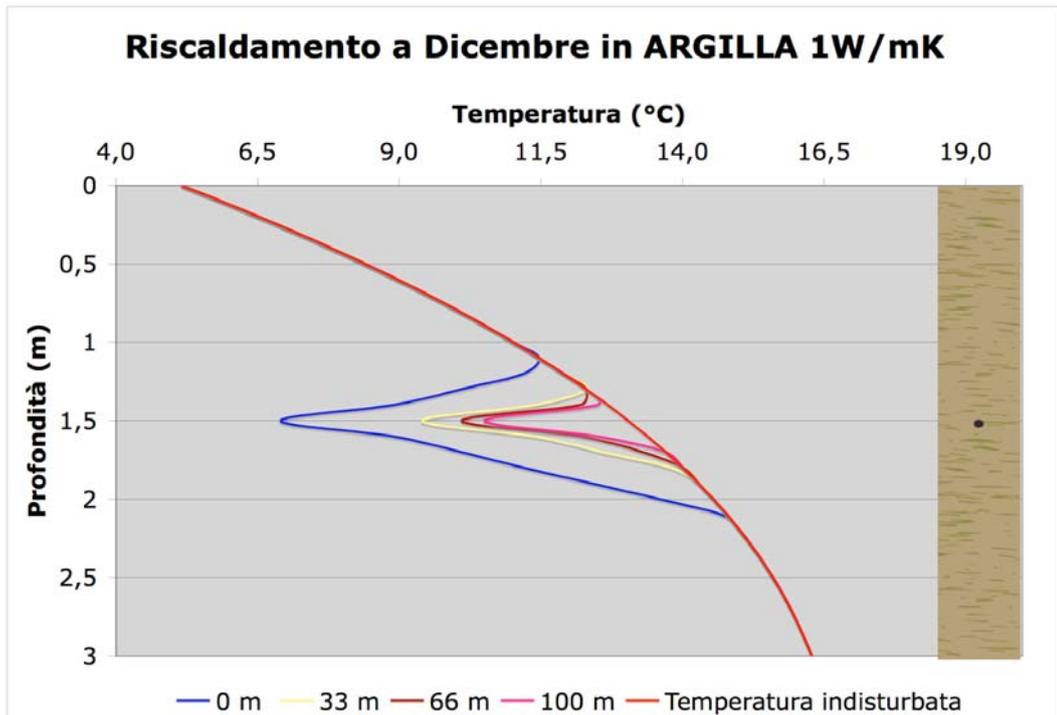
Il profilo di temperatura interna al tubo ipotizzato è il seguente:

**Tabella 47: Temperature all'interno del tubo**

Posizione sul tubo (m)	Temperatura (°C)
0	6,4
33	8,9
66	9,6
100	10

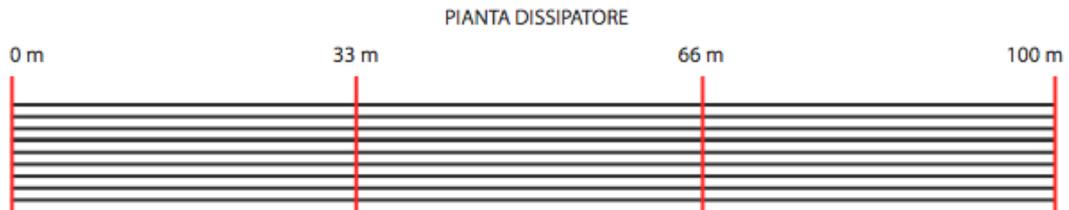


**Figura 84: Profilo di temperatura del fluido nel tubo a Dicembre e temperatura del terreno indisturbato a 1,5 m di profondità.**



**Figura 85: Tutti i profili di temperatura perturbata a 0, 33, 66 e 100 m in riscaldamento a Dicembre rispetto il profilo indisturbato che rimane costante per tutto la lunghezza del dissipatore.**

Le temperature sono state messe tutte sullo stesso grafico e si riferiscono alle quattro posizioni standard sul dissipatore:



La temperatura minima è di 6,9 °C e quindi lontana dallo zero termico e dalla possibilità di congelare il terreno, la perturbazione è chiaramente minore rispetto a quella in sabbia a parità di condizioni in quanto è l'argilla ad essere più resistente della sabbia.

Tabella 48

z (m)	T indist. (°C)	T 0m (°C)	T 33m (°C)	T 66m (°C)	T 100m (°C)
0	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
0,1	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
0,2	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
0,3	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
0,4	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
0,5	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4
0,6	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
0,7	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
0,8	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
0,9	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
1	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
1,1	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
1,2	11,9	11,2	11,9	11,9	11,9
1,3	12,3	10,1	12,3	12,3	12,3
1,4	12,7	8,9	11,4	12,2	12,5
1,5	13,0	6,9	9,4	10,1	10,5
1,6	13,4	8,9	11,4	12,2	12,5
1,7	13,7	10,1	12,6	13,3	13,7
1,8	14,0	11,2	13,8	14,0	14,0
1,9	14,3	12,4	14,3	14,3	14,3
2	14,5	13,6	14,5	14,5	14,5
2,1	14,8	14,7	14,8	14,8	14,8
2,2	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
2,3	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
2,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4
2,5	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6
2,6	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8
2,7	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9
2,8	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0
2,9	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2
3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3

## CAPITOLO 8

### IMPATTO AMBIENTALE DELLA POMPA DI CALORE GEOTERMICA

La pompa di calore associata a scambiatori geotermici è una soluzione di basso impatto ambientale se paragonata agli impianti di condizionamento tradizionali a caldaia.

La pompa di calore recupera circa 80% dell'energia di cui ha bisogno dal suolo mentre il restante 20% è di origine elettrica. L'energia proveniente dal terreno può essere considerata rinnovabile in quanto il terreno ha la capacità di ricaricarsi termicamente, soprattutto se l'impianto funziona anche a ciclo inverso (in estate ed in inverno). Se associamo all'impianto geotermico una batteria di pannelli fotovoltaici possiamo ottenere l'energia elettrica di cui si ha bisogno in modo autonomo e completamente rinnovabile ad emissione zero.

Al contrario la caldaia a combustione ha la totalità della sua energia derivante da combustibili fossili quali metano o gasolio, producendo emissioni inquinanti quali CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. In definitiva l'adozione di questo sistema di condizionamento su larga scala darebbe un grande contributo all'abbattimento delle emissioni che contribuiscono all'effetto serra e diminuirebbe il consumo totale nazionale dei combustibili fossili, riducendo la nostra dipendenza dagli stati stranieri fornitori. La pompa di calore, quindi, si dimostra una valida alternativa e meno pericolosa delle caldaie per le abitazioni in quanto non avvengono combustioni interne, risulta molto silenziosa grazie al continuo miglioramento della tecnica e soprattutto più economica nel tempo in quanto non richiede manutenzioni programmate come le caldaie a combustione.

Una considerazione particolare va rivolta alla perturbazione di temperatura che gli scambiatori geotermici possono provocare nel sottosuolo. Le sonde verticali non rappresentano un problema sotto questo punto di vista poiché il loro sviluppo è di tipo verticale, con un basso tasso estrattivo per metro lineare, in quanto possono fruttare grosse quantità di terreno in profondità dove una discreta variazione delle temperature non comporta problemi a coltivazioni e fauna.

