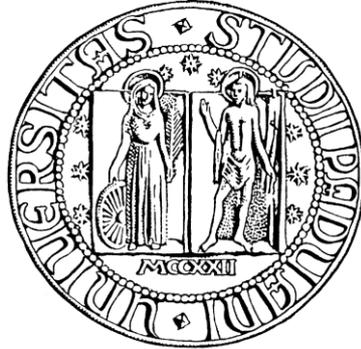


WPKXGTUKVC ø " FGINK " UVWFK " FK
HCEQNVC ø " FK " " KPIGIPGTKC



CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
TESI DI LAUREA MAGISTRALE

ANALISI DI ACCUMULO TERMICO NEL TERRENO PER LO STOCCAGGIO DI CALORE RESIDUO

Relatore: Ch. mo Prof. MICHELE DE CARLI

Correlatori: Ch. mo Prof. ANGELO ZARRELLA
Ch. mo Prof. ANTONIO GALGARO

Laureando: DIEGO FAVARETTO

Anno Accademico 2013/2014

INTRODUZIONE	7
1) GEOTERMIA	11
1.1) Calore contenuto nel terreno	11
1.2) Il terreno come serbatoio di calore	14
2) POMPE DI CALORE	15
2.1) Pompe di calore a compressione di vapore e ad assorbimento	15
2.2) Tipologie di pompe di calore in funzione della sorgente termica	19
4 0 5 + " " X c p v c i i k " g p g t i g v k e k " p g n n ø w v k n k 20t g " n g	
4 0 6 + " V k r q n q i k g " q v v k o c n k " f k " v g t o k p c n k " f 02k o r k c	
2.4.1) <i>Impianti radianti</i>	22
2.4.2) <i>Impianti con terminali convettivi</i>	24
3) POMPE DI CALORE GEOTERMICHE	27
3.1) Sistemi a circuito aperto	29
3.2) Sistemi a circuito chiuso	31
3.2.1) <i>Sistemi a circuito chiuso con sonde geotermiche orizzontali</i>	31
3.2.2) <i>Sistemi chiusi a circuito verticale</i>	32
4) ASPETTI GEOLOGICI	37
4.1) Test di Risposta Termica	39
5) ANALISI COL CaRM	41
5.1) Descrizione del CaRM	41
5.1.1) <i>Modello matematico su cui si basa il CaRM</i>	42
5.1.2) <i>Modellizzazione del terreno</i>	44
5.1.3) <i>Modellizzazione del pozzo</i>	45
5.1.4) <i>Modellizzazione del fluido</i>	49
5.1.5) <i>Modellizzazione della disposizione delle sonde</i>	51
5.1.6) <i>Sistema complessivo di equazioni</i>	53
5.2) Simulazioni con il CaRM	55

6) CONFRONTO TRA IL CARM E UN SOFTWARE DI TIPO COMMERCIALE	77
6.1) Breve descrizione del COMSOL	77
6.2) Descrizione del modello utilizzato nel COMSOL	78
8 0 5 + " " U q p f c " n k d g t c " f k " v k r q " ò 2 ö	80
6.4) Campo di 16 sonde di 100 metri di profondità con interasse di 7 metri	88
7) UTILIZZO DELLE SONDE GEOTERMICHE VERTICALI A DOPPIO TUBO AD U PER IMMAGAZZINARE CALORE RESIDUO NEL TERRENO	93
7.1) Descrizione della modalità operativa	93
9 0 4 + " " E q o r q t v c o g p v q " f k " w p " e c o r q " f k " 3 8 " u q p f g "	
termico scambiato con il terreno	114
7.3) Comportamento di campi geotermici al variare del numero di sonde, a parità di flusso termico scambiato con il terreno	119
7.4) Determinazione dei rapporti ——— e ——— per i profili di richiesta di energia termica in riscaldamento di 4 tipologie di edifici	123
7.5) Analisi del profilo somma	129
9 0 8 + " " E c n e q n q " f g n n c " v g o r g t c v w t c " f ø k p i t g u u q " g c n n ø k p v g t pgeotermiche n g " u q p f g "	131
8) CONSIDERAZIONI DAL PUNTO DI VISTA DEL CONSUMO ENERGETICO	139
8.1) Confronti tra il consumo energetico di diverse soluzioni impiantistiche a parità di g p g t i k c " v g t o k e c " h q t p k v c " c n n ø w v g p c	139
8.1.1) Confronto tra il consumo di energia di una pompa di calore geotermica con COP=3 e con COP=4	142
8.1.2) Confronto tra il consumo di energia di una pompa di calore geotermica utilizzando il primo e il secondo metodo di stoccaggio di calore	144
8.2) Calcolo della potenza della pompa di circolazione del sistema idraulico	146
8.3) Considerazioni relative al consumo energetico in funzione della tipologia di edificio	152

9) ANALISI ECONOMICHE	155
; 0 3 + " " E q p u k f g t c k q p k " t k i w c t f q " c k " e q u v k " f g n n ø t g e w r g t q " f g n n ø k p x g u v k o g p v q " k p k k c n g	155
9.2) E q p u k f g t c k q p k " t k i w c t f q " c k " e q u v k " f g n n ø g p g t t g e w r g t q " f g n n ø k p x g u v k o g p v q " k p k k c n g " e q p u k f g t f g n n ø g p g t i k c " t g u k f w c	157
9.3) Considerazioni di carattere economico in funzione della tipologia di edificio	157
10) TABELLE RIASSUNTIVE	159
CONCLUSIONI	173
BIBLIOGRAFIA	177
SITOGRAFIA	182

INTRODUZIONE

Il tema del consumo energetico è all'ordine del giorno sulla scena politica attuale, in particolare modo dal punto di vista della sostenibilità energetica ha fissato il raggiungimento, da parte dei Paesi membri, di 3 obiettivi principali:

1. la riduzione delle emissioni di gas serra del 20% (o persino del 30%, se le condizioni lo permettono) rispetto al 1990;
2. fonti rinnovabili tali da soddisfare il 20% del fabbisogno energetico;
3. del 20% dell'efficienza energetica.

Ai fini del riscaldamento degli edifici è necessario, quindi, prendere in considerazione delle misure per ridurre il consumo di energia primaria derivante dalla combustione dei combustibili fossili responsabili di importanti problemi ambientali come per esempio l'accumulo dei gas serra, l'inquinamento atmosferico, l'inquinamento idrico, il danneggiamento della superficie terrestre e dello strato di ozono.

A tal proposito, si può pensare di utilizzare il calore residuo proveniente per esempio da processi industriali, termovalorizzatori e centrali a biomasse, per il riscaldamento degli edifici. È chiaro, però, che, anche se il calore di scarto è disponibile in maniera costante e continua durante il corso dell'anno, nel riscaldamento urbano può essere utilizzata solo la quota parte da inviare direttamente agli edifici durante il periodo freddo. Per poter sfruttare al meglio il calore residuo si potrebbe pensare di immagazzinarlo nel periodo caldo per poi renderlo disponibile quando le utenze termiche ne hanno necessità. Nella fattispecie, nel seguente elaborato, si è pensato di utilizzare degli scambiatori di calore verticali a doppio tubo ad U, per immagazzinare tale calore residuo nel terreno. Si realizza così, per il riscaldamento stagionale al terreno. Per mezzo, poi, di opportuni impianti a pompa di calore accoppiati

agli scambiatori di calore al terreno, le cosiddette pompe di calore geotermiche (PDCG) che e q u v k v w k u e un sistema "energeticamente molto efficiente". n ø g p g t i k c " v g t o k nel terreno può essere utilizzata per soddisfare le esigenze di riscaldamento degli edifici.

Nel seguente lavoro, quindi, dopo aver evidenziato quali sono gli aspetti a cui si fa riferimento parlando di geotermia e quali sono le peculiarità delle pompe di calore, soffermandosi in modo particolare sulle pompe di calore geotermiche, u k " h q e c n k | | c " n ø c v v g p | k q p g " terreno, facendo riferimento, in particolare, alle sonde geotermiche verticali (SGV) a doppio tubo ad U.

Inizialmente si lavorerà in input con le temperature del fluido in ingresso alle SGV e, per varie tipologie di campo sonde, si vorrà determinare come cambia il calore accumulato al terreno al x c t k c t g " f g n n ø k p v g t c u u g " v t c " n g " u q p f g . " e k q ³ " f g analisi verrà utilizzato il software CaRM elaborato dal Dipartimento di Ingegneria Industriale f g n n ø W p k x g t u k v « " f k " R c f q x c " g " f g u e t k v v q " è pur g n " f g software finalizzato a simulare il comportamento degli scambiatori di calore al terreno. In particolare, s w g u v q " u v t w o g p v q " h c " t k h g t k o g p v q " c f " w p " sfruttando resistenze termiche e capacità termiche concentrate, nota la temperatura del fluido in ingresso alle SGV, permette di calcolare la temperatura del fluido in uscita dalle sonde, la temperatura del terreno a varie distanze dalle sonde e il flusso termico scambiato tra il campo sonde e il terreno, tenendo conto anche delle interferenze termiche tra le SGV.

A questo punto utilizzando due profili di temp g t c v w t co " si proccede nella verifica del calore accumulato al terreno attraverso tre campi rispettivamente di 16, 32 e 64 sonde al variare f g n n ø k p v g t c u u g 0 " " E q o g " x c n q t k " f k " k p v g t c u u g " u k suggerito da Omer [3], al di u q v v q " f g n " s w c n g " n ø k p v g t h g t g p | c " v diventare significativa. Utilizzando un intervallo temporale di 5 anni, si è quindi determinato qual è k n " e c n q t g " c e e w o w n c v q " c n " v g t t g p q " α di individua pre sg t c u u ampliando la distanza tra le SGV si ottenga o meno un aumento del calore accumulato al terreno.

R g t " x g t k h k e c t g " n ø c v v g p f k d k n k v « " f g k " t k u w n v c v k
CaRM attraverso il confronto con COMSOL, un software commerciale agli elementi finiti. In
particolare, w v k n k | | c p f q " k n " o q f w n q " e j g " v t c v v c " f g n n c " v
si andranno a definire i domini bidimensionali del problema, ovvero i campi di sonde geotermiche,
c x g p f q " n ø c e e q t v e effettuare i confronti con il CaRM finché non si
sulla lunghezza delle sonde.

I campi sonde realizzati in COMSOL avranno chiaramente le stesse caratteristiche geometriche e
termofisiche di quelli utilizzati in CaRM oltre che condizioni al contorno congruenti. Nel dettaglio,
come condizione al contorno sulle tracce dei tubi delle sonde geotermiche verrà assegnato il flusso
termico scambiato dal campo sonde con il terreno, ricavato nel CaRM sulla base di un certo profilo
di temperatura di mandata del fluido termovettore. A questo punto si andranno a confrontare tra
n q t q " n g " v g o r g t c v w t g " c " f k x g t u g " f k u v c p | g " f c n n ø
particolare verrà analizzato dapprima il caso di sonda libera e poi un campo di 16 sonde per
e q p v t q n n c t g " u g c a t r a s o n d e a d i a c e n t i c o m p r i q u a l c h e d i f f e r e n z a
elaborati dai due software.

Nella seconda parte di questo elaborato si lavorerà in termini di flusso termico scambiato tra il
campo sonde e il terreno. Si farà riferimento ai profili di richiesta di energia termica in
riscaldamento di 4 tipologie di edifici (edifici con o senza isolamento termico e con funzionamento
f k u e q p v k p w q " q " e q p r i s c a l d a m e n t o) e a l p r o f i l o c o m b i n a t o c h e p u ò e s s e r e
assunto come caratteristico di una generica area urbana e a una certa potenza termica residua
f k u r q p k d k n g " e q p " e q p v k p w k v « " p g n " e q t u q " f g n n ø c
attraverso un campo di sonde geotermiche verticali a doppio tubo ad U, il calore residuo durante i
r g t k q f k " k p " e w k " p q p " e ø ³ " t k e j k g u v c " f k " g p g t i k c
quando necessario. Si andrà quindi a ricercare qual è la potenza termica massima che può essere
fornita alle utenze tale che il calore che viene immesso al terreno sia bilanciato annualmente dal
calore estratto, in modo da non avere un progressivo riscaldamento o raffreddamento del terreno nel

corso degli anni di funzionamento del sistema. A questo punto si ricercherà qual è la lunghezza totale degli scambiatori di calore al terreno tale da avere una determinata temperatura minima (4°C, 1°C e -5°C) sulle pareti degli scambiatori stessi. Per raggiungere questo obiettivo si eseguiranno delle simulazioni in COMSOL variando il flusso termico in W/m scambiato dal campo sonde con il terreno fino a che non si raggiungeranno le temperature cercate. Quindi, per ciascuna tipologia di edificio analizzato, a partire da una certa disponibilità di potenza termica residua, si cercherà di calore che bisogna utilizzare per realizzare uno stoccaggio di calore stagionale al terreno.

Lavorando quindi su una potenza termica residua di 700 kW e dopo aver ricavato, in funzione del profilo di richiesta termica in riscaldamento, la potenza termica massima e la corrispondente energia termica annuale che primaria del sistema a pompa di calore accoppiato con il campo di sonde geotermiche, che permette di stoccare calore al terreno, e di un impianto a caldaia che sfrutta però anche la quota parte di determinerà dopo quanti anni sarà possibile sistema a PDCG, sulla base del risparmio in termini di consumo annuale di energia primaria rispetto a un impianto a caldaia.

1) GEOTERMIA

Il termine geotermia fa riferimento, in senso stretto, al calore prodotto dal decadimento nucleare delle sostanze radioattive presenti nelle rocce del sottosuolo, anche se ormai è generalmente utilizzato per individuare tutto il calore immagazzinato nel terreno. Il sottosuolo, infatti, può essere usato vantaggiosamente anche come serbatoio di calore. Nei paragrafi che seguono si farà dapprima un breve cenno a quello che è il calore generato dal terreno e si vedrà poi cosa si intende parlando del sottosuolo come serbatoio di calore.

1.1) Calore contenuto nel terreno

Il termine geotermia in senso stretto si riferisce al calore presente nel sottosuolo; la terra, infatti, contiene una notevole quantità di energia termica. Secondo le conoscenze attuali, circa il 99% della sua massa si trova a temperature che superano i 1000 °C, con valori compresi tra 6000 e 6500 °C nel nucleo centrale. Questo calore ha sostanzialmente due origini: quella esterna, costituita dal sole e dalla pioggia, e quella interna, costituita dai processi di decadimento nucleare. Le uniche fonti di calore significative fino a 15 metri di profondità (Figura 1.1).