In questo lavoro si è prestata maggiore attenzione agli scambiatori orizzontali poiché meno conosciuti sotto il profilo ambientale. Analizzando la variazione di temperatura in funzione della profondità possiamo individuare come zona di maggior criticità l'ingresso nel dissipatore dove in estate arriva fluido caldo (25°C) ed in inverno fluido termovettore freddo (5°C).

Vengono riportate di seguito le tabelle che mostrano il  $\Delta T$  nelle tre situazioni studiate con il modello di scambio termico (stratigrafia

mista presente all'Aktis, Sabbia ed Argilla). La variazione è calcolata come la differenza tra la temperatura indisturbata per quel mese (Maggio, Agosto, Dicembre) e quella derivante dal funzionamento dell'impianto a 0m.

$\Delta$ TEMPERATURE ( $^{\circ}\text{C}$ ) IN STRATIGRAFIA MISTA a 0m			
z(m)	Maggio	Agosto	Dicembre
0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0
0,2	0,0	0,0	0,0
0,3	0,0	0,0	0,0
0,4	0,0	0,0	0,0
0,5	0,0	0,0	0,0
0,6	0,0	0,0	0,0
0,7	0,0	0,0	0,0
0,8	0,0	0,0	0,0
0,9	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0
1,1	1,0	0,0	0,0
1,2	3,1	0,0	0,0
1,3	5,0	0,3	-0,3
1,4	6,9	1,6	-1,6
1,5	9,9	3,6	-3,6
1,6	7,9	2,4	-2,4
1,7	6,6	1,8	-1,8
1,8	5,3	1,2	-1,2
1,9	4,0	0,6	-0,6
2	2,7	0,0	0,0
2,1	1,0	0,0	0,0
2,2	0,0	0,0	0,0
2,3	0,0	0,0	0,0
2,4	0,0	0,0	0,0
2,5	0,0	0,0	0,0
2,6	0,0	0,0	0,0
2,7	0,0	0,0	0,0
2,8	0,0	0,0	0,0
2,9	0,0	0,0	0,0
3,0	0,0	0,0	0,0

**Tabella 49: Variazione della temperatura rispetto al profilo indisturbato alle varie profondità.**

$\Delta$ TEMPERATURE ( $^{\circ}$ C) IN SABBIA a 0m			
z(m)	Maggio	Agosto	Dicembre
0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0
0,2	0,0	0,0	0,0
0,3	0,0	0,0	0,0
0,4	0,0	0,0	0,0
0,5	0,0	0,0	0,0
0,6	0,8	0,0	0,0
0,7	1,8	0,0	0,0
0,8	2,8	0,0	-0,3
0,9	3,7	0,0	-1,0
1,0	4,6	0,0	-1,8
1,1	5,5	0,0	-2,4
1,2	6,4	0,0	-3,1
1,3	7,3	0,2	-3,7
1,4	8,1	0,6	-4,4
1,5	9,4	1,1	-5,3
1,6	8,6	1,1	-5,1
1,7	8,2	1,2	-5,1
1,8	7,7	1,3	-5,1
1,9	7,3	1,4	-5,1
2,0	6,9	1,6	-5,2
2,1	6,4	1,7	-5,1
2,2	5,9	1,8	-5,1
2,3	5,4	1,9	-5,0
2,4	4,9	2,0	-4,9
2,5	4,3	2,2	-4,8
2,6	3,8	2,2	-4,7
2,7	3,3	2,3	-4,6
2,8	2,7	2,4	-4,4
2,9	2,2	2,5	-4,3
3	1,6	2,7	-4,2

**Tabella 50: Variazione delle temperature rispetto al profilo indisturbato alle varie profondità.**

$\Delta$ TEMPERATURE (°C) in ARGILLA a 0m			
z (m)	Maggio	Agosto	Dicembre
0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0
0,2	0,0	0,0	0,0
0,3	0,0	0,0	0,0
0,4	0,0	0,0	0,0
0,5	0,0	0,0	0,0
0,6	0,0	0,0	0,0
0,7	0,0	0,0	0,0
0,8	0,0	0,0	0,0
0,9	0,0	0,0	0,0
1,0	0,0	0,0	0,0
1,1	0,0	0,0	0,0
1,2	0,1	0,0	-0,7
1,3	2,8	0,0	-2,2
1,4	5,6	0,4	-3,8
1,5	10,0	2,4	-6,1
1,6	6,0	1,1	-4,5
1,7	3,7	0,4	-3,6
1,8	1,3	0,0	-2,8
1,9	0,0	0,0	-1,9
2,0	0,0	0,0	-0,9
2,1	0,0	0,0	-0,1
2,2	0,0	0,0	0,0
2,3	0,0	0,0	0,0
2,4	0,0	0,0	0,0
2,5	0,0	0,0	0,0
2,6	0,0	0,0	0,0
2,7	0,0	0,0	0,0
2,8	0,0	0,0	0,0
2,9	0,0	0,0	0,0
3,0	0,0	0,0	0,0

**Tabella 51: Variazione delle temperature rispetto al profilo indisturbato alle varie profondità**

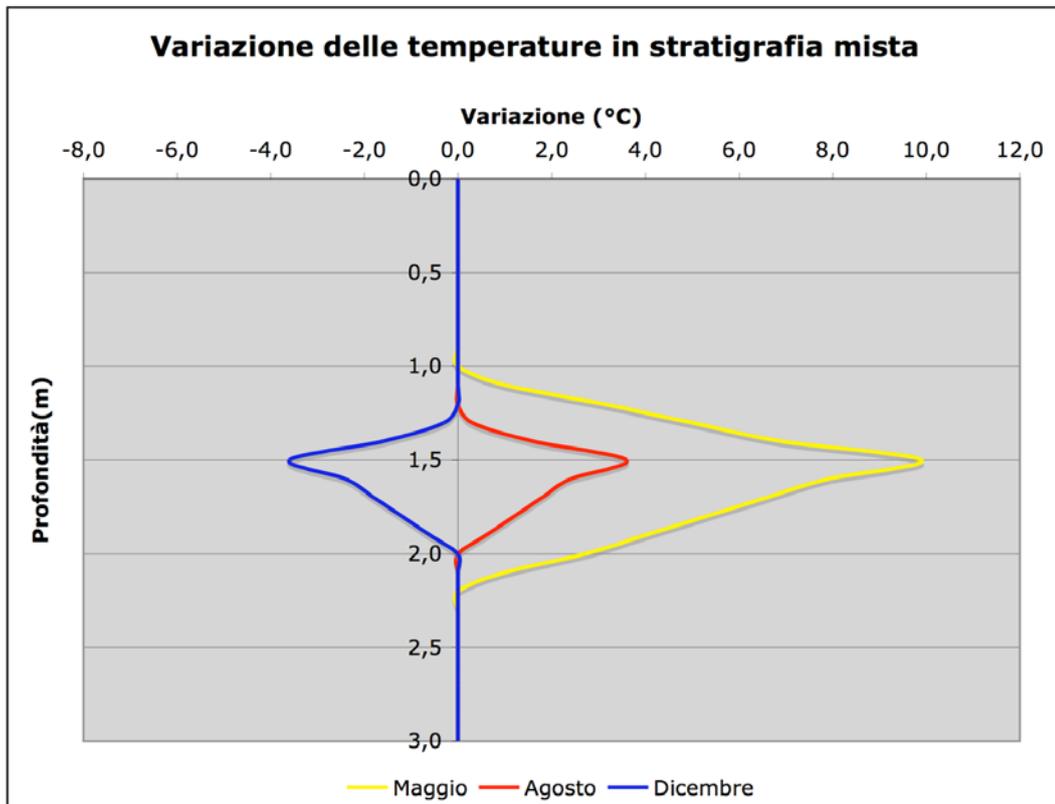
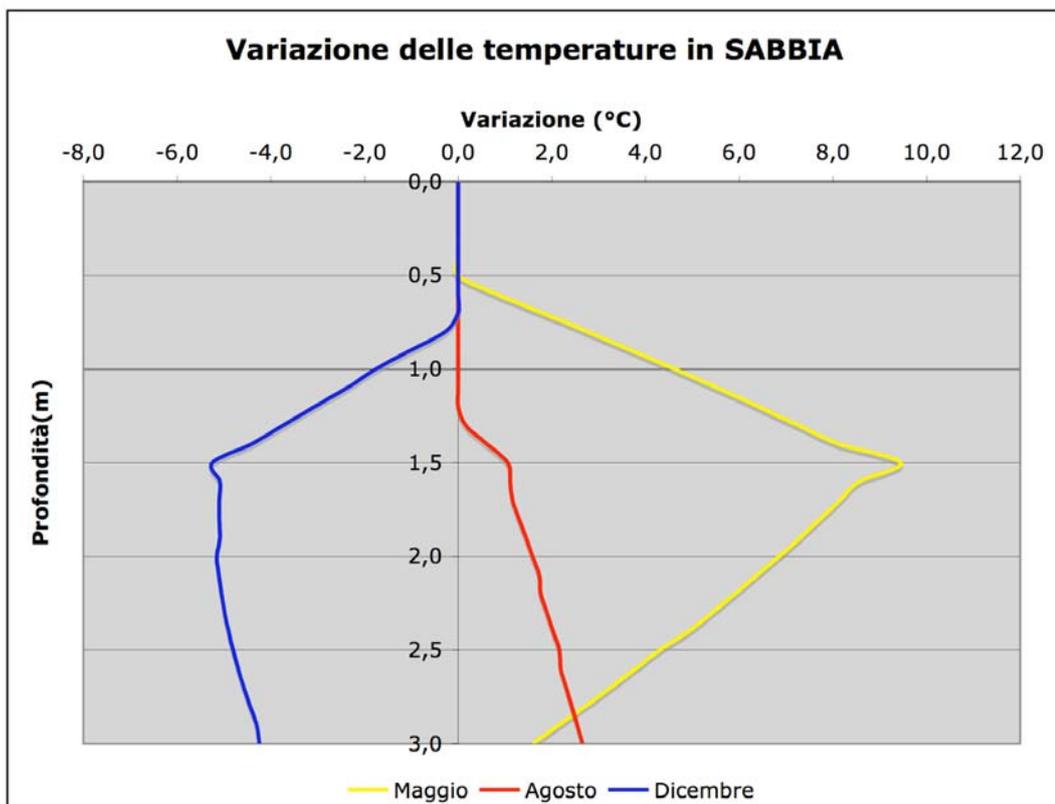
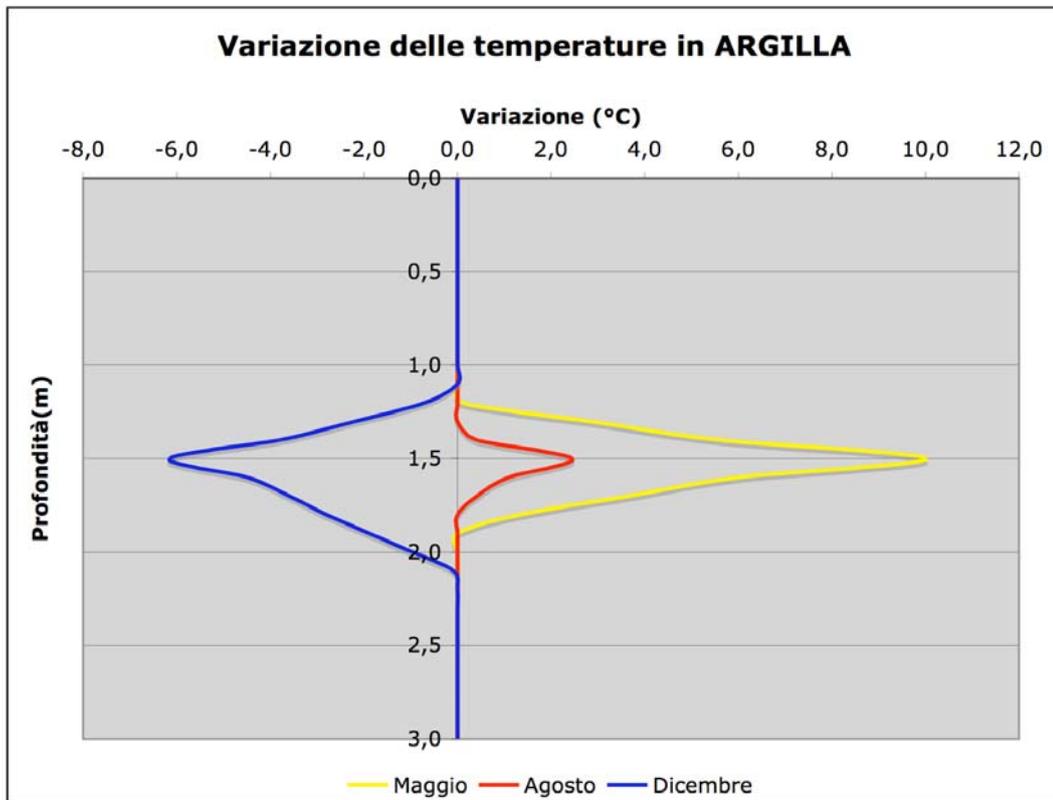


Figura 86-2: Ampiezza delle perturbazioni di temperatura in ingresso al dissipatore in stratigrafia mista ed in sabbia.





**Figura 3: Ampiezza delle perturbazioni di temperatura in ingresso al dissipatore in Argilla.**

Il cono di variazione cambia a seconda del terreno in cui si lavora; la stratigrafia mista (esposta nel capitolo 6, formata in sequenza da argilla sabbia ed argilla) ha un comportamento simile a quello della sola argilla, mostrando i più elevati valori di variazione a Maggio e Dicembre. La sabbia mostra variazioni simili ma ha un cono molto più esteso verso il basso dovuto alla sua alta conducibilità termica. Considerando che la maggior parte delle piante ha il suo apparato radicale che si estende nei primi 60 cm di profondità esse non risentono di variazioni di temperatura e ciò dimostra che le serpentine orizzontali non influenzano vegetazione con radici superficiali, comprese erba e fiori. Al contrario, piante ad alto fusto con radici che possono arrivare anche a 1-1,5 m di profondità, risultano influenzate dal funzionamento dell'impianto nei suoi primi 30 m di lunghezza. Esse subiscono una variazione positiva di 9-10 °C a Maggio ed una diminuzione di 4-5°C in inverno. Questo può rallentare o accelerare il loro metabolismo rispetto alla situazione naturale ma tuttavia restano valori accettati.