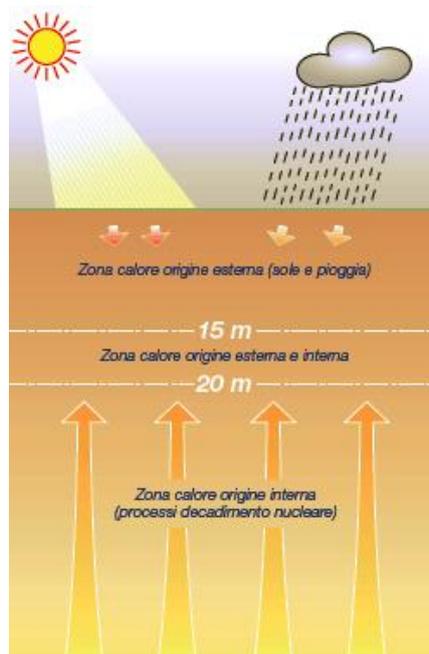


Figura 1.1 Rappresentazione dell'origine interna ed esterna dell'energia geotermica

Il calore geotermico, prodotto dal decadimento nucleare di sostanze radioattive presenti nelle rocce del sottosuolo: in pratica il solo calore che mantiene calda la terra a profondità che superano i 20 m. Ed è questo il solo calore che, in maniera rigorosa, può essere definito geotermico. Tuttavia, anche a livello internazionale, il termine geotermico è ormai generalmente utilizzato per individuare tutto il calore immagazzinato nel sottosuolo.

Il geotermico è una fonte di energia alternativa, utilizzabile ad esempio per produrre energia elettrica, per realizzare processi tecnologici, per riscaldare ambienti e ottenere ACS (acqua calda sanitaria). È comunque una forma di energia che per poter essere utilizzata deve essere portata in superficie. In alcune zone della terra, la natura stessa fornisce i mezzi per convogliare in superficie tale energia: è il caso dei geyser e delle terme. In altri casi, invece, vanno usati sistemi atti a derivare direttamente fluidi caldi in superficie. Il vantaggio di non dipendere dalle condizioni atmosferiche (ad esempio dal sole, vento o maree) e neppure dalle scorte di sostanze combustibili (ad esempio biomasse). È quindi un tipo di energia stabile ed affidabile.

In base alle temperature di possibile utilizzazione, il geotermico si divide in:

- ◁ Geotermico ad alta temperatura (superiore a 180°C) e può essere utilizzata nella produzione di energia elettrica.
- ◁ Geotermico a temperatura intermedia (compresa fra 100 e 180°C); combinata con un fluido secondario più volatile può essere sfruttata per produrre energia elettrica.
- ◁ Geotermico a bassa temperatura (inferiore a 100°C); serve per impieghi industriali e per alimentare stabilimenti termali.
- ◁ Energia geotermica a temperatura molto bassa (inferiore a 30°C). Le sue principali applicazioni riguardano:

1. La temperatura molto bassa è derivata dal terreno con appositi scambiatori di calore. È poi ceduta alle pompe di calore PDC (Figura 1.2), che sono macchine in grado di innalzarne la temperatura fino a valori che rendono possibile sia riscaldare gli edifici sia produrre ACS.
2. La temperatura bassa derivata dal terreno può servire sia ad alimentare PDC che lavorano in fase di raffrescamento, sia a servire direttamente gli impianti di climatizzazione: funzionamento

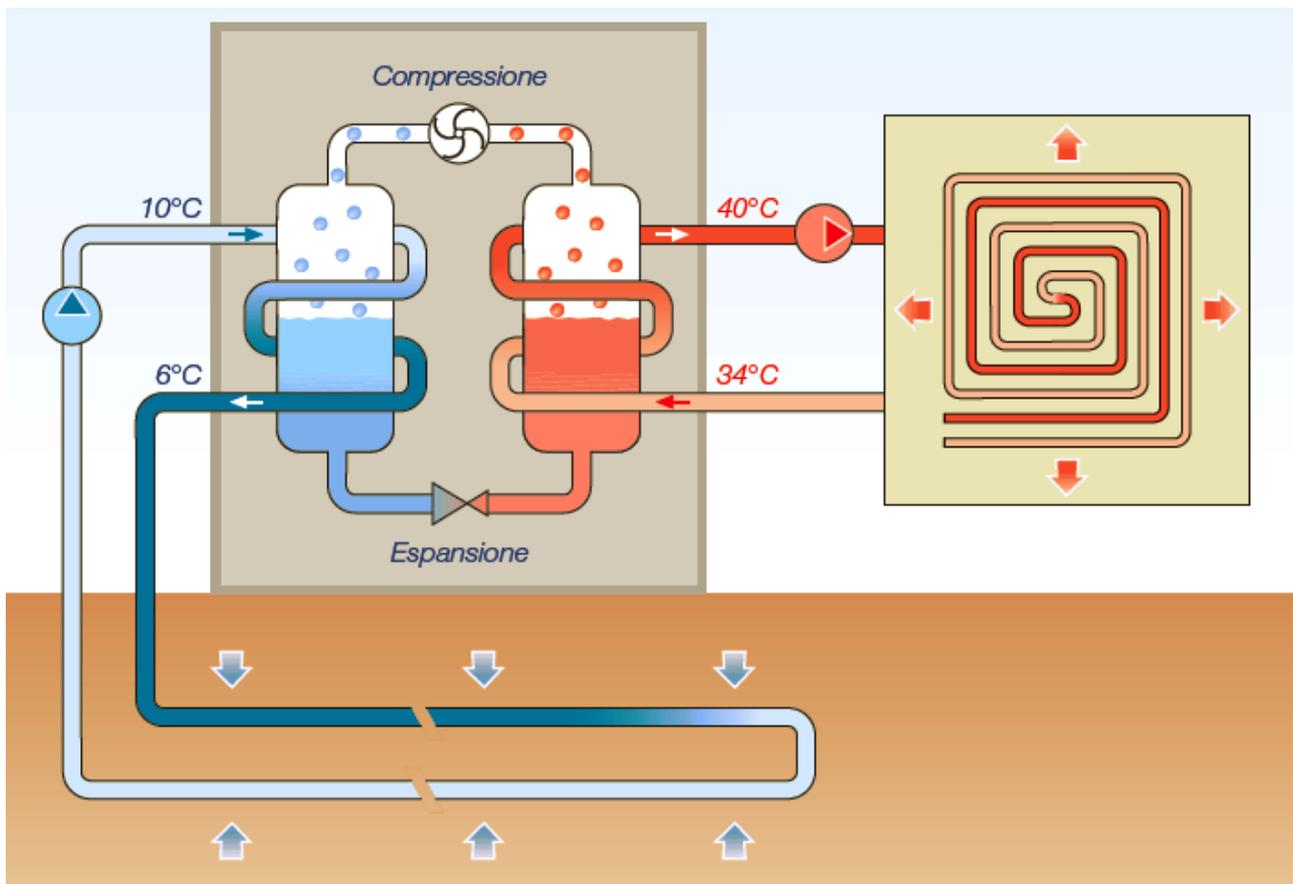


Figura 1.2 Esempio di funzionamento di una pompa di calore geotermica

1.2) Il terreno come serbatoio di calore

Si è detto che il sottosuolo può essere impiegato in maniera vantaggiosa come serbatoio di calore.

Supponendo, infatti, di avere a disposizione una certa potenza termica di scarto proveniente per esempio da processi industriali, termovalorizzatori o centrali a biomasse, ai fini del riscaldamento residenziale sarebbe possibile sfruttarne solo la quota parte da inviare in maniera diretta alle utenze

hanno esigenze di riscaldamento tale potenza termica residua andrebbe persa. Si può, invece, pensare di utilizzare un opportuno scambiatore di calore al terreno per immagazzinare nel poi possibile sfruttare il calore immagazzinato. Si realizza così una sorta di stoccaggio stagionale del calore residuo durante la stagione calda da utilizzare per le esigenze di riscaldamento durante il periodo freddo.

È importante però tener presente che, per preservare il terreno come serbatoio di calore è necessario che, annualmente, il calore estratto dal terreno sia uguale a quello immesso (Li [4]). Questa considerazione rappresenta un aspetto di rilevanza fondamentale al fine di evitare un riscaldamento o raffreddamento del terreno potrebbe essere pericoloso dal punto di vista ambientale.

2) POMPE DI CALORE

La pompa di calore (PDC) non è una scoperta recente, la sua invenzione risale infatti al 1852 ed è attribuita al fisico ed ingegnere britannico William Thomson, poi nominato Lord Kelvin, la cui scoperta e teorie scientifiche. Per la sua industrializzazione ed il relativo sviluppo commerciale è stato tuttavia necessario attendere fin quasi i nostri giorni, quando la crescente popolarità dei sistemi di refrigerazione e di riscaldamento ha senza dubbio fatto da traino alla diffusione di queste macchine. La presenza della pompa di calore in Italia è principalmente legata alla sua possibilità di funzionare per mezzo di un solo dispositivo. Ciò comporta un indubbio vantaggio che, accompagnandosi ai risparmi attesi sui costi di esercizio, possibili grazie alla sua efficienza energetica, la rendono un dispositivo di sicuro interesse per la climatizzazione di buona parte degli edifici situati sul territorio nazionale. Nei paragrafi che seguono, si darà una descrizione delle tipologie di pompe di calore presenti sul mercato, dei vari tipi di sorgenti termiche a cui fanno riferimento, dei vantaggi energetici che è possibile ottenere con queste macchine.

2.1) Pompe di calore a compressione di vapore e ad assorbimento

La pompa di calore è una macchina comunemente usata per la climatizzazione degli ambienti, che è in grado di trasferire il calore da una sorgente a temperatura maggiore a una sorgente a temperatura minore. Questo processo, non essendo spontaneo, richiede un certo apporto energetico, rappresentato da energia elettrica, da combustibile o da calore ad alta temperatura. In modalità riscaldamento (Figura 2.1) la pompa di calore funziona come un frigorifero, trasferendo calore dall'ambiente da riscaldare all'ambiente a temperatura maggiore.

grazie alla possibilità di inversione del ciclo, possono funzionare anche in raffreddamento e in
 s w g u v q " e c u q " k n " e c n q t g " x k g p g " r t g n g x c v q " f c n n ø k p
 o al terreno (Figura 2.2).

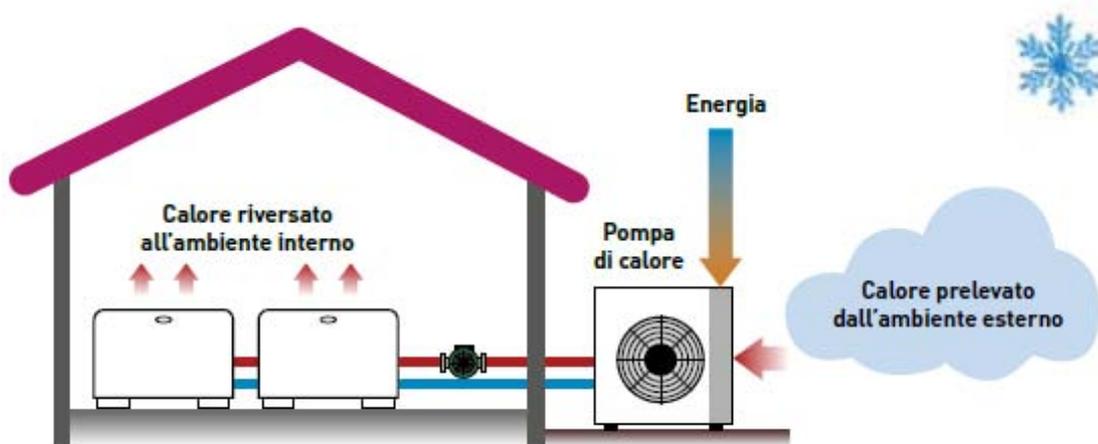


Figura 2.1 Funzionamento invernale di una pompa di calore ad aria

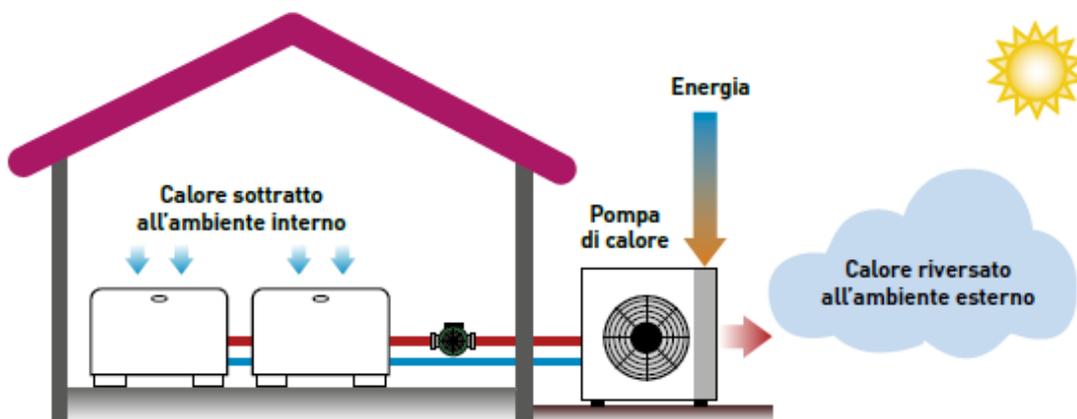


Figura 2.2 Funzionamento estivo di una pompa di calore ad aria

La quasi totalità delle pompe di calore ad oggi in commercio si basa su un ciclo a compressione di vapore o su un ciclo ad assorbimento. La tipologia più diffusa è rappresentata dalle pompe di calore a compressione che sono costituite da quattro componenti principali: il compressore, la valvola di espansione e due scambiatori di calore g " * k n " e q p f g p u c v q t g " g " n ø g x c r q formare un ciclo chiuso percorso da un fluido, detto fluido frigorigeno o refrigerante.

Con riferimento alla Figura 2.3, in una prima fase il refrigerante, allo stato di vapore, viene compresso e portato ad un livello di temperatura e pressione maggiori. Nel condensatore, poi, passa la valvola di laminazione, dove diminuiscono sia la sua pressione che la sua temperatura e si evapora completamente.

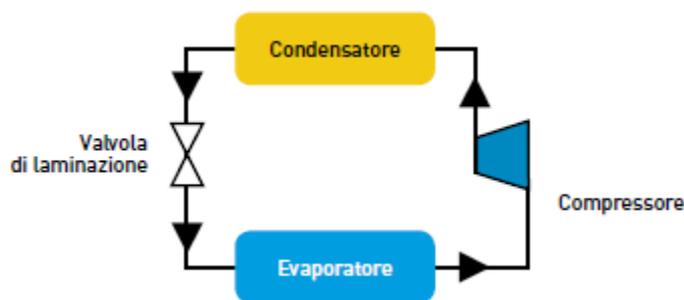


Figura 2.3 Schema di funzionamento di una pompa di calore a compressione

La deficienza di un ciclo a compressione è definita dai seguenti coefficienti:

- funzionamento invernale: $\eta_{c} = \frac{Q_{c}}{L}$
- funzionamento estivo: $\eta_{g} = \frac{Q_{g}}{L}$

In particolari applicazioni, poi, possono essere utilizzati due cicli a compressione posti in cascata, in modo che la temperatura di evaporazione del primo ciclo sia uguale alla temperatura di condensazione del secondo. Macchine di questo genere sono particolarmente adatte per la produzione di acqua calda ad alta temperatura.

Nelle pompe di calore ad assorbimento la fase di compressione è sostituita dal gruppo generatore e assorbitore; il ciclo risulta così costituito da sei fasi percorse da due fluidi: il refrigerante e il liquido assorbitore. Con riferimento alla Figura 2.4, in una prima fase il refrigerante, allo stato di vapore, viene assorbito nel fluido assorbitore con rilascio di energia termica e passa quindi allo stato liquido.