In conclusione, possiamo dire che l'utilizzo di piante in terreni sfruttati da dissipatori geotermici superficiali non è precluso, specialmente se esse

hanno radici superficiali. Tuttavia si sconsiglia l'installazione di alberi proprio sulla serpentina la quale dovrebbe essere sempre libera da ostacoli in caso di malfunzionamenti o perdite da riparare.

## CAPITOLO 9

### ANALISI ECONOMICA COMPARATA

In questo capitolo viene presentata un'analisi economica comparata tra il sistema geotermico e quello equivalente tradizionale composto di caldaia ed impianto a split per l'aria condizionata nel periodo estivo. Inoltre, verranno analizzati separatamente i sistemi geotermici con sonde verticali e dissipatore orizzontale per confrontare i diversi costi d'installazione. Saranno illustrati, oltre ai vari costi d'installazione, i consumi annuali in modo da valutare un costo complessivo, evidenziando la competitività del condizionamento geotermico. In fine sarà proposta una applicazione della nuova legge finanziaria 2007 che prevede sgravi fiscali a coloro che ristrutturano gli edifici portandoli in una classe energetica bassa.

Il confronto tra i vari sistemi è applicato ad un edificio di 500 m<sup>2</sup> adibito ad uffici, quindi con un basso consumo d'acqua sanitaria che in questa sede non viene presa in considerazione. Le soluzioni che si esaminano sono le seguenti:

- **A) Impianto geotermico con dissipatore orizzontale**
- **B) Impianto geotermico con sonde verticali**
- **C) Soluzione tradizionale di caldaia + impianto d'aria condizionata.**

L'edificio è dotato d'impianto radiante a pavimento per l'intera superficie di 500 m<sup>2</sup>, impianto radiante che viene mantenuto costante per tutte e tre le soluzioni.

**Tabella 52: Consumi e costi generali.**

Costo energia elettrica €/kWh	1,18
Costo del metano €/m <sup>3</sup>	0,6
Potenza termica da dissipare in estate kW	14,4
Potenza termica da dissipare in inverno kW	6,9

#### **Soluzione A:**

L'impianto a dissipatore orizzontale viene dimensionato in base alle esigenze estive in quanto deve dissipare 14,4 kW contro i 6,9 in inverno. I COP che vengono considerati per gli impianti geotermici sono di:

COP Invernale	3,56
COP estivo	5,2

Per la capacità d'estrazione dal terreno si considera un valore cautelativo di 25 W/m<sup>2</sup> che solitamente è considerato dall'azienda Aktis Italia S.r.l. per installazioni standard. Utilizzando questo valore e dovendo dissipare 14,4 kW adottando un passo di 0,33 m tra i tubi di polietilene lunghi 100 m si ha un totale di 1749 m che si approssimano a 1800 m (in quanto le bobine di tubo sono da 100 m).

Passo tra tubi (m)	0,33
Lunghezza circuito (m)	100
Lunghezza totale necessaria (m)	1800
N° circuiti	18
Terreno da sbancare (m <sup>3</sup> )	1154

**Tabella 53: Dati geometrici dissipatore**

		Totale
Costo al metro del tubo da Ø 25 mm (€)	0,86	1083
Costo sbancamento al m <sup>3</sup> (€)	4	4617

Costo complessivo dell'impianto geotermico con l'impianto radiante a pavimento:

		totale
Costo collettore da 18 uscite (2 pezzi) (€)	700	1400
Pompa di calore da 12 kW e serbatoio d'accumulo (€)		5460
Costo ed installazione dell'imp. radiante (m <sup>2</sup> )	56	28000
<b>TOTALE GEOTERMICO (€)</b>		<b>12560</b>
<b>TOTALE GENERALE CON IMP. RADIANTE (€)</b>		<b>40560</b>
<b>COSTO A m<sup>2</sup> (€)</b>		<b>81</b>

### Soluzione B:

L'impianto geotermico con sonde verticali differisce solamente per le sonde esterne, mentre il dimensionamento della pompa di calore e dell'impianto radiante resta sempre lo stesso.

Viene considerato l'utilizzo di sonde verticali da 80 m con una capacità estrattiva di 50 W/m (quindi per terreni sabbiosi e saturi d'acqua) per un totale di 4 kW per sonda.

Capacità estrattiva per singola sonda (kW)	4
Potenza totale da dissipare (kW)	14,4

N° sonde a singolo U da 80 m	4
------------------------------	---

Costi per la realizzazione delle sonde:

Costo della sonda per metro (€)	42
Costo totale delle 4 sonde (320 m realizzati) (€)	13440

		totale
Costo collettore da 4 uscite (x2) (€)	134,4	268,8
Pompa di calore da 12 kW e serbatoio d'accumulo (€)		5460
Costo ed installazione dell'imp. radiante (m <sup>2</sup> )	56	28000
<b>TOTALE GEOTERMICO (€)</b>		<b>19169</b>
<b>TOTALE GENERALE CON IMP. RADIANTE (€)</b>		<b>47169</b>
<b>COSTO A m<sup>2</sup> (€)</b>		<b>94</b>

Il costo di perforazione e realizzazione della sonda a singolo U con tubo Ø 40 mm verrebbe 60 €/m, però si applica una riduzione del 30% poiché le sonde sono 4 e quindi si abbatte una parte dei costi fissi sostenuti dal perforatore.

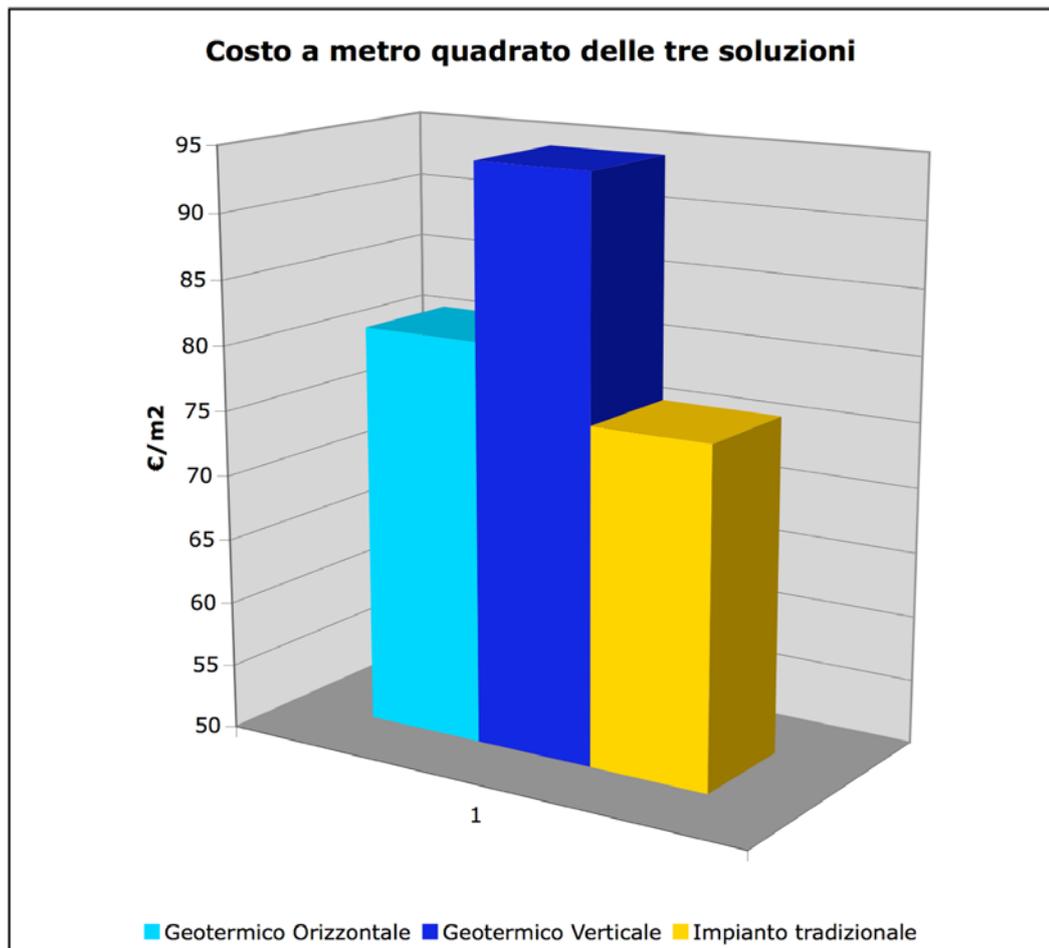
### Soluzione C:

L'impianto tradizionale prevede l'installazione di una caldaia con impianto radiante a pavimento e più l'aggiunta di un impianto a split per l'aria condizionata.

Costo della caldaia (€)	3000
Costo impianto radiante totale (€)	28000
Costo impianto aria condizionata tradizionale (€)	7000
<b>COSTO TOTALE CON IMP. RADIANTE (€)</b>	<b>38000</b>
<b>COSTO A m<sup>2</sup> (€)</b>	<b>76</b>

Il maggior costo delle installazioni geotermiche a m<sup>2</sup> rende questa tipologia d'impianti meno appetibile agli occhi dell'utenza media. Bisogna inoltre considerare che l'impianto tradizionale è fornito di una caldaia abbastanza costosa (perché di qualità) e di un impianto d'aria condizionata che non sempre è richiesto dall'utenza. L'elevato prezzo al m<sup>2</sup>, unito alla scarsa conoscenza e diffidenza verso questa tipologia d'impianti li ha resi poco diffusi nel nostro paese.

Se però si considerano i consumi che l'utenza deve sostenere per il loro funzionamento l'analisi cambia completamente.

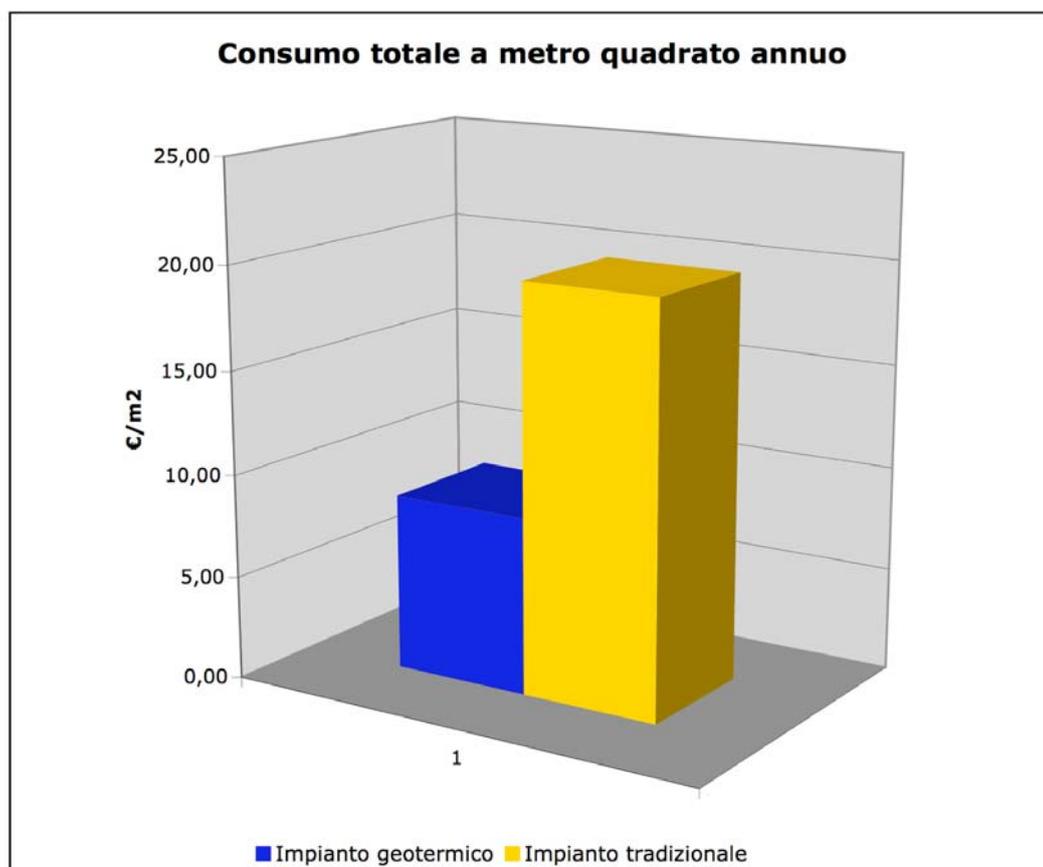


**Figura 87: Costo a m<sup>2</sup> dei tre impianti compresi di impianto radiante a pavimento**

Considerando 2800 ore di funzionamento invernale (3,8 mesi) e 2000 ore di funzionamento estivo (2,7 mesi) si ottengono i seguenti costi estivi, invernali e totali a m<sup>2</sup>.