A questo punto la miscela viene pompata nel generatore e portata a un livello maggiore di
 r t g u u k q p g 0 " S w k . " i t c | k g " c n n ø c r r q t v q " g u v g t p q " f k
 separa dal liquido assorbente che, tramite una valvola di laminazione, viene inviato nuovamente
 p g n n ø c u l l u r i f r i g e r a n t e a l l o s t a t o d i " v a p o r e , i n v e c e , p a s s a n e l c o n d e n s a t o r e d o v e r i t o r n a a l l o
 u v c v q " n k s w k f q " e g f g p f q " e c n q t g " c n n ø g u v g t p q 0 " P g n
 la valvola di laminazione dove diminuiscono sia la sua pressione sia la sua temperatura e si
 t r e u h q t o c " r c t | k c n o g p v g " k p " x c r q t g = " k p h k p g . " p
 completamente.

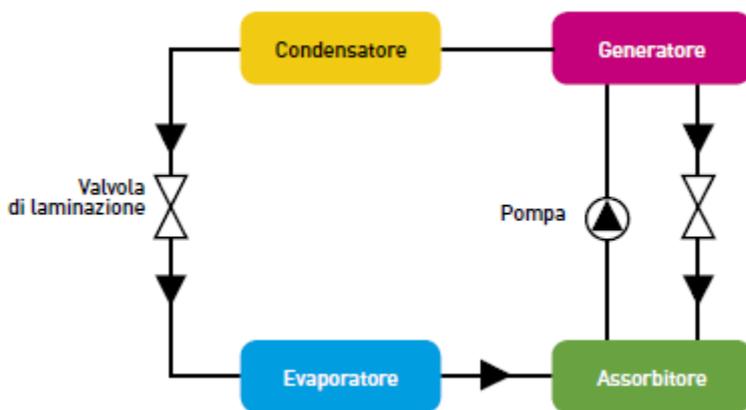


Figura 2.4 Schema di funzionamento di una pompa di calore ad assorbimento

Il coefficiente di rendimento è definito dalle seguenti espressioni:

- funzionamento invernale: $\eta_{h} = \frac{Q_c}{Q_g + L}$ dove GUE_h * Gas Utilization Efficiency è in

riscaldamento) è il rapporto tra Q_c e $Q_g + L$, con Q_c e Q_g in W e L in W .

h q t p k v q " f c e n l a q u a n t i t à d i c a l o r e q g f o r n i t a a l g e n e r a t o r e p i ù i l l a v o r o
 meccanico di pompaggio L;

- funzionamento estivo: $\eta_{c} = \frac{Q_c}{Q_g + L}$ dove GUE_c * Utilization Efficiency è in

raffrescamento) è il rapporto Q_c e $Q_g + L$ e Q_c in W e L in W .

fornita al generatore più il lavoro meccanico di pompaggio L.

Inoltre, per conseguire uno scambio termico adeguato è in genere necessario disporre di superfici e q p u k u v g p v k " g l q " f k " i t c p f k " r q t v c v g t a f e f u n d i f f i c i l e c " g " compromesso tra ingombro della macchina e rumore dei ventilatori.

Le acque di superficie, rappresentate dal mare, dai laghi, dai fiumi e da c n v t k " e q t u k " r t g u g p v c p q " k p " i g p g t c n g " n k x g n n k " f k " v g o r g t c v w t c c n n ø c t k h c t 0 w " k N d c k " n n k q v t « q " 3 " r g t 1/4 " t k u v t g v v c " c n m e g c a s o n q e c n dei fiumi, della variabilità stagionale della portata e della presenza di contaminanti e di solidi in sospensione. Inoltre, nel caso di acque salmastre, il rischio di corrosione implica il ricorso a materiali pregiati per la costruzione degli scambiatori di calore con conseguente aumento del costo degli stessi.

Come descritto nel capitolo precedente, anche il terreno rappresenta una sorgente termica k p v g t g u u c p v g . " k p " i g p g t g " e q p " e c t c v v g t k u v l k e j g " delle acque superficiali. Lo svantaggio principale consiste però, come riporta Hepbasli [5], p g n n ø g n g i n v e s t i m e n t o i n i z i a l e , c h è è a n c h e i l 30-72 " r k Á " c n v q " f k " s w g n aria, a causa dei costi di installazione per interrare gli scambiatori di calore nel sottosuolo. Tuttavia, una volta installato, i costi annuali di esercizio durante la vita del sistema sono inferiori, con conseguente guadagno in termini di costi di funzionamento. Per quanto riguarda le pompe di calore geotermiche, se ne darà una descrizione dettagliata nel §Capitolo 3.

2.3) X c p v c i i k " g p g t i g v k e k " p g n n ø w v k n k | | c t g " n

Il sistema di riscaldamento più comune in Italia è costituito da una caldaia alimentata normalmente c " i c u " e j g " t k u e c n f c " w p " e k t e w k v q " f k " f k u v t k d w | k c caldaia a condensazione che permette di recuperare il calore di condensazione dei fumi, se la v g o r g t c v w t c " f g n n s c a l d a m e n t o è i n f e r i g e n a 55°C. In questo modo è possibile k

realizzare dei rendimenti che possono essere del 105% rispetto al potere calorifico inferiore del metano (pari a circa 9.45 kWh/m³). Un altro sistema semplice è il ricorso a resistenze elettriche che e q p x g t v q p q " n ø g p g t i k c " g n g v v t k e c " k p " v g t o k e c " o g vantaggiosi dal momento che non presentano circolazione di liquido. In questo modo ogni chilowattora elettrico è utilizzato per produrre un chilowattora termico.

Q e e q t t g " v w v v c x k c " e q p u k f g t c t g " e j g " n ø g p g t i k c " g n un metodo per poter equiparare le due forme di energia è ricorrere al concetto di energia primaria. Infatti, occorre sottolineare come la combustione permetta di utilizzare energia primaria f k t g v v c o g p v g 0 " P g n " e c u q " f k " e q p u w o q " f k " g p g t i k c " dalla produzione, trasformazione e distribuzione, che comporta una perdita di energia originaria pari al 54%. N ø g h h k e k g p | c " f g n n c " t g v % g da guin ne deriva che e n c ø " w³ v " k s n w k k | p | f un chilowattora elettrico (kWh_e) corrisponde a circa 2.2 kWh primari (kWh_p).

N ø w v k n k | | q " r g t v c p v q " f k " t g u k u v g p | c o n d e n s a z i o n e c o n t k e j g rendimento 105 %) un consumo pari a 2.31 volte maggiore in termini di energia primaria.

W p " w v k n k | | q " r k Á " g h h k e k g p v g " f g n n ø g c o m p r e s s i o n e . I n g n g v v questo caso si è visto che viene definito coefficiente di prestazione della macchina (COP) il t c r r q t v q " v t c " n ø g p g t i k c " t g u c " c n " e k t e w k v q " f k " macchina. Normalmente è possibile realizzare con una macchina ad aria un COP = 3, mentre con una macchina geotermica un COP = 4.5. Questo significa che per produrre 1 kWh termico occorrono con una pompa di calore ad aria 0.33 kWh_e e con una pompa di calore geotermica 0.22 kWh_e 0 " K p " v g t o k p k " f k " g p g t i k c " r t k o c t k c . " r e r g i a u c p f c elettrica, si consumano 0.73 kWh_p con una pompa di calore ad aria e 0.49 kWh_p con una pompa di calore geotermica. Si vede quindi che rispetto alla soluzione con resistenza elettrica (2.2 kWh_p) e rispetto ad una caldaia a condensazione (0.95 kWh_p) il risparmio può essere rilevante.

2.4) V k r q n q i k g " q v v k o c n k " f k " v g t o k p c n k " f ø k

calore

N g " r q o r g " f k " e c n q t g " t k e j k g f q p q " n ø c e e q r r k c o g p v q
w p ø c n k o g p v c | k q p g . " f w t c p v temperatura non superiore a 40-45°C; g t p c n
ciò, allo scopo di ridurre la temperatura di produzione dell'energia elettrica, si ricorre a
energetico, aumentando il coefficiente di effetto utile della macchina (COP).

2.4.1) *Impianti radianti*

Gli impianti radianti funzionano con acqua a bassa temperatura (25-40°C) e sono pertanto ideali per essere integrati con le pompe di calore. Gli elementi radianti, costituiti da tubi in materiale resistente alle alte temperature ed al calpestio, vengono inseriti sotto il pavimento, nella parete o nel soffitto, a seconda delle esigenze specifiche. La trasmissione del calore avviene principalmente per irraggiamento e non per convezione (come nel caso dei termosifoni). In questo modo si evitano

h c u v k f k q u k " u r q u v c o g p v k " f ø c t k c " g " f k " r q n x g t k " g "
Una tecnologia particolarmente interessante di impianti radianti è quella dei sistemi a massa termica della massa (TABS, Thermo-Active Building Systems), illustrata in Figura 2.5.

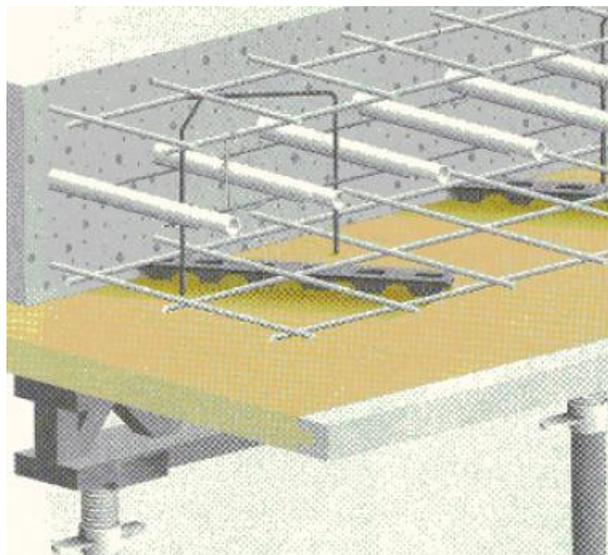


Figura 2.5 Esempio di sistema TABS

Oltre alla possibilità di accoppiamento con le pompe di calore, un aspetto particolarmente interessante di questi sistemi è il cosiddetto **peak shaving** è la possibilità di esso non è occupato (per esempio di notte); durante il giorno le strutture cedono o assorbono calore o rinnovano. Si limita così il picco di potenza con conseguente riduzione della potenza installata (e quindi del costo di impianto) e della potenza elettrica eventualmente impegnata (con possibili conseguenze sulle reti nelle ore di punta e la possibilità di trasferire parte del consumo energetico nelle ore notturne. La Figura 2.6 mostra l'effetto del peak shaving rispetto ad un sistema tradizionale.

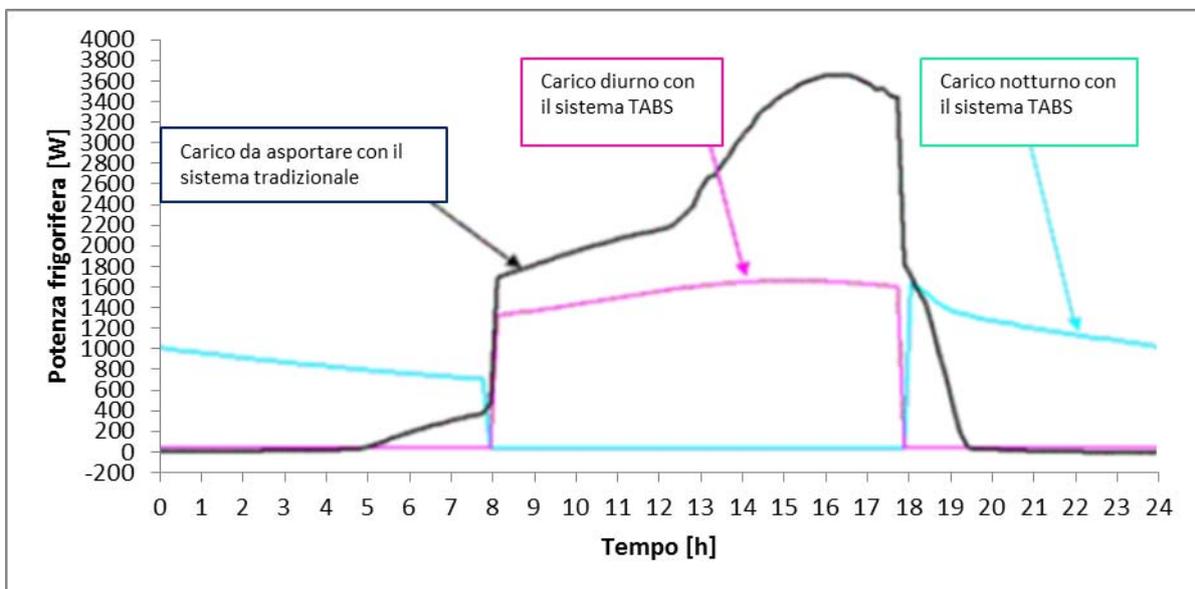


Figura 2.6 Effetto del peak shaving rispetto ad un sistema tradizionale

2.4.2) Impianti con terminali convettivi

Anche gli impianti con terminali di tipo convettivo citano a titolo di esempio i ventilconvettori, le travi attive, le unità termoventilanti e le centrali di ventilconvettori si può osservare quanto segue:

- negli impianti a due tubi il dimensionamento viene effettuato nel caso estivo, pertanto la acqua a temperatura relativamente bassa;
- negli impianti a quattro tubi la batteria fredda risulta di solito costituita da tre ranghi e la batteria calda da un rango, che è pertanto generalmente insufficiente nel caso di impianti a inferiori quanto previsto (50-40°C) si possono tuttavia produrre ventilconvettori con batteria calda a due o tre ranghi (adatti quindi

Una tipologia di trave attiva (Fig. 2.7) è quella a tre ranghi di batterie, con una temperatura di esercizio di 50-40°C. Questa tipologia di trave attiva è adatta per impianti a due tubi e a quattro tubi.



Figura 2.7 Esempio di trave attiva

Per quanto concerne il dimensionamento delle travi attive, usualmente tali terminali sono utilizzati con le seguenti temperature:

- acqua fredda 15/18°C;
- acqua calda 45/55 °C.

Si può notare come le temperature di funzionamento estive siano perfettamente compatibili con n \emptyset c e sigera"protha dalla PDC (tipicamente 7-12 °C, meglio ancora se 8-16 °C per ridurre la r q t v c v c " u w n " e k t e w k v q " u g e q p f c t k q + 0 " X k e g x g t u c " r g n g x c v c 0 " G \emptyset " p g e g u u c t k q " s w in deflokin"bgshalle temperaturede " w p \emptyset c fluidi disponibili, eventualmente sovradimensionando il terminale rispetto a quello che si farebbe con acqua a temperatura più elevata.

3) POMPE DI CALORE GEOTERMICHE

Nonostante le pompe di calore geotermiche (PDCG) forniscano un metodo pulito per il riscaldamento degli edifici, la diffusione nel mercato di questa tecnologia è ancora nella sua fase iniziale, con i combustibili fossili che dominano il mercato del riscaldamento degli edifici e con le pompe di calore aria-aria, che dominano il mercato del raffrescamento. Per quanto riguarda l'impiego di pompe di calore che utilizza sonde geotermiche è stato installato in Grecia, con il supporto tecnico svizzero, nel 1993. Questo sforzo ha portato alla successiva attuazione di un progetto sul campus dell'Università Tecnica Nazionale di Atene, dove la sede di ingegneria mineraria è riscaldata e raffreddata per mezzo di pompe di calore geotermiche, che combina un sistema ibrido di acque sotterranee e sonde geotermiche.