		Soluzione C	Soluzione A e B
Fabbisogno invernale medio (energia primaria)	W/m <sup>2</sup>	60	60
Fabbisogno estivo medio (energia primaria)	W/m <sup>2</sup>	52	40
Funzionamento invernale	ore	2800	2800
Funzionamento estivo	ore	2000	2000
Efficienza sistema	%	0,87	0,99
Potere calorifico metano	MJ/m <sup>3</sup>	32	32
Costo metano m3	€	0,6	0,6
Costo kWh	€	0,18	0,18
COP medio annuale			3,56
COP estivo dello split		2,8	5,2

		Soluzione C	Soluzione A e B
Costo invernale	€/m <sup>2</sup>	13,03	5,82
Costo estivo	€/m <sup>2</sup>	6,69	2,77
<b>COSTO TOTALE</b>	<b>€/m<sup>2</sup></b>	<b>19,72</b>	<b>8,58</b>



**Figura 88 Costo annuale a m<sup>2</sup> per il funzionamento dell'impianto**

Il grafico evidenzia il maggior costo necessario al funzionamento dell'impianto a m<sup>2</sup> per l'impianto tradizionale rispetto al geotermico. Se poi consideriamo i costi assoluti relativi ad un anno nell'edificio di 500 m<sup>2</sup> si ha:

Costo riscaldamento invernale	€	6517	2908
Costo condizionamento estivo	€	3343	1385
Costo deumidificazione estiva	€	0	396
<b>TOTALE ANNUALE</b>	<b>€</b>	<b>9860</b>	<b>4688</b>
Risparmio rispetto alla soluzione C	€		5172
Risparmio % rispetto la soluzione C	%		52

In definitiva dopo un anno di utilizzo si ha un risparmio di € 5172 pari al 52% rispetto alla soluzione tradizionale. Possono sembrare valori elevati ma bisogna tenere conto dell'elevato numero di ore di funzionamento annuali 4800 pari a 6,6 mesi.

Nei sistemi geotermici è l'impianto radiante a raffreddare l'ambiente ma per l'eliminazione dell'umidità serve un deumidificatore fornito con l'impianto.

Se si considera di fare una ristrutturazione dell'edificio, sostituendo il sistema di condizionamento tradizionale con l'impianto geotermico, sia esso con dissipatore orizzontale o con sonde verticali, e aggiungendo un "cappotto" d'isolamento all'edificio in modo da abbassare del 20% il fabbisogno termico si può rientrare negli incentivi statali previsti dalla legge finanziaria 2007. Per coloro che ristrutturano edifici esistenti potandoli in basse classi energetiche è previsto uno sgravio fiscale del 55% delle spese sostenute dilazionato in 3 anni.

Basandosi su calcoli di un'azienda che progetta e monta isolamenti per edifici in funzione del nostro stabile di 500 m<sup>2</sup> si è ottenuto:

Parete da isolare	360	m2
Spessore cappotto in lana di vetro	0,12	m
Costo	6051	€
Metano risparmiato in un anno	2847	m3
Tetto da isolare	250	m2
Spessore cappotto in lana di vetro	0,1	m
Costo	2790	€
Metano risparmiato in un anno	1750	m3
<b>COSTO TOTALE ISOLAMENTO</b>	<b>8841</b>	<b>€</b>
<b>METANO RISPARMIATO IN UN ANNO</b>	<b>4597</b>	<b>m3</b>
<b>RISPARMIO DI METANO ANNUO</b>	<b>2758</b>	<b>€</b>
<b>kWh RISPARMIATI ANNUI</b>	<b>9329</b>	<b>kWh</b>
<b>RISPARMIO ENERGIA ANNUA</b>	<b>1679</b>	<b>€</b>

Isolando un totale di 610 m<sup>2</sup> si è ottenuto un risparmio di 1750 m<sup>3</sup> di metano per la soluzione a caldaia (C) per un totale di 2758 €. Per la soluzione geotermica (A e B) si ha un equivalente di 9329 kWh risparmiati pari a 1679 €.

<b>COSTO ANNUO SOLUZIONE C CON ISOLAMENTO</b>	<b>7102</b>	<b>€</b>
<b>COSTO ANNUO SOLUZIONE A e B CON ISOLAMENTO</b>	<b>3009</b>	<b>€</b>
<b>RISPARMIO CON ISOLAMENTO RISP. SOLUZIONE C</b>	<b>4093</b>	<b>€</b>

Il costo totale dell'intervento è di 8841 € che vanno a sommarsi ai costi di installazione degli impianti A, B e C. Sui primi due, visto che si ha una riduzione maggiore del 20% dei consumi si ottiene l'incentivo statale del 55% dilazionato in 3 anni mentre sulla soluzione tradizionale si ha solo un risparmio di spese relativo ai consumi.

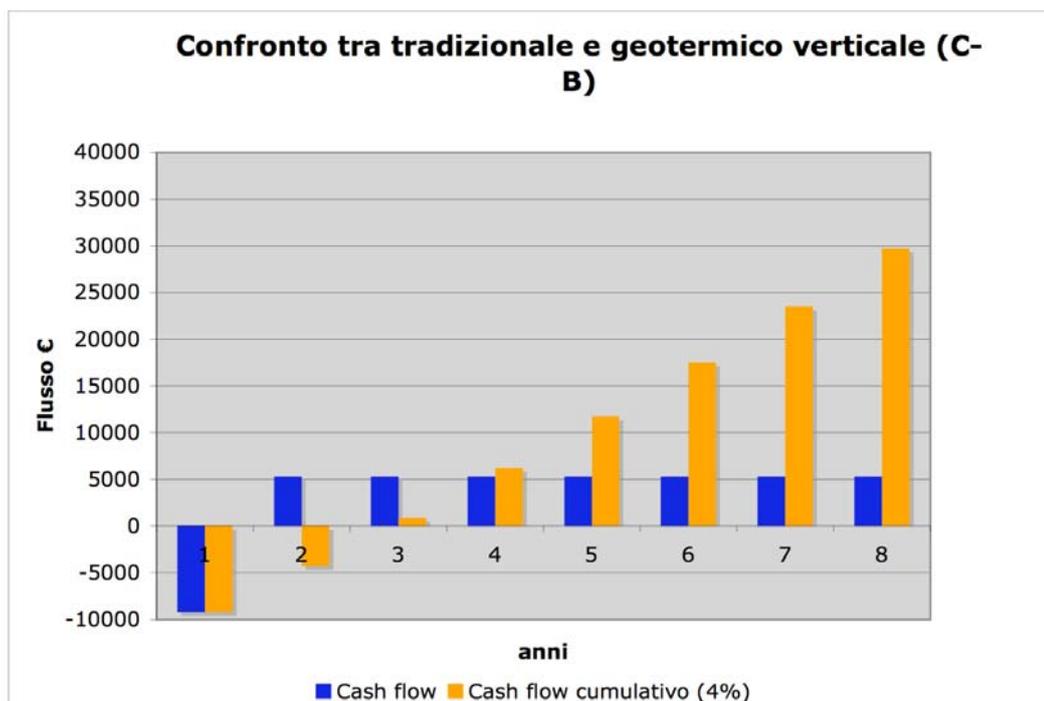
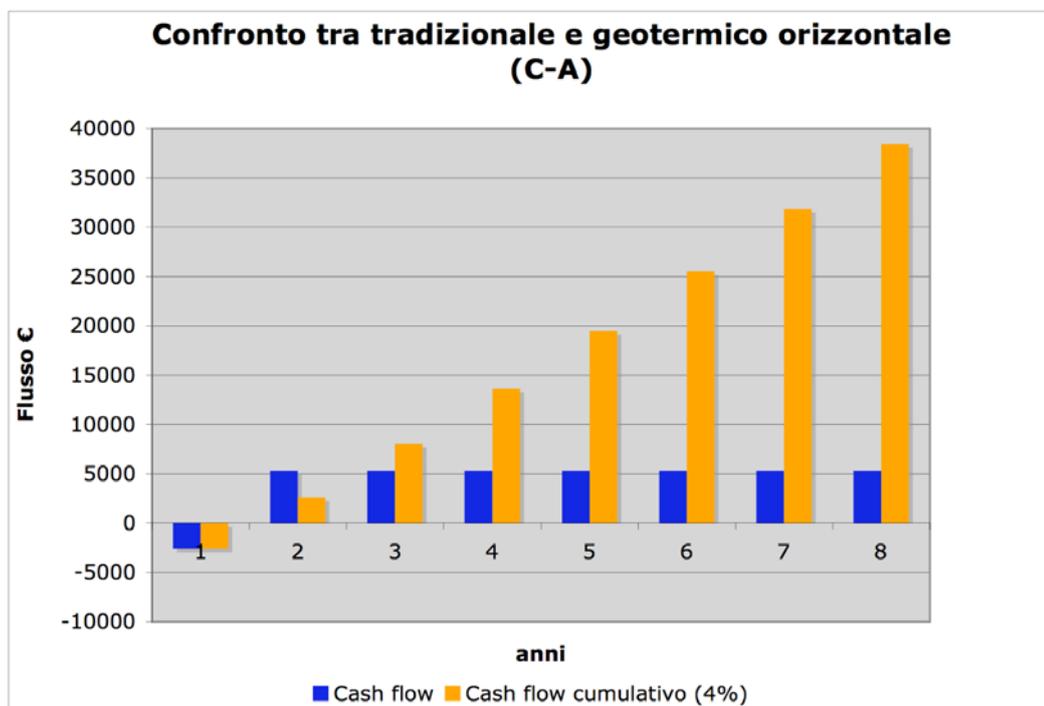
INCENTIVI		Soluzione A	Soluzione B
Costo totale installazione impianto + isolamento	€	49401	56010
55% di sgravio fiscale	€	27171	30805
Sgravio annuo (primi 3 anni)	€	9057	10268

Viene ora proposto un cash flow non cumulativo di confronto tra i vari risultati ottenuti:

anni	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Impianto tradizionale C</b>	38000	9980	9980	9980	9980	9980	9980	9980
<b>Geotermico orizzontale A</b>	40560	4688	4688	4688	4688	4688	4688	4688
<b>Geotermico verticale B</b>	47169	4688	4688	4688	4688	4688	4688	4688
<b>Isolamento per tradizionale C</b>	46841	7222	7222	7222	7222	7222	7222	7222
<b>Isolamento per geotermico A</b>	49401	3009	3009	3009	3009	3009	3009	3009
<b>Isolamento per geotermico B</b>	56010	3009	3009	3009	3009	3009	3009	3009
<b>Incentivo statale soluz A</b>	9057	9057	9057					
<b>Incentivo statale soluz B</b>	10268	10268	10268					
<b>C - A</b>	-2560	5292	5292	5292	5292	5292	5292	5292
<b>C - B</b>	-9169	5292	5292	5292	5292	5292	5292	5292
<b>C - A isolati ed A incentivato</b>	6497	13270	13270	4213	4213	4213	4213	4213
<b>C - B isolati e B incentivato</b>	1099	14481	14481	4213	4213	4213	4213	4213

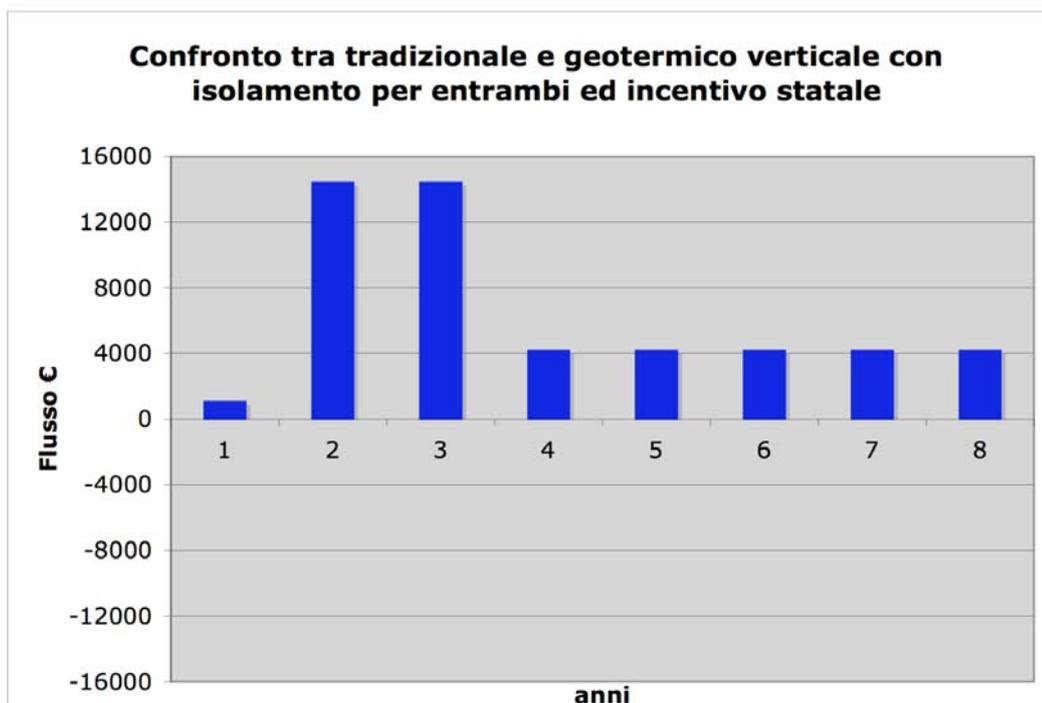
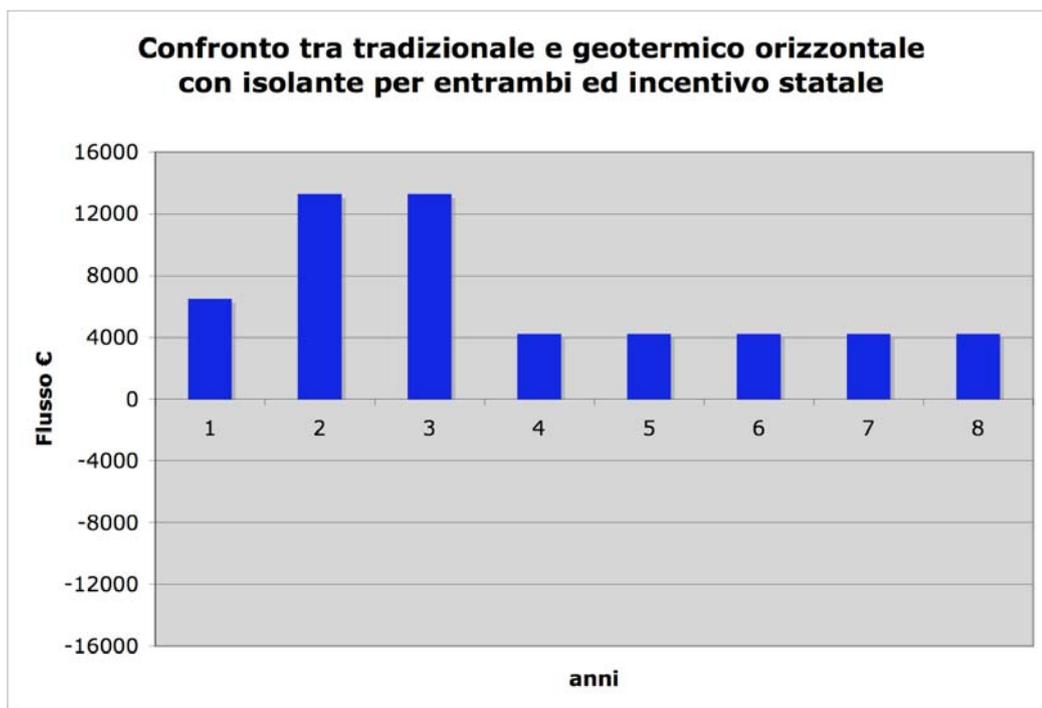
Si confrontano le varie soluzioni tecniche analizzando sia i costi d'installazione che di consumi annui, l'impianto geotermico risulta molto conveniente in quanto il pareggio si ha già a metà del