Le pompe di calore geotermiche sono essenzialmente una combinazione di una pompa di calore e di un sistema di scambio di calore con il terreno. Il calore può essere estratto dal terreno utilizzando un pozzo (sistema a circuito aperto), oppure utilizzando sistemi a circuito chiuso per mezzo di sonde geotermiche verticali, sonde geotermiche orizzontali o di gallerie, ovvero pali di fondazione dotati di scambiatori di calore. Proprio la realizzazione degli scambiatori di calore al terreno rappresenta il principale aspetto negativo degli impianti a PDCG. Infatti gli elevati costi delle perforazioni nel terreno, comportano elevati costi di investimento. Una proficua alternativa (Kohl [7]), di utilizzare pozzi già esistenti, realizzati per esempio per applicazioni petrolifere, che poi sono stati abbandonati. In questo caso si potrebbe utilizzare questi pozzi per scopi di scambio di calore, sostenendo così solamente i costi di pulizia dei pozzi e di conversione degli stessi in sonde geotermiche, risparmiando gli esosi costi di perforazione. Il costo di investimento viene però mitigato dai bassi costi di manutenzione oltre al risparmio in termini di consumo energetico che questa tipologia di sistemi permette di realizzare. Inoltre, proprio per il

fatto che le pompe di calore consumano meno in termini di energia primaria rispetto ai convenzionali sistemi di riscaldamento (le PDCG consumano fino al 75% di energia elettrica in meno dei sistemi di riscaldamento e raffrescamento convenzionali), questa tecnologia rappresenta un modo ecologico ed ecosostenibile di fornire energia termica.

Le PDCG utilizzano il terreno come una fonte di calore durante il funzionamento in riscaldamento, con un fluido (tipicamente acqua o acqua in miscela con anticongelanti) che funge da termovettore.

Il vantaggio delle PDCG, rispetto alle pompe di calore ad aria che utilizzano l'atmosfera come serbatoio di calore, deriva principalmente dal fatto che il terreno è influenzato in maniera molto esigua dalle variazioni climatiche ambientali e permette così alla PDCG di lavorare in condizioni praticamente costanti. Questo comporta che attualmente, per ogni kWh termico fornito, le PDCG richiedano 0.22-0.35 kWh di energia elettrica, che è inferiore del 30-50% rispetto al consumo di energia stagionale delle pompe di calore ad aria. Le PDCG costituiscono, così, un modo efficiente di fornire energia termica a molte applicazioni, utilizzando una sorgente di calore rinnovabile, disponibile ovunque e costante. Il terreno, inoltre, può essere utilizzato come un serbatoio nel quale immagazzinare il calore di scarto proveniente da alcuni processi industriali, da sistemi di raffreddamento (per esempio magazzini frigoriferi o palazzetti del ghiaccio), da sistemi di

Come visto nei capitoli precedenti, il rapporto tra energia utile e il consumo di energia elettrica di una pompa di calore a determinate condizioni operative è definito come Coefficient of Performance o COP. Nelle PDCG il COP dipende dalla temperatura dell'acqua in ingresso al

circuito al terreno, dalle condizioni geologiche (parametri termici e idraulici del terreno, regolazione climatica) e da parametri tecnici (lunghezza e tipo di scambiatore di calore a terra, materiale). Altri fattori che influenzano il COP della pompa di calore sono il carico di riscaldamento/raffreddamento, il tipo di sistema di riscaldamento/

Anche se il COP massimo delle pompe di calore geotermiche esistenti è di circa 4.5, il loro COP medio durante il funzionamento è inferiore. Questo COP medio, di solito chiamato "Seasonal R g t h q t o c p (SPF)", è definito come il COP medio durante il funzionamento e varia intorno a $SPF = 3.0-3.8$. Dove vengono applicati elevati standard di efficienza sia per la pompa di calore i g q v g t o k e c " e j p s o n o g a g g l u n g e r e S P F k 4 h k e k q

Per andare a dimensionare le pompe di calore geotermiche è necessario conoscere le caratteristiche del terreno. A tale scopo a partire da metà degli anni 90 è stato sviluppato, in Svezia e negli Stati Uniti, il TRT o Thermal Response Test (§Capitolo 4), che determina le caratteristiche termiche del sottosuolo. In un TRT un carico termico definito viene fornito alle sonde di calore e vengono valutate le conseguenti variazioni di temperatura del fluido termovettore.

Nei paragrafi seguenti si darà una descrizione delle varie tipologie di circuiti che caratterizzano i sistemi a pompa di calore geotermica. La distinzione è tra quei sistemi in cui come fluido termovettore si utilizza acqua di pozzo o di superficie e che costituiscono i circuiti di tipo aperto e i u k u v g o k " c " e k t e w k v q " e j k w u q . " k p " e w k " k n " h n w k f q " (sonde orizzontali o verticali).

3.1) Sistemi a circuito aperto

P g k " u k u v g o k " c " e di pozzo (Figura 3.1) o di superficie (Figura 3.2) è utilizzata come vettore termico, e porta direttamente il calore alla pompa di calore.

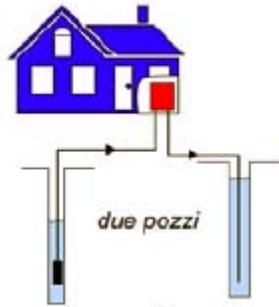


Figura 3.1 Un sistema a circuito chiuso che utilizza acqua di pozzo. L'acqua viene prelevata dal pozzo di carico e viene rimessa nel terreno attraverso un secondo pozzo, il pozzo di scarico



Figura 3.2 Schema di PDCG a circuito aperto che utilizza acqua di lago, di fiume o di falda come fluido termovettore

Wp q " f g i n k " c u r g v v k " r t k p e k r c n k " f k " e w k " v g p g t " e q p
 K p h c v v k " n q " u e c o d k c v q t g " f k " e c n q t g " v t c " n ø c e s w c
 corrosione e ciò può portare al blocco dello scambiatore stesso. Un altro aspetto importante è che
 sono necessarie grandi quantità di acqua e s w g u v q " h c v v q " f g v g t o k p c " n c " p g
 f g n n c " r q o r c " f k " e k t e q n c | k e s p e r i n v i a t a n u o v a m e n t e a l " t e r r e n o " u e c t
 attraverso pozzi di scarico oppure scaricata in laghi o fiumi. A tal proposito i codici e regolamenti
 n q e c n k " t k i w c t f q " n ø c o d k g p v g " r q u u q p q " k p h n w g p | c t
 Il principale vantaggio di questa tipologia di circuiti è che present c " e q u v k " f ø k p x g u v k c
 rispetto a quelli dei sistemi a circuito chiuso, proprio perché vengono meno i costi di perforazione
 del terreno, o n v t g " c n " h c v v q " e j g " p q p " e ø ³ " d k u q i p q " f k " t k e
 n ø c e s w c " s c a m b i a t o r e d i r e t t a m e n t e " a l

3.2) Sistemi a circuito chiuso

Nei sistemi chiusi gli scambiatori di calore si trovano nel sottosuolo e un fluido termovettore circola al loro interno trasferendo il calore dal terreno alla pompa di calore e viceversa. A seconda della tipologia del sistema di scambio di calore con il terreno i sistemi a circuito chiuso si distinguono in sistemi con sonde geotermiche orizzontali e sistemi con sonde geotermiche verticali.

3.2.1) *Sistemi a circuito chiuso con sonde geotermiche orizzontali*

I sistemi a circuito chiuso più semplici da installare sono le sonde geotermiche orizzontali (Figura 3.3) in cui le tubazioni messe in opera nel terreno sono installate a qualche metro di profondità con uno sviluppo prettamente orizzontale.

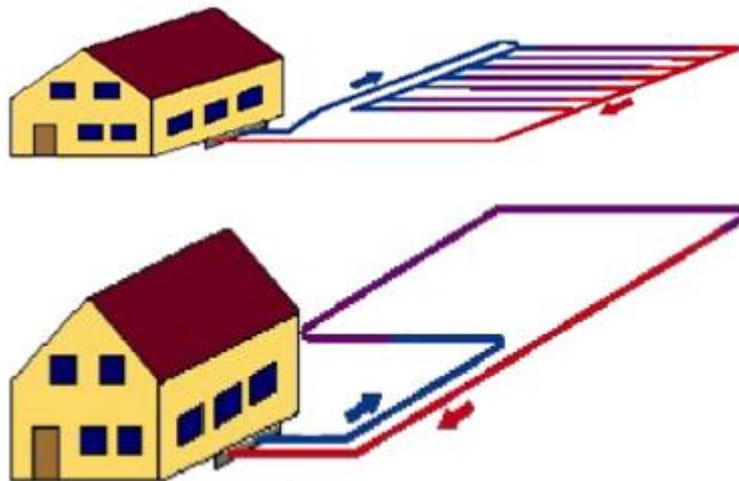


Figura 3.3 Esempi di circuiti a terra orizzontali

I sistemi a circuito orizzontale possono essere interrati sotto prati, giardini e parcheggi e tendono ad avere una profondità di posa inferiore, da un lato determina una maggiore flessibilità di installazione, dall'altro lato, però, i sistemi a circuito orizzontale richiedono ampie superfici di terreno e sono maggiormente soggetti alla variabilità climatica stagionale, dal momento che lo scambio di calore avviene con gli strati più superficiali del terreno: le proprietà e la temperatura del terreno in superficie variano,

infatti, con la stagione e la piovosità (ad esempio il suolo è più secco e ha temperature più elevate in
w p c " i k q t p odeggiata p f u t o s t o c h e i n u n g g i o r n a t a i n v e r n a l e p i o v o s a).

Una tipologia particolare di PDCG a sonde orizzontali è quella ad espansione diretta, nella quale il
fluido refrigerante della pompa di calore circola direttamente c n n ø k p v g t p q " f i n g k " v v
sostanza, n ø g x c r q t c v q t g " u k " g u v g p f g " Q u e s t a t e c n o l o g i a p e r m e t t e , g " c n r
così, di evitare lo scambio termico tra il fluido refrigerante e il fluido termovettore dal momento che
il fluido refrigerante della pompa di calore scambia calore direttamente con il terreno, permettendo
in questa maniera di raggiungere efficienze più elevate = " f ø c n v t q " e c p v q " r g t ¼ .
questa tecnologia presenta il rischio che il terreno venga contaminato dal fluido refrigerante.

3.2.2) Sistemi chiusi a circuito verticale

La temperatura del terreno al di sotto di una certa profondità (circa 20 m) rimane costante durante
n ø c p p q 0 " K n " h c v v q " f k " u h t w v v c t g " u v t c v k " f g n " v g t
ambientali e la n g e g u u k v « " f k " e q p v g p g t g " n c " u w r g t h k e , k g " f k
così, n ø w v k i s c a m b i a t o r i d i c a l o r e v e r t i c a l i d e t t i a n c h e s o n d e g e o t e r m i c h e v e r t i c a l i (S G V).
Prima di tutto vengono scavati nel terreno dei pozzi verticali tipicamente con un diametro di
75-150 mm. C n n ø k p v g t p q " f k " s w g u o s c a m b i a t o r e d i c a l o r e " v e r t i c a l e " r q k "
che di solito consiste in un tubo in plastica (solitamente polipropilene o polietilene) a singola o a
doppia U. Infine il pozzo deve essere riempito interamente con un materiale speciale, per favorire
un contatto termico ottimale tra i tubi dello scambiatore di calore e il terreno. È importante evitare
n ø k p i t g u u q " c h e i n f i n e i n i p o t r e b b e r o p r o v o c a r e u n a s i g n i f i c a t i v a r e s i s t e n z a t e r m i c a
tra lo scambiatore di calore e il terreno.

Il materiale di riempimento deve avere buona conduttività termica e resistenza strutturale a
temperature maggiori di 100°C, deve essere facile da maneggiare, deve presentarsi allo stato liquido
f w t c p v g " n ø k p k g | k q p g " o g p v t g " f w t c p v g " k e s s e r e p | k q
k p p q e w q " r g t " n o n c i o d e r e g n i s c h i d i i n q u i n a m e n t o . f c "

Khol [7] ha dimostrato che i materiali favorevoli sono sospensioni acquose di bentonite (materiale argilloso), cemento e sabbia. Tali sospensioni acquose sono mantenute in movimento. Arrestato il movimento, il materiale si indurisce e assume una consistenza gelatinosa in poche ore. Reuss [8] mostra come la conducibilità termica, che è la proprietà più importante, aumenti leggermente con la temperatura. In particolare per una miscela di acqua (>50%) e sabbia di silice (circa 30%) la conducibilità termica a temperatura ambiente vale $\lambda = 0,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Inoltre, la lunghezza di una sonda geotermica può essere ridotta usando un terreno sabbioso o bentonite termicamente migliorata, al posto della bentonite comune. In particolare conclude che l'utilizzo di materiali con caratteristiche termiche avanzate potrebbe consentire di ridurre la lunghezza delle sonde geotermiche del 15- 20%.

Solitamente si prende in considerazione la soluzione con sonde verticali quando la superficie di terreno disponibile è limitata. I pozzi sono scavati a profondità comprese tipicamente tra i 20 e 202 m tra loro non inferiore ai 4 m per evitare problemi di cortocircuito termico ed è, inoltre, necessario prevedere un opportuno collettore che permetta di collegare le sonde alla pompa di calore (Figura 3.4).

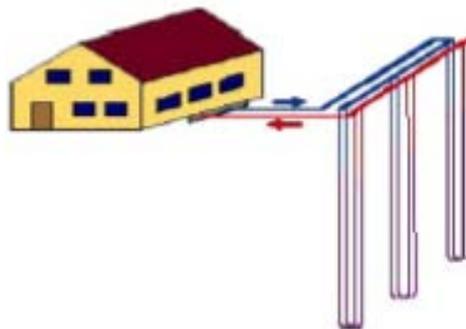


Figura 3.4 Esempio di impianto con sonde verticali a doppio tubo ad U

Ricapitolando, i principali vantaggi delle SGV sono che richiedono una lunghezza complessiva dei tubi inferiore della maggior parte dei sistemi a circuito chiuso, che necessitano di minore energia di pompaggio rispetto alle sonde orizzontali, che hanno bisogno di una superficie di terreno limitata e che funzionano con temperature del terreno che non sono sensibili alle variazioni stagionali. Il principale aspetto negativo, invece, consiste nel fatto che la perforazione dei pozzi è più costosa rispetto alla realizzazione degli scavi orizzontali.

Ci sono diverse tipologie di sonde geotermiche verticali utilizzate:

- Le SGV con tubo ad U (Figura 3.5), che consistono in un paio di tubi verticali collegati da una curva a 180° nella parte finale del pozzo.

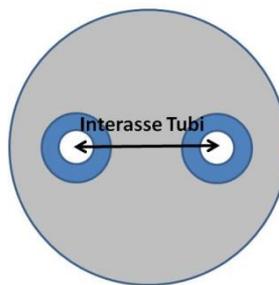


Figura 3.5 Sonda geotermica verticale a singolo tubo ad U

- Le SGV con doppio tubo ad U (Figura 3.6), che costituiscono la soluzione più utilizzata e che r t g x g f q p q " n ø k p u v c n n c | k q p g " c n n ø k p v g t p q " f g

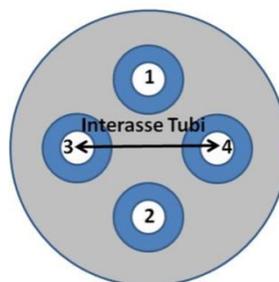


Figura 3.6 Sonda geotermica verticale a doppio tubo ad U: 1 e 2 sono tubi opposti, mentre 1 e 3 sono tubi adiacenti

- Le SGV a tubi coassiali (Figura 3.7), che prevedono due tubi verticali di diverso diametro

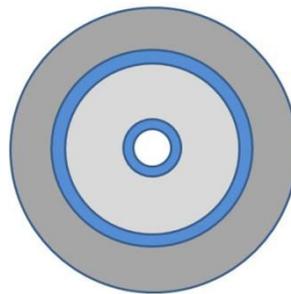


Figura 3.7 Sonda geotermica verticale a tubi coassiali

- Le SGV elicoidali (Figura 3.8) che consistono sostanzialmente in un tubo che prevede un tratto rettilineo (il tubo interno) e un tratto avvolto a spirale (il tubo elicoidale).

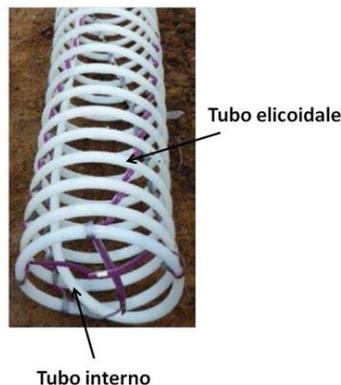


Figura 3.8 Sonda geotermica verticale di tipo elicoidale

Le più comuni sono quelle realizzate inserendo uno o due tubi a U in polietilene in pozzi verticali. I pozzi devono poi essere stuccati per ottenere una migliore conducibilità termica e per evitare contaminazioni da parte delle acque sotterranee. La realizzazione di base delle sonde geotermiche verticali a doppia U consiste di due tubi ad U immessi in un pozzo e poi collegati tra loro in serie o in parallelo. È evidente che la configurazione con doppio tubo ad U fornisce maggiore superficie di scambio termico tra il fluido e il terreno rispetto alla configurazione con singolo tubo ad U e riduce la resistenza termica del pozzo. Zeng [9] dimostra, infatti, che le sonde con singolo tubo ad U

hanno una resistenza termica notevolmente superiore (tra il 30 % al 90 %) rispetto alle sonde con doppio tubo ad U. In particolare Li [10] mostra come il flusso termico scambiato con il terreno dalla configurazione a singolo tubo ad U sia quasi del 50% più bassa rispetto al tubo a doppia U nella modalità emissione di calore, e del 45% in modalità estrazione di calore e che le sonde con doppio tubo ad U con configurazione in parallelo forniscono migliori prestazioni termiche rispetto alle configurazioni in serie.

K p q n v t g . " n c " t g u k u v g p | c " v g t o k e c " f g n " r q | | q " f k o k
due gambi del tubo ad U. Ciò è facilmente comprensibile , perché l'aumento della distanza tra i
gambi è favorevole per la conduzione termica tra i tubi e la parete del foro, mentre allevia
l'interferenza termica tra i gambi del tubo ad U.

W p ø c n v g t p c v k x c " c n m o l e ' s o n d e p e r t i g a l l i i n c l i n a t e v A t a l p o z z i v e r t i c a l i C u i p e r t i g a l l i n k " u q
fornisce u p " c n i q t k v o q " r t c v k e q " r d e l l e P D C G c o m p o n d e i n g l i n a t e . c I l k q p g
vantaggio della configurazione a pozzi inclinati, rispetto a quella a pozzi verticali, consiste nella
possibilità f k " t k f w t t g " n g " f k o g p u k i n s p a l l a z i o n e d e g l i " s c a m b i a t o r i g d p q " t k
calore al terreno, aspetto di notevole interesse in particolar modo nelle aree densamente abitate.

4) ASPETTI GEOLOGICI

Uno degli argomenti più importanti nella progettazione di pompe di calore geotermiche è costituito dagli aspetti geologici del sottosuolo.

La distribuzione della temperatura nel terreno è influenzata dai seguenti fattori:

- a) La struttura e le proprietà fisiche del terreno
- b) La copertura della superficie del terreno (per esempio terra nuda, erba, neve)
- c) $N g " k p v g t c | k q p k " e n k o c v k e j g " f g v g t o k p c v g " f c n n$
 $u q n c t g . " f c n n \emptyset w o k f k v \ll " f g n n \emptyset c t k c " g " f c n n c " r k q$

Dal punto di vista della distribuzione di temperatura, si possono distinguere 3 zone nel terreno:

1. una zona superficiale (che raggiunge una profondità di circa 1 m) nella quale la temperatura del terreno è molto sensibile alle variazioni climatiche nel breve periodo;
2. una zona poco profonda che si estende dalla profondità di circa 1-8 m (per terreni secchi) o di 20 m (per terreni sabbiosi umidi) dove la temperatura è quasi costante: in questa zona la distribuzione di temperatura dipende principalmente dal ciclo climatico stagionale;
3. una zona profonda (sotto circa 8-20 m), dove la temperatura del terreno è praticamente costante .

Le prime due zone (sopra ai 20 m di profondità) costituiscono uno strato instabile dal punto di vista termico e tale strato viene prevalentemente sfruttato con sistemi di scambio orizzontali. La terza zona (sotto i 20 m di profondità) rappresenta invece uno strato termicamente stabile ed è prevalentemente sfruttato con sistemi di scambio verticali.

Quindi, lo strato termicamente instabile è la porzione di terreno in cui la temperatura è variabile, prevalentemente influenzata dalle fluttuazioni climatiche atmosferiche, mentre lo strato termicamente stabile è la porzione di terreno la cui temperatura non è influenzata dalle fluttuazioni climatiche, ma dipende principalmente dal flusso geotermico e dalla presenza di falde sotterranee.

In entrambi gli strati le condizioni termiche del terreno sono alterate dalla presenza di acqua di falda, la quale, in funzione della sua velocità di scorrimento nel terreno, generalmente influisce sulla capacità di scambio del campo geotermico e sulla capacità di accumulo di energia.

Per calcolare la distribuzione di temperatura nel terreno sono disponibili in letteratura alcune formulazioni di tipo analitico come per esempio la formula di Baggs (Popiel [12]):

$$T_m - T_s = \frac{A_s}{k_p} \left(1 - e^{-k_p z} \right) \quad (4.1)$$

dove T_m [°C] è la temperatura media annuale del terreno, T_s [°C] è il differenziale di temperatura del terreno, k_v il coefficiente di vegetazione ($k_v=1$ se la superficie del terreno è completamente libera mentre vale $k_v=0.22$ se non è coperta dalla vegetazione), A_s [°C]

è la differenza di temperatura tra la temperatura della superficie, a [m²/s] la diffusività termica media annuale del terreno indisturbato, t il tempo in giorni

e t_0 il tempo di ritardo della temperatura della superficie.

La temperatura dello strato termicamente stabile può, però, essere calcolata molto più semplicemente assumendola coincidente alla temperatura esterna T_m . Bisogna però tenere conto del fatto che il valore di temperatura nello strato stabile cresce in funzione della profondità in ragione di un gradiente termico pari a 0.03 °C/m (ovvero ogni 100 m di profondità si ha un aumento di temperatura di 3°C).

Lo scambio di calore tra la sonda geotermica verticale e il terreno adiacente avviene principalmente

per conduzione. Pertanto, le proprietà del suolo, come la diffusività termica e il coefficiente di scambio termico, devono essere conosciute o stimate per prevedere il comportamento termico della sonda geotermica. Tali caratteristiche termofisiche del terreno

possono essere determinate mediante i coefficienti di scambio termico $h_{i,p}$ e $h_{i,g}$ e la resistenza termica $R_{t,g}$ di calore attraverso un test di risposta termica (il cosiddetto TRT).

4.1) Test di Risposta Termica

Il Test di Risposta Termica (TRT) del terreno è una metodologia sperimentale finalizzata alla determinazione in situ delle proprietà termofisiche fondamentali del terreno e dello scambiatore a terreno, necessarie per un accurato dimensionamento degli stessi. Il TRT consente infatti di determinare la conduttività termica equivalente λ_g del terreno, la temperatura del terreno $T_{g,0}$ e la resistenza termica per unità di lunghezza R_b di uno scambiatore a terreno di tipo x in un dato contesto del terreno, del materiale di riempimento e del materiale della tubazione.

La procedura standard di un TRT prevede:

- ◁ il sistema sperimentale, comprensivo di un generatore termico/frigorifero e di un circolatore;
- ◁ la circolazione forzata del fluido termovettore nello scambiatore a terreno e la contestuale misura della sua temperatura media fino al raggiungimento dell'equilibrio termico con il terreno circostante;
- ◁ la circolazione nello scambiatore di calore di un fluido termovettore riscaldato/raffreddato dal generatore;
- ◁ la misura della temperatura del fluido termovettore allo scambiatore a terreno;
- ◁ la misura della temperatura $T_{g,0}$ del terreno con un opportuno modo fisico.

Le misurazioni fornite dal TRT forniscono un dato aggregato che tiene conto dell'eventuale presenza di acqua di falda in movimento, qualora la velocità della falda non determini fenomeni convettivi rilevanti. I risultati del TRT devono, poi, essere utilizzati per verificare la resa termica dello scambiatore di calore ai fini della verifica del progetto. E' pertanto uno strumento di progettazione e la sua esecuzione è particolarmente rilevante qualora le caratteristiche termofisiche del terreno e le particolari condizioni di utilizzo dello stesso siano tali da suggerire indagini approfondite.

5) ANALISI COL CaRM

Il lavoro con strati del sottosuolo termicamente stabili e di ridurre la superficie di terreno occupata dal campo sonde. Inoltre si è visto come una soluzione particolarmente vantaggiosa sotto il profilo dei costi. Nei prossimi capitoli, si farà così riferimento a SGV a doppio tubo ad U di geometria standard. Nel dettaglio, in questo capitolo utilizzando come input le temperature del fluido in ingresso alle SGV e per varie tipologie di campo sonde con disposizione matriciale si vuole determinare come cambia il coefficiente di scambio termico tra le sonde, cioè al variare della distanza tra gli assi di sonde adiacenti. Per queste analisi verrà utilizzato il software CaRM elaborato dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova. In questo capitolo verrà presentata una descrizione del CaRM, sintesi di quanto riportato in De Carli [1] e Zarrella [2].

5.1) Descrizione del CaRM

Il CaRM è un software elaborato dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova finalizzato a simulare il comportamento degli scambiatori di calore al terreno. Questo software è stato denominato CaRM (Capacity Resistance Model). Nota la temperatura di mandata del fluido termovettore in uno scambiatore al terreno verticale a doppio tubo ad U, il CaRM, sfruttando le resistenze termiche e capacità termiche concentrate, permette di calcolare la temperatura del fluido in uscita dalle sonde, la temperatura del terreno a varie distanze dalla sonda e il flusso termico scambiato tra il campo sonde e il terreno, tenendo conto anche delle interferenze termiche tra le sonde.

Il modello matematico che sta alla base del CaRM, viene descritto in De Carli [1] e Zarrella [2]; di seguito se ne riporta una sintesi.

5.1.1) Modello matematico su cui si basa il CaRM

Il modello matematico che sta alla base del CaRM, viene descritto in De Carli [1] e Zarrella [2]; di seguito se ne riporta una sintesi.

$$q = -k \frac{dT}{dx} \tag{5.1}$$

dove α è la diffusività termica del mezzo fisico soggetto allo scambio termico ($\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$, k e c_p sono rispettivamente la conduttività termica, la densità e il calore specifico del mezzo fisico). Per un solido privo di capacità di accumulo termico, omogeneo e con proprietà termiche costanti, il flusso termico q dalla generica superficie 1 alla generica superficie 2, rispettivamente alle temperature T_1 e T_2 , può essere scritto utilizzando la resistenza termica

$$R_{t,1-2} = \frac{T_1 - T_2}{q} \tag{5.2}$$

Un tipico problema stazionario è la conduzione di calore attraverso la parete di un tubo cilindrico, che può essere risolto attraverso la relazione:

$$R_{t,cilindrico} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k} \tag{5.3}$$

dove L è la lunghezza del cilindro, r_1 e r_2 sono rispettivamente il raggio interno e il raggio esterno del tubo. Se il corpo può immagazzinare calore, trascurando gradienti di temperatura all'interno del

$$R_{t,sfera} = \frac{1}{4\pi k} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \tag{5.4}$$

dove C_p è la capacità termica del corpo (ρ , c_p e V sono rispettivamente la densità, il calore specifico e il volume del corpo). $R_{g,t} = \frac{f_k u_e t g v k}{|c_t|}$ $f_k h h g t g p | k c n g " f g n n c " e q p f w | k q p g " v g t o k e c . " r w^{1/4}$

Facendo riferimento alla Figura 5.1, e applicando il bilancio di energia al volume di controllo del nodo i - g $u k o q . " n 5.4$ può essere scritta come:

$$\text{---} \tag{5.5}$$

In termini $f_k " r c u u k " v g o r q t c 5.5$ diventa $k v k " . " n \emptyset g s w c | k q p g$

$$\text{---} \tag{5.6}$$

dove R è la resistenza termica tra i nodi e $T(i)$ è $n c " v g o r g t c v w t$ -esimo $f a l g n n \emptyset g$ precedente step temporale. Con questa analisi, si può calcolare la temperatura in ogni punto e in $q i p k " k u v c p v g " c n n \emptyset k p v g t p q " f g n " e q t r q " c p c n k | | c v q$

Figura 5.1 Volume di controllo per lo scambio di calore per conduzione, monodimensionale

5.1.2) Modellizzazione del terreno

Nel CaRM lo scambio di calore nel terreno avviene solamente per conduzione. Viene quindi trascurato lo scambio di calore che avviene per convezione a seguito del movimento delle acque di stoccaggio del calore. Lo spazio tra i tubi dello scambiatore di calore e le pareti della sonda, solitamente, è riempito con un materiale adatto a incrementare il contatto termico tra il fluido temporale della simulazione è relativamente breve e fa riferimento ad un flusso termico che varia nel tempo.

Il terreno è composto di diverse sotto-regioni, ognuna delle quali è caratterizzata da proprietà termofisiche differenti, determinate principalmente dalla composizione minerale, dalla porosità e riferimento alla cosiddetta conduttività termica equivalente del terreno che può essere determinata attraverso un thermal response test (§Capitolo 4).

Lo strato di terreno più superficiale è influenzato dai cambiamenti delle condizioni climatiche. Tale solitamente la profondità delle sonde geotermiche verticali è di circa 100 metri, la sua influenza può essere considerata trascurabile; se invece la profondità è maggiore, tale disturbo non può essere ignorato. Nel CaRM, il flusso di calore tra il fluido nella prima parte del pozzo è trascurato. È trascurato anche lo scambio di calore tra il fluido all'interno della parte più bassa del pozzo e il terreno sottostante la sua estremità.