secondo anno se si considera l'impianto con dissipatore orizzontale mentre si arriva al pareggio nel corso del terzo anno se si decide di utilizzare le sonde verticali.



Qui vengono proposti i cash flow cumulativi e non di confronto tra impianto tradizionale e soluzioni geotermiche ( tasso di attualizzazione del 4%)

Se ora consideriamo di aggiungere l'isolamento sopra esposto sia al sistema tradizionale sia a quello geotermico si ottengono risultati inequivocabilmente vantaggiosi per il geotermico. A questi difatti, vanno aggiunti gli incentivi statali di rimborso della spesa complessiva del 55%, cosa che non si può applicare all'impianto tradizionale anche se isolato.



**Cash flow non cumulativo con incentivi statali per il geotermico**

Qui non viene proposto il cash flow cumulativo in quanto si è sempre in guadagno grazie agli incentivi statali.

## CAPITOLO 10

### CONCLUSIONI

Riesaminando il lavoro svolto in questa tesi si può affermare che la pompa di calore geotermica ha tutte le caratteristiche necessarie per essere una delle migliori alternative alle caldaie a combustione per il condizionamento degli edifici in futuro.

È stato analizzato lo stato dell'arte attuale, descrivendo le varie tipologie d'impianti che utilizzano la pompa di calore geotermica. Si è analizzato lo stato normativo che attualmente è seguito dal mondo tecnico per la progettazione e l'installazione di questa tecnologia e si è sottolineato il fatto che in Italia si ha una completa mancanza di leggi a riguardo e si è costretti a fare riferimento a leggi estere quali la VDI 4640. Lo sfruttamento del terreno a fini energetici è una pratica vincente, già conosciuta ed usata in alcuni paesi d'America e nel nord Europa, essa è ben collaudata e ricca di strumenti per il dimensionamento e l'installazione di sonde verticali, difatti sono presenti numerosi modelli svedesi per il loro dimensionamento ed inoltre esistono procedure quali il test di risposta geotermica per valutare le caratteristiche termiche delle sonde. Al contrario, si è constatato che non esistono adeguati strumenti per lo studio dei dissipatori orizzontali. La pratica comune ha dimostrato che per piccole installazioni non è necessario un dimensionamento accurato del dissipatore ed i buoni risultati mostrati dalle installazioni funzionanti ne sono una prova. Attraverso la preziosa collaborazione con Aktis Italia S.r.l., ditta di esperienza decennale nel settore del condizionamento degli edifici, si è partiti da dati sperimentali di temperature indisturbate del terreno interessato dal dissipatore orizzontale dell'impianto della ditta e si è creato un modello originale di scambio termico che restituisce le variazioni termiche che il dissipatore crea sul terreno. Esse sono state calcolate in diversi periodi dell'anno in modo da evidenziare il diverso comportamento che lo scambio ha in funzione dell'ambiente esterno. Un'attenzione particolare è stata riposta alla sensitività del modello in base alle caratteristiche termiche dei terreni. Il modello è stato simulato in sabbia ed argilla, due terreni con caratteristiche opposte e si è analizzato il diverso tasso estrattivo in relazione anche alla stagione ed al regime di funzionamento. I risultati ottenuti sono stati verificati e confermati con dati di temperatura nel sottosuolo ottenuti da sondaggi effettuati presso la ditta.

L'impatto ambientale di questi impianti è stato analizzato sotto due punti di vista: le emissioni nocive e l'influenza che la temperatura perturbata ha sulle piante. Le prime sono pari a zero in quanto la pompa di calore geotermica, oltre ad avere un rendimento migliore rispetto alle caldaie a combustione, utilizza corrente elettrica per

funzionare e ben l'80% del suo fabbisogno deriva dall'energia rinnovabile sottratta dal terreno. La variazione di temperatura nel sottosuolo non risulta incompatibile con la flora e ciò, unito alle mancate emissioni rende la pompa di calore geotermica una soluzione a bassissimo impatto ambientale.

L'elaborato si conclude con un'analisi economica comparativa tra impianto a caldaia tradizionale con aria condizionata ed impianto a pompa di calore geotermica. I risultati evidenziano la netta convenienza di questa soluzione impiantistica rispetto al tradizionale, anche a fronte di un maggior investimento che per altro viene presto ammortizzato grazie al minor consumo e quindi onere monetario che gli impianti geotermici richiedono.



## 11 BIBLIOGRAFIA

- Lazzarin Renato 1982, **Intervista sulle pompe di calore**, Franco Muzzio & C. editore.
- Kreith Frank 1974, **Principi di trasmissione del calore**, Liguori editore.
- M.C. Potter C.W. Somerton 1998, **Termodinamica per ingegneri**, McGraw Hill Milano.
- Svizzera Energia 2002, Società svizzera per l'energia (SSG). [www.geothermal-energy.ch](http://www.geothermal-energy.ch)
- Ground Source Heat Pump 2005, energia ricerca ed innovazione. [www.geothermal-energy.ch](http://www.geothermal-energy.ch)
- Geothermal energy and heat storage, SUPSI 2002, Dr.D. Pahud
- Aktis Italia S.r.l. 2007, Progettazione sistemi a pavimento "Aktis Floor"
- CDA 2007, Pompe di calore geotermiche, [www.webcda.it](http://www.webcda.it)
- VDI 4640 Blatt2/Part2 2001, Thermal use of the underground.
- Dossier n°44 Marzo 2007, Impianti ad anello d'acqua geotermici.
- Gehlin Signhild 1998, Thermal response test, università di Lulea Svezia.
- De Carli Michele, Del Bianco Riccardo, Fellin Francesco, Manente Michele, Tonon Massimo, Zecchin Roberto 2005, Sviluppi nelle pompe di calore: il terreno come sorgente termica.
- Legge finanziaria 27 dicembre 2006 numero 26
- [www.cespevi.it](http://www.cespevi.it)