Il modello utilizzato fa riferimento ad una sonda geotermica verticale a doppio tubo ad U. Ai fini del modello, lo scambio di calore in direzione verticale tra due sezioni sovrapposte non è preso in considerazione (è considerato solo il flusso termico lungo la direzione radiale). Quindi la

$U_{q,v} = \frac{1}{\frac{1}{C_{j,i}} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_i} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_{i-1}} + \frac{1}{C_{j,i}}}$

$U_{q,v} = \frac{1}{\frac{1}{C_{j,i}} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_i} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_{i-1}} + \frac{1}{C_{j,i}}}$

anulare del generico j-esimo strato di terreno può essere scritta la seguente equazione:

$$\frac{1}{U_{q,v}} = \frac{1}{C_{j,i}} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_i} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_{i-1}} + \frac{1}{C_{j,i}} \quad (5.7)$$

dove, facendo riferimento alla i-esima regione anulare e alla j-esima sezione: $C_{j,i}$ è la capacità

termica, $R_{j,i}$ è la resistenza termica tra due regioni anulari adiacenti, $T_{j,i}$ è la temperatura media

$C_{j,i} = \frac{1}{\frac{1}{C_{j,i}} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_i} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_{i-1}} + \frac{1}{C_{j,i}}}$

termica viene utilizzata la seguente equazione:

$$\frac{1}{U_{q,v}} = \frac{1}{C_{j,i}} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_i} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_{i-1}} + \frac{1}{C_{j,i}} \quad (5.8)$$

dove, facendo riferimento alla regione anulare, r_i e r_{i-1} sono i raggi e

$r_i = \frac{1}{\frac{1}{C_{j,i}} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_i} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_{i-1}} + \frac{1}{C_{j,i}}}$

anulare è concentrata nel raggio baricentrico che è equivalente a:

$$\frac{1}{U_{q,v}} = \frac{1}{C_{j,i}} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_i} + \frac{R_{j,i}}{2\pi r_{i-1}} + \frac{1}{C_{j,i}} \quad (5.9)$$

I valori delle resistenze $R_{j,i}$ sono calcolate

(5.9).

5.1.3) Modellizzazione del pozzo

Lo scambio di calore tra le pareti dei tubi ad U e la parete del pozzo dipende dal numero dei tubi,

dalla loro posizione e dal loro materiale, oltre che dal materiale di riempimento. Nel CaRM si

assume che lo scambio di calore avviene principalmente per conduzione. Facendo riferimento alla

Figura 5.2 il materiale di riempimento è diviso in due zone:

- il nucleo (core), che è la zona centrale tra i tubi;
- il guscio (shell), che è la parte esterna, compresa tra i tubi e la parete del pozzo.

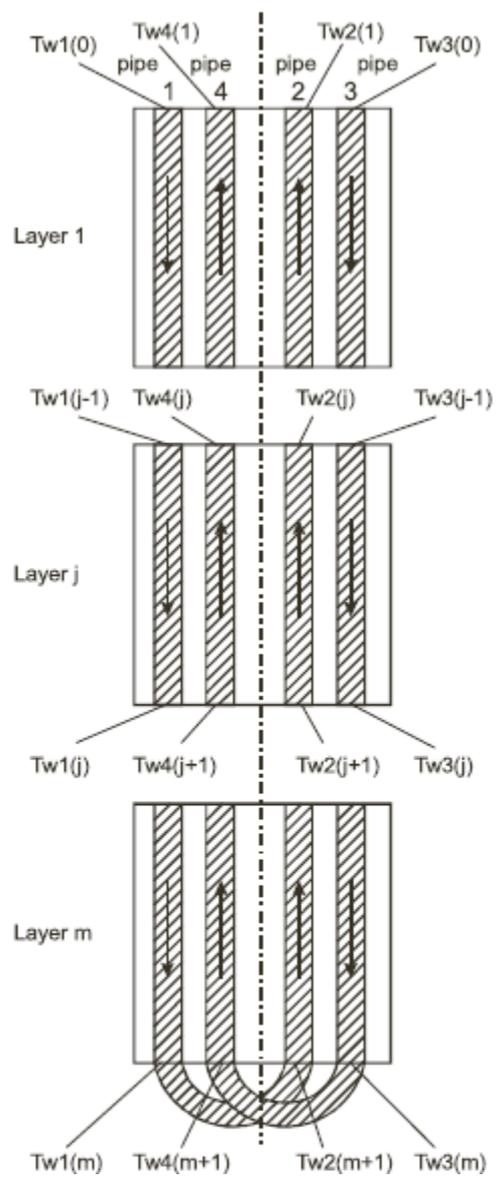


Figura 5.3 Schema della modellizzazione della sonda geotermica verticale a doppio tubo ad U

Le resistenze termiche (R_{ppA} , R_{ppB} , R_{p0}) sono un input per il CaRM e possono essere calcolate attraverso delle espressioni disponibili in letteratura o attraverso la simulazione bidimensionale della conduzione di calore della sezione orizzontale del pozzo. Per calcolare le capacità termiche del nucleo e del guscio sono usate le equazioni seguenti che fanno riferimento alla Figura 5.4:

$$\dots - \gamma^a - \dots - \gamma^a \quad (5.16)$$

$$\dots - \gamma^a - \dots - \gamma^a \quad (5.17)$$

dove ρ e c_p sono la densità e il calore specifico del materiale di riempimento,

r_e è il raggio esterno dei tubi, r_s è il raggio della sonda e n è il numero di sondi considerati ($n = 4$ perché stiamo analizzando una sonda a doppio tubo ad U).

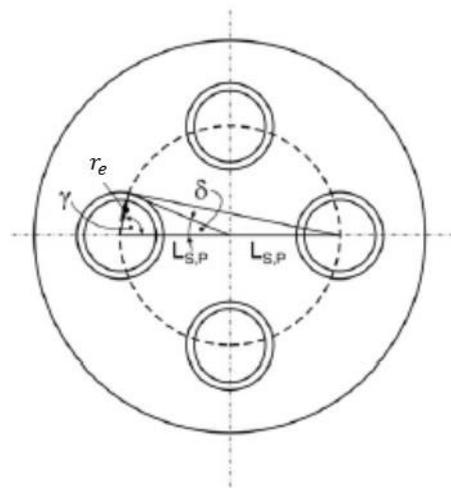


Figura 5.4 Rappresentazione delle variabili geometriche utilizzate nelle equazioni (5.16) e (5.17)

Le superfici effettive del nucleo e del guscio sono calcolate considerando la posizione dei tubi

$$\dots \quad (5.18)$$

$$\dots \quad (5.19)$$

dal guscio devono essere uguali alla capacità termica totale del materiale di riempimento:

$$\dots \quad (5.20)$$

5.1.4 Modellizzazione del fluido

Il coefficiente di scambio termico convettivo h_c può essere valutato sulla base del numero di Nusselt Nu:

$$h_c = \frac{k_f \text{Nu}}{d_i} \quad (5.21)$$

dove d_i è il diametro interno del tubo e k_f è la conduttività termica del fluido termovettore.

A sua volta il numero di Nusselt è funzione del numero di Reynolds Re e del numero di Prandtl Pr ed è determinato sulla base delle equazioni (5.22), (5.23) e (5.24) a seconda del regime di moto del fluido. Per velocità di flusso con un numero di Reynolds inferiore a 2100-2300 il deflusso è considerato laminare. Quando la velocità aumenta, ci sarà un graduale passaggio da moto laminare a moto turbolento, che è considerato pienamente sviluppato per numero di Reynolds superiore a 10000. Tra questi due valori il flusso si trova in una zona detta di transizione. Per questa ragione, nel CaRM il coefficiente di scambio termico per convezione è calcolato attraverso le equazioni:

$$Nu = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad \text{per moto in regime laminare (Re < 2000)} \quad (5.22)$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad \text{per moto in regime transitorio (2000 < Re < 10000)} \quad (5.23)$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{L}{d_i} \right)^{-0.1} \quad \text{per moto in regime turbolento (Re > 10000)} \quad (5.24)$$

dove d_i è il diametro interno del tubo e L la lunghezza del tubo.

Nella versione del CaRM utilizzata, si tiene conto della capacità termica del fluido e di essere scritto nel seguente modo:

$$\dots \quad (5.25)$$

dove \dot{Q} è la portata di fluido nel tubo, ρ e c_p sono rispettivamente la densità e il calore specifico del fluido, T_m è la temperatura media del fluido nel tubo considerato, T_s è la temperatura media della superficie interna del tubo, h è il coefficiente di scambio di calore per convezione, ρ è la densità del fluido, c_p è il calore specifico del fluido e r è il raggio interno del tubo. Per semplificare la scrittura del sistema lineare e dei calcoli, la temperatura di uscita è considerata uguale alla temperatura media del fluido per la fetta j -esima; questa ipotesi è tanto più accurata quanto maggiore è la discretizzazione lungo la direzione x . Comunque, di piccola entità è l'effetto sul breve tempo dovuto alla capacità del fluido termovettore può essere piuttosto importante. Il flusso di calore necessario per cambiare la temperatura di 1 K della circolazione del fluido nel tubo, è calcolato dalla seguente relazione:

$$\dot{Q} = \rho c_p \dot{V} \Delta T \quad (5.26)$$

dove L è la lunghezza del tubo e v è la velocità del fluido nel tubo; il loro rapporto $\frac{L}{v}$ è il tempo di residenza del fluido durante il quale il fluido scorre lungo il tubo. Per un doppio tubo ad U (con collegamento in parallelo) con un diametro interno dei tubi di 26 mm, con le tipiche proprietà termofisiche del fluido (densità $\rho = 24186 \text{ kg/m}^3$ e calore specifico $c_p = 24186 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$), e con una velocità del fluido nei tubi di $v = 0.1 \text{ m/s}$ (Fig. 5.26), il flusso di calore necessario per cambiare la temperatura di 1 K è di circa 1100 W.

5.1.5) Modellizzazione della disposizione delle sonde

Se due sonde si trovano alla distanza d , può essere assunta una superficie adiabatica alla distanza $d/2$. In modo più generale, considerando una certa distribuzione delle sonde nel campo è possibile assumere delle superfici adiabatiche a metà strada tra due sonde adiacenti. Per la modellizzazione di queste superfici, è utilizzata una condizione al contorno adiabatica ($q=0$).

A tal fine sono state considerate 6 tipologie di sonde:

- ◁ $V_k r q \sim 2 \ddot{o} . " u q p f c " n k d g t c =$
- ◁ $V_k r q \sim 3 \ddot{o} . " u q p f c " k p " r t q u u k o k v \ll " f k " w p \emptyset c n v t c "$
- ◁ $V_k r q \sim 4 C \ddot{o} . " u q p f c " x k e k p c " c " f w g " u q p f g " u w " n c v$
- ◁ $V_k r q \sim 5 \ddot{o} . " u q p f c " e k t e q p f c v c " f c " v t g " u q p f g =$
- ◁ $V_k r q \sim 6 \ddot{o} . " u q p f c " e k t e q p f c v c " f c " s w c v v t q " u q p f$

Fino al raggio medio r_m , le resistenze e le capacità sono calcolate come mostrato precedentemente (equazioni (5.3) e (5.8)); oltre questo limite per i calcoli delle resistenze e delle capacità vengono utilizzate le equazioni (5.27) e (5.28):

$$R = \dots \quad (5.27)$$

$$C = \dots \quad (5.28)$$

$$\text{quando } r > r_m \quad R = \dots \quad (5.29)$$

$$\text{quando } r > r_m \quad C = \dots \quad (5.30)$$

$$C_{eff} = \dots \quad (5.31)$$

In queste equazioni si fa riferimento al settore angolare effettivo θ_{eff} , il quale dipende dal tipo di sonda ed è calcolato attraverso le equazioni (5.29) e (5.30) e riportato nella Tabella 5.1.

Tabella 5.1 Coefficienti per la valutazione delle effettive resistenze e capacità termiche

Tipo	k_1	k_2	k_3	k_4
1	2	2	-	-
2A	2	4	1.5	2
2B	2	4	-	-
3	2	6	1	2
4	2	8	-	-

Nella Figura 5.5 è mostrata una rappresentazione delle diverse tipologie di sonde. Attraverso la loro combinazione è possibile ottenere qualsiasi campo sonde.

Figura 5.5 Esempificazione della modellizzazione delle diverse tipologie di sonde

5.1.6) Sistema complessivo di equazioni

Riassumendo i diversi problemi discussi, il modello finale prevede quindi un problema di tipo matriciale:

$$(5.32)$$

dove $[A]$ è la matrice dei coefficienti, $\{X\}$ è il vettore delle temperature incognite e $\{B\}$ è il vettore colonna dei termini noti; il sistema di equazioni lineari può essere facilmente risolto attraverso

Dato che il problema è di tipo transitorio, deve essere assegnata la temperatura iniziale di ogni nodo e a tale fine viene scelta la temperatura indisturbata del terreno. Riassumendo, i dati in ingresso necessari al CaRM sono:

- ◁ le proprietà del terreno per ogni sotto-regione: spessore, conduttività termica, calore specifico, densità, temperatura indisturbata del terreno;
- ◁ proprietà del fluido: portata di massa, calore specifico, densità, viscosità, conduttività termica;
- ◁ caratteristiche della sonda: diametro esterno della sonda, dimensione dei tubi, resistenza termica tra tubo e tubo e tra tubi e superficie esterna della sonda;
- ◁ distanza tra le sonde nel campo sonde;
- ◁ $m, q, f, c, n, k, v, \dots$ fluido termovettore nelle sonde, connessione delle sonde;
- ◁ variabili di discretizzazione: step temporali della simulazione e mesh (raggio massimo R_{max} , numero di suddivisioni in profondità, numero di suddivisioni radiali).

I n k " q w v r w v u " f g n " o q f g n n q " u q p q " n g " v g o r g t c v w t g " v g t o k e q " r g t " q i p k " u v t c v q " s * 3 + . " í . " s * 1 + . " í . " s * o fluido termovettore e il flusso termico totale scambiato con il terreno circostante.

5.2) Simulazioni con il CaRM

Attraverso il software CaRM sopra descritto, in questo paragrafo vengono presentate le analisi che sono state effettuate per determinare se, a parità di layout del campo di sonde analizzato, del numero di sonde di cui è costituito il campo e a parità di superficie di scambio termico con il terreno, di portata di massa del sistema geotermico, di portata di massa del fluido termovettore nelle sonde, al fine di immagazzinare calore al terreno è opportuno aumentare o diminuire la distanza tra le sonde adiacenti. Per questo scopo si è considerato un campo di sonde geotermiche verticali a doppio tubo ad U di profondità L ciascuna e di diametro d ; la superficie di scambio termico di riferimento vale quindi:

$$S = 2 \cdot L \cdot d \cdot \pi \quad (5.33)$$

dove d è il diametro interno dei tubi, ρ è la densità del fluido termovettore, μ è la viscosità dinamica del fluido e v è la velocità del fluido nei tubi. Utilizzando acqua come fluido termovettore ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) e per $Re = 13000$ (le proprietà del fluido termovettore e la geometria della SGV sono riportati nel dettaglio in Tabella 5.3) e facendo riferimento alle relazioni (5.22), (5.23) e (5.24), si è determinato che per avere moto turbolento pienamente sviluppato ($Re=13000$) la velocità del fluido nei tubi deve essere pari a 0.1 m/s . A tale velocità di deflusso del fluido nei tubi corrisponde una portata di massa per ciascun tubo pari a:

(5.34)

Ora considerando che si fa riferimento a sonde a doppio tubo ad U, la portata di massa di fluido termovettore che circola

(5.35)

La portata

(5.36)

Mantenendo come parametri costanti la lunghezza totale di scambio termico con il terreno e la portata di massa del sistema, sono state eseguite delle simulazioni prendendo in esame dei campi sonde con layout matriciale. Si è fatto riferimento (Tabella 5.2) a 3 tipologie di campi rispettivamente

Tabella 5.2 Tipologie di campi sonde prese in esame

Simulazione	Numero di sonde	Profondità delle sonde [m]	Interasse [m]
1	16	100	7
2	16	100	5.5
3	16	100	4
4	32	50	7
5	32	50	5.5
6	32	50	4
7	64	25	7
8	64	25	5.5
9	64	25	4

I campi di sonde analizzati hanno, come detto, una disposizione di tipo matriciale: un esempio qualitativo del campo di 16 sonde è mostrato in Figura 5.6. In tale figura, si può vedere come un campo di 16 sonde sia caratterizzato, secondo la convenzione utilizzata dal CaRM e presentata al Paragrafo 5.1, da 4 sonde di tipo 4, ovvero aventi 4 superfici a contatto con altrettante sonde adiacenti, da 8 sonde di tipo 3 aventi 3 superfici a contatto con altrettante sonde adiacenti e da 4

sonde di tipo 2A caratterizzate da 2 superfici adiacenti a contatto con altrettante sonde. I campi di 32 e di 64 sonde riportano un layout simile a quello riportato in Figura 5.6, ma caratterizzati rispettivamente da 12 sonde di tipo 4, 16 sonde di tipo 3 e 4 di tipo 2A e da 36 sonde di tipo 4, 24 sonde di tipo 3 e 4 sonde di tipo 2A.

Dalla Tabella 5.0.4. " u k " x g f g " e q o g " n c " " u e g n v c " f g n n ø k p v g t
 Omer [3] u k " c u u w o g " 6 " o " e q o g " x c n q t g " o k p k o q " r g t " n c "

valori inferiori, infatti, le sonde risulterebbero troppo vicine con problemi di cortocircuito termico tra le stesse che ne comprometterebbe la capacità di scambio termico con il terreno circostante.

X g p i q p q " r q k " u e g n v k " c n v t k " f w g " x c n q t k a p p u r a k e " s e k p v g t
 n ø c p f c o g p v q " f g n n ø g p g t i k c " v g t o k e c " k o o c i c | | k p c
 f g n n ø k p v g t c u u g " q r r w t g " k n " e q p v t c t k q 0 " N c " u e g n v

superficie di scambio termico con il terreno aumentano il numero di sonde utilizzate, deriva dalla necessità di capire se per immagazzinare calore nel terreno a parità di superficie di scambio termico e a parità di portata di massa complessiva del sistema sia necessario aumentare o meno il numero di sonde.

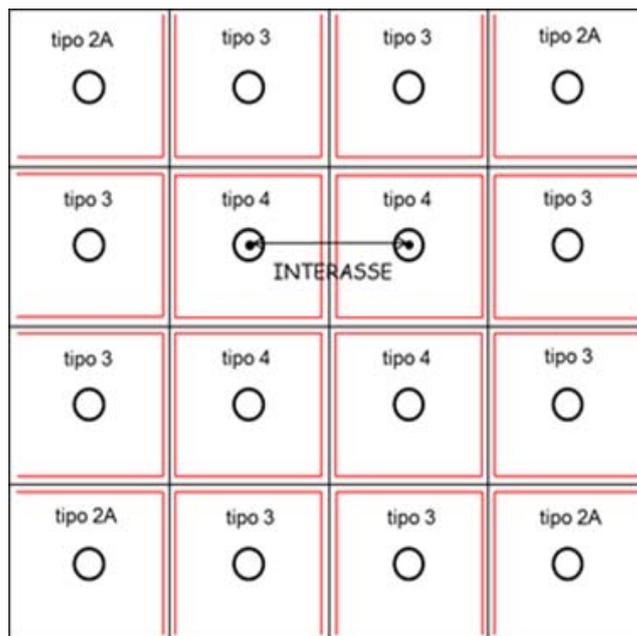


Figura 5.6 Esempio qualitativo del layout matriciale del campo di 16 sonde preso in esame. Si può notare come un simile campo, secondo le convenzioni utilizzate nel CaRM e presentate al Paragrafo 6.1, sia caratterizzato da 4 sonde di tipo 4, da 8 sonde di tipo 3 e da 4 sonde di tipo 2A.

È stato sostituito da un suolo omogeneo, in particolare per quel che riguarda le caratteristiche termiche. A tal proposito il terreno omogeneo che si prende come riferimento avrà delle caratteristiche termiche medie rispetto al terreno reale, come conduttività termica e diffusività termica medie.

Per quel che riguarda la trasmissione del calore un parametro importante è la distanza tra i due lati del tubo ad U. In particolare, maggiore è la distanza tra i due lati del tubo ad U e maggiore è la velocità di trasferimento di calore a causa della ridotta interazione tra i due gambi (Breger [18]).

In Zarrella [2] si utilizza una disposizione a doppia sonda. Sulla base di questa considerazione è stata scelta una disposizione simmetrica dei 4 tubi con distanza di 0.0826 m tra tubi opposti. È da sottolineare, inoltre, il fatto che nelle analisi si utilizza un collegamento in parallelo sia tra le varie sonde, sia tra le sonde opposte. A questo punto, per quanto riguarda le caratteristiche termiche, sono stati utilizzati i valori relativi alla distanza di 0.0826 m riportati in Zarrella [2] Tabelle 1 e 2. I valori delle variabili utilizzate nelle simulazioni sono comunque riportati in dettaglio nella Tabella 5.3: la geometria delle sonde fa riferimento alle dimensioni standard presenti sul mercato. Per quanto riguarda i casi di studio, sono stati utilizzati due casi di studio semplificati, rappresentativi il primo per esempio di un impianto solare termico e il secondo di un reattore termico a più alta temperatura:

- 1) 6 mesi a 5 °C e 6 mesi a 25°C
- 2) 6 mesi a 5 °C e 6 mesi a 50°C

Tabella 5.3 Dati utilizzati nelle simulazioni effettuate col CaRM

Numero di ore	3600
Numero di anni	8760
Portata di massa del fluido termovettore nel sistema [kg/s]	5
Temperatura del terreno indisturbato [°C]	47.62
Calore Specifico del fluido [J/(kg·K)]	13
Conducibilità termica del fluido [W/(m·K)]	4186
Viscosità dinamica del fluido [kg/(m·s)]	0.60
Densità del fluido [kg/m ³]	0.0014
Calore Specifico del terreno [J/(kg·K)]	1000
Conducibilità termica del terreno [W/(m·K)]	1460
Densità del terreno [kg/m ³]	1.50
Diametro Interno tubo [mm]	1438
Diametro Esterno tubo [mm]	26
Conducibilità termica dei tubi in polietilene [W/(m·K)]	32
Interasse dei tubi in cui scorre il fluido [m]	0.40
Diametro esterno della SGV [m]	0.0826
Resistenza termica specifica tra tubo e tubo adiacente [K/W]	0.14
Resistenza termica specifica tra tubo e tubo opposto [m·K/W]	0.41
Resistenza termica specifica tra tubo e bordo esterno della SGV [m·K/W]	0.265
Calore Specifico del materiale di riempimento [J/(kg·K)]	0.19
Conducibilità termica del materiale di riempimento [W/(m·K)]	2000
Densità del materiale di riempimento [kg/m ³]	2.5
Raggio massimo di indagine [m]	1850
Tipo connessione	10
	in parallelo

In particolare, è stato utilizzato un numero di regioni anulari (corone circolari o numero di mesh in direzione radiale) e un numero di strati in cui viene suddiviso il terreno adiacente alla sonda pari a (numero di mesh in direzione assiale).

È importante sottolineare, inoltre, che si è utilizzato un passo di indagine orario e un intervallo di tempo di 7 secondi, ovvero quella di allontanare le analisi dagli istanti iniziali di simulazione e la necessità di contenere i tempi di elaborazione del software.

Come detto nel §Paragrafo 5.1, il software CaRM permette di ottenere in output le temperature in ogni nodo, il flusso termico per ogni strato, la temperatura di uscita del fluido termovettore e il flusso termico totale scambiato con il terreno circostante. Proprio sulla base di s w g u v o l a t o n v k o q sono state eseguite una serie di valutazioni.

Prima di tutto, però, per poter leggere i risultati forniti dal CaRM bisogna indicare la convezione di segno per il flusso termico utilizzata nel software: il flusso termico scambiato con il terreno nel CaRM è negativo quando è entrante nel terreno e positivo quando è uscente. Più precisamente, durante i 6 mesi a temperatura di ingresso del fluido nello scambiatore pari a 5 °C (cioè quando il fluido si riscalda circolando nelle sonde) il flusso termico è positivo, mentre nei restanti 6 mesi rispettivamente a 25 °C e a 50°C, il flusso termico è negativo (Figura 5.7).

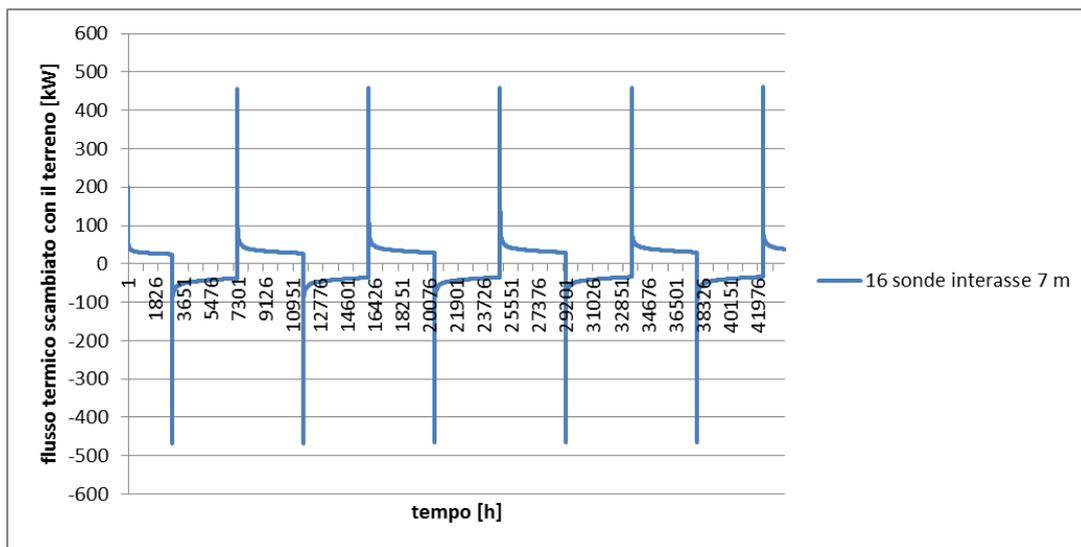


Figura 5.7 Andamento del flusso termico scambiato dal campo di 16 sonde con interasse 7 m con il terreno, dove e q o g " r t q h k n q " f g n n g " v g o r g t c v w t g " f ø k p i t g u u q " f g n " h n w k f q " mesi a 25°C

In Figura 5.0.9 " u k " r w ¼ " x g f g t g . " e q o g " g u g o r k q . " n ø c p f c o g con il terreno dal campo di 16 sonde con interasse 7 m per il primo profilo di temperature f ø k p . Si g n o t a n o q dei picchi positivi e negativi in corrispondenza del passaggio dalla v g o r g t c v w t c " f ø k p i t g u u q " f k " 7 Å E " c " s w g n n c i " d e f k " 4 7 Å software, ma sono influenti nella valutazione del calore annuale immagazzinato con il terreno:

questo perché il calore annuale immagazzinato nel terreno è dato dalla somma algebrica del calore estratto dal terreno e del calore immesso nel terreno; in questa valutazione quindi, per ciascun anno, il picco negativo e quello positivo si elidono reciprocamente.

Sempre facendo riferimento al campo di 16 sonde con interasse 7 m e al primo profilo di v g o r g t c g v s s o t s i r i p o t a n k i p Tabella 5.4 e in Figura 5.8 i valori del calore annuale immagazzinato nel terreno attraverso il campo sonde.

Tabella 5.4 Calore annuale immagazzinato nel terreno (5 anni di analisi) attraverso il campo di 16 sonde con k p v g t c u u g " 9 " o . " f q x g " e q o g " r t q h k n q " f g n n g " v g o i r p g o f i l e c o n 6 t g " f ø k mesi a 5°C e 6 mesi a 25°C

Anno	Calore immagazzinato nel terreno[MWh]
1°	-51.93
2°	-37.24
3°	-26.62
4°	-19.80
5°	-15.21

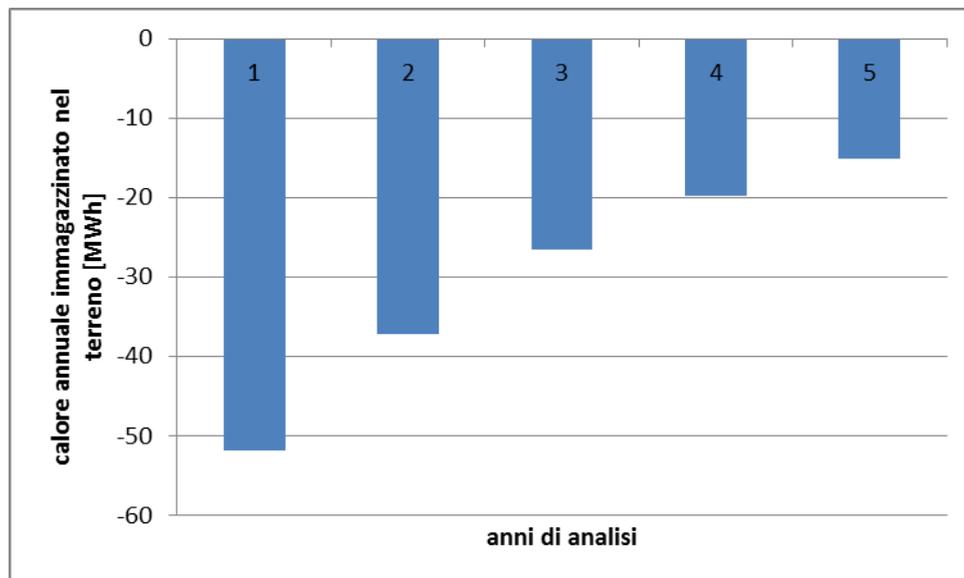


Figura 5.8 Rappresentazione del calore annuale immagazzinato nel terreno (5 anni di analisi) attraverso il campo di 16 sonde con interasse 9 " o . " f q x g " e q o g " r t q h k n q " f g n n g " v g o r g t c v w t utilizzato il profilo con 6 mesi a 5°C e 6 mesi a 25°C

Dalla Figura 5.8 si nota come il calore immagazzinato nel terreno per mezzo del campo sonde diminuisca nel corso degli anni di funzionamento del sistema tende a saturarsi termicamente. Questo fatto viene messo maggiormente in risalto nelle Tabella 5.5 e 5.6 e nelle Figure 5.9 e 5.10, dove viene riportato il calore immagazzinato nel terreno sulla base di 20 anni di analisi. A tal fine vengono eseguite le simulazioni del campo di 16 sonde con interasse 7 m su 20 anni rispettivamente con il profilo di temperature con 6 mesi a 5°C e 6 mesi a 25°C e con quello con 6 mesi a 5°C e 6 mesi a 50°C.

Tabella 5.5 Calore annuale immagazzinato nel terreno (20 anni di analisi) attraverso il campo di 16 sonde con 6 mesi a 5°C e 6 mesi a 25°C

Anno	Calore immagazzinato nel terreno [MWh]
1°	-51.93
2°	-37.24
3°	-26.62
4°	-19.80
5°	-15.21
6°	-12.00
7°	-9.69
8°	-8.01
9°	-6.75
10°	-5.81
11°	-5.09
12°	-4.54
13°	-4.12
14°	-3.79
15°	-3.53
16°	-3.33
17°	-3.17
18°	-3.04
19°	-2.94
20°	-2.86

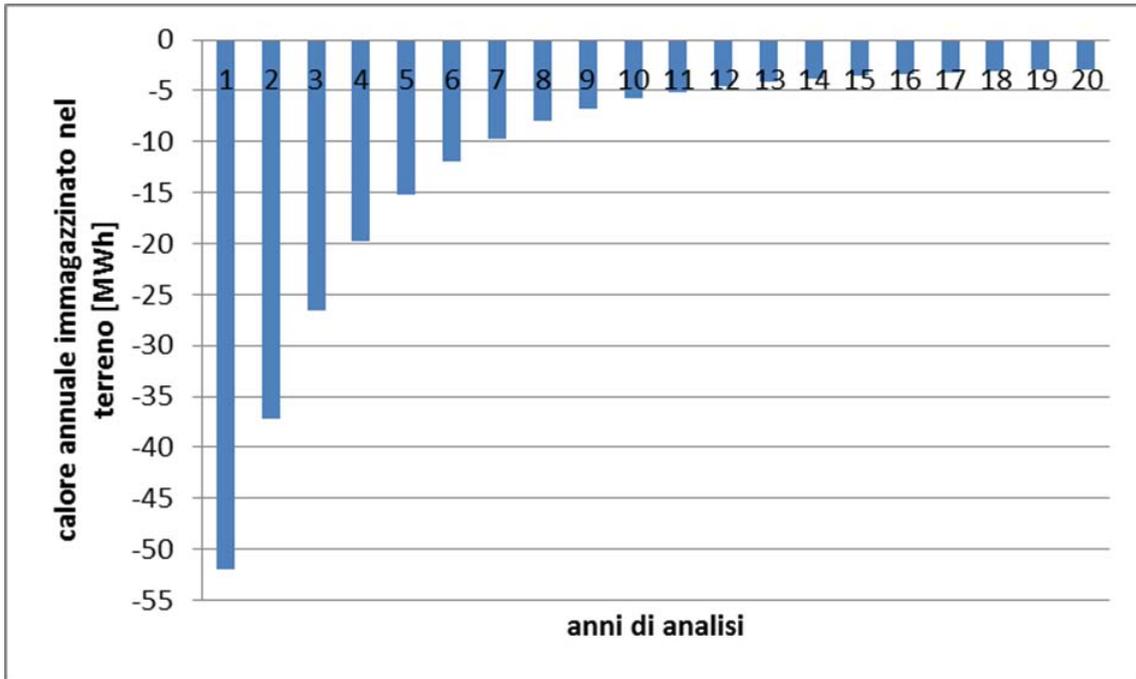


Figura 5.9 Calore annuale immagazzinato nel terreno (20 anni di analisi) attraverso il campo di 16 sonde con k p v g t c u u g " 9 " o . " f q x g " e q o g " r t q h k n nelle sonde si è utilizzato il profilo con 6 t g " f ø k mesi a 5°C e 6 mesi a 25°C

Tabella 5.6 Calore annuale immagazzinato nel terreno (20 anni di analisi) attraverso il campo di 16 sonde con k p v g t c u u g " 9 " o . " f q x g " e q o g " r t q h k n q " f g n n g " zatg ibprofilo con 6 w t g " f ø mesi a 5°C e 6 mesi a 50°C

Anno	Calore immagazzinato nel terreno [MWh]
1°	-380.38
2°	-253.53
3°	-182.41
4°	-136.56
5°	-105.44
6°	-83.58
7°	-67.84
8°	-56.28
9°	-47.67
10°	-41.17
11°	-36.23
12°	-32.44
13°	-29.51
14°	-27.23
15°	-25.45
16°	-24.05
17°	-22.94
18°	-22.06
19°	-21.36
20°	-20.79

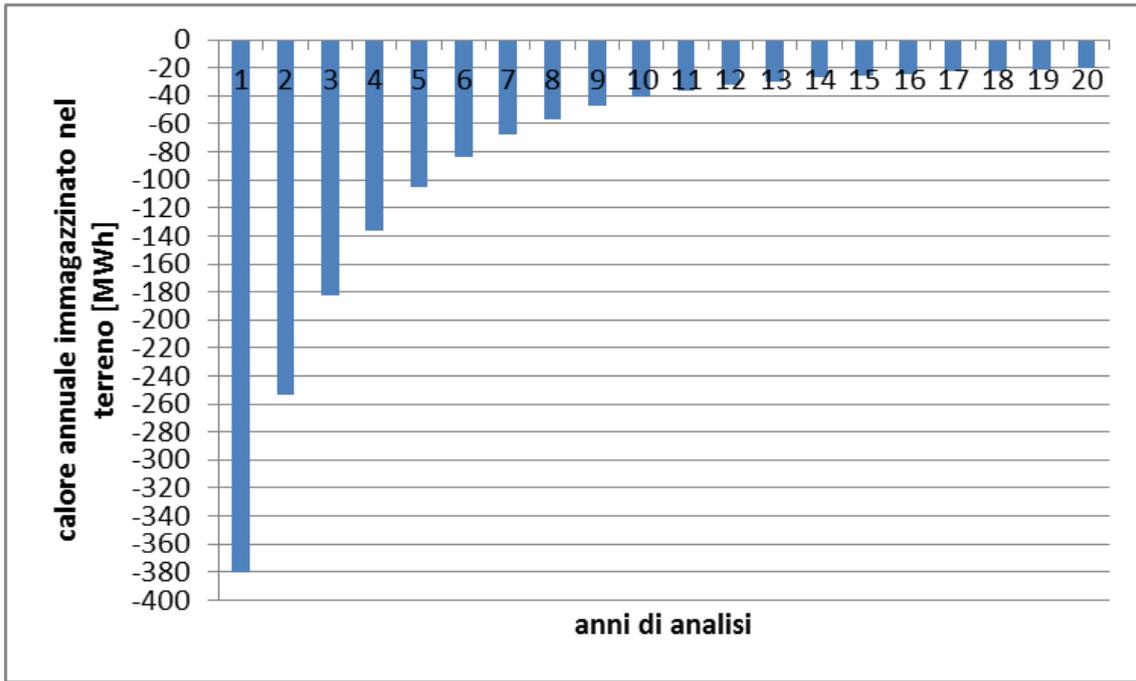


Figura 5.10 Calore annuale immagazzinato nel terreno (20 anni di analisi) attraverso il campo di 16 sonde con interasse 7 m, dove come r t q h k n q " f g n n g " v g o r g o nelle sonde si è utilizzato il profilo con 6 f g n " h n mesi a 5°C e 6 mesi a 50°C

Sulla base dei valori riportati nelle Tabelle 5.5 e 5.6 e nelle Figure 5.9 e 5.10, è importante osservare . " c p e j g " s w c n " 3 " n ø c p f c o g p v q " f g n n c '16sonde.r g t c v

A tal proposito si faccia riferimento alle Figure 5.11 e 5.12, dove sono riportati gli andamenti delle temperature del terreno a distanza $R_m=9.190$ m (che è il raggio baricentrico più esterno a cui fa riferimento il CaRM sulla base di $r_{max}=10$ m (Tabella 5.3)) dalla sonda più esterna del campo sonde, ovvero la sonda di tipo 2A, rispettivamente per il primo e per il secondo profilo di temperatura.

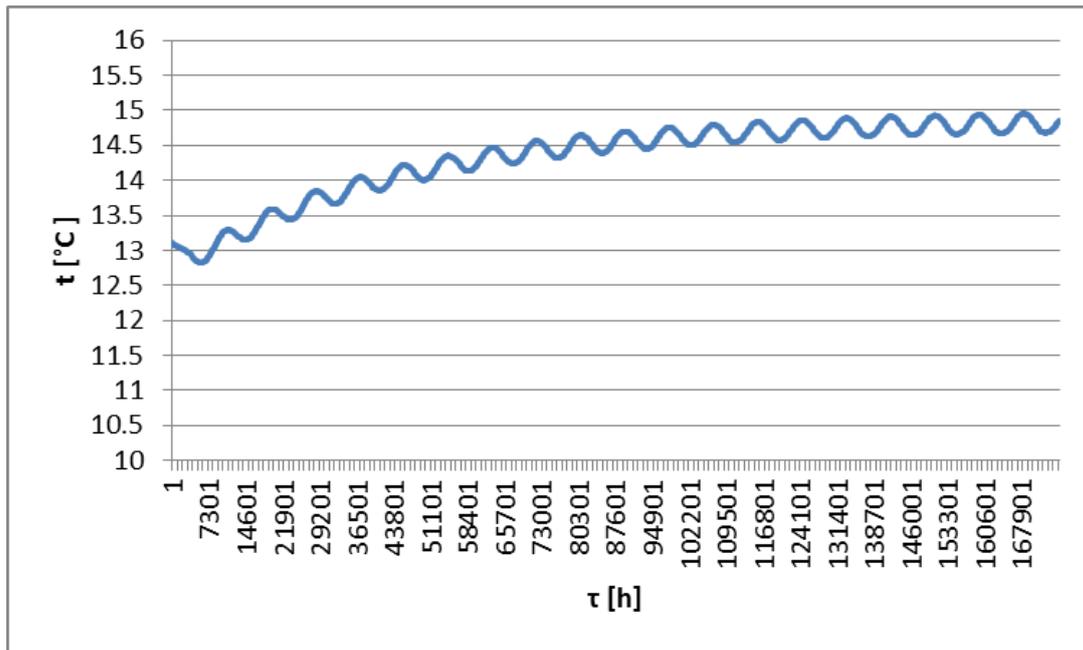


Figura 5.11 Andamento della temperatura del terreno a distanza $R_m=9.190$ m dalla sonda più esterna del campo di 16 sonde. " f q x g " e q o g " r t q h k n q " f g n n g hellegsonde gi è utilizzato il profilo k p i t g u con 6 mesi a 5°C e 6 mesi a 25°C

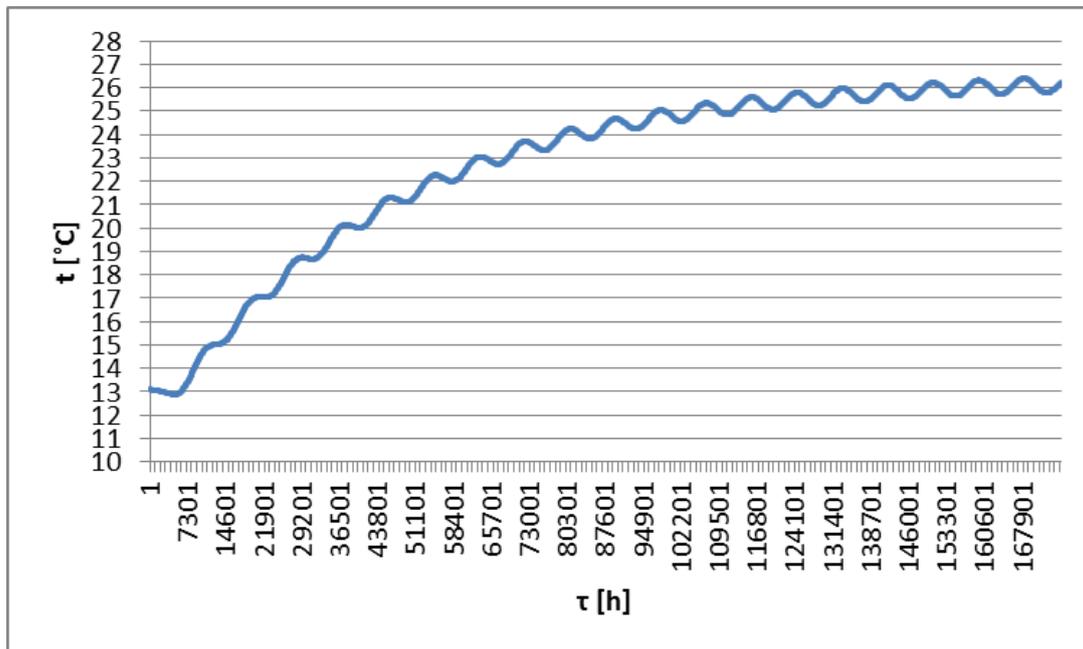


Figura 5.12 Andamento della temperatura del terreno a distanza $R_m=9.190$ m dalla sonda più esterna del campo di 16 sonde. " f q x g " e q o g " r t q h k n q " f g n n g hellegsonde gi è utilizzato il profilo g t c v w t con 6 mesi a 5°C e 6 mesi a 50°C

Dalle Figura 5.11 e 5.12, si nota come n ø c e e w o w n q " c p e r m i n i u n g a l t m e n t o " d e l l a c n q t g temperatura del terreno circostante le sonde e ciò è tanto più evidente quanto ma i i k q t g " 3 " n ø g

calore immagazzinato al terreno: si vede infatti che, per il profilo di temperature con 6 mesi a 5°C e 6 mesi a 50°C (Figura 5.12), la temperatura del terreno aumenta addirittura del doppio (26 °C) rispetto al valore iniziale (13°C). Si nota inoltre che maggiore è il calore accumulato al terreno e maggiore è il tempo che impiega il terreno a raggiungere una nuova stabilità termica (10 anni in Figura 5.11 e 15 anni in Figura 5.12).

A questo punto si va ad effettuare un confronto tra il calore immagazzinato nel terreno al quinto anno di indagine per ciascuna delle simulazioni di Tabella 5.2. I risultati per i due profili di temperatura sono riportati rispettivamente nelle Tabelle 5.7 e 5.8 e nelle Figure 5.13 e 5.14.

Tabella 5.7 Valori del flusso termico al quinto anno per il 1° profilo di temperatura

	Interasse [m]	Calore estratto dal terreno [MWh]	Calore immesso nel terreno [MWh]	Calore immagazzinato nel terreno [MWh]
16 sonde	7	167.88	-183.09	-15.21
	5.5	171.69	-182.92	-11.23
	4	170.27	-178.52	-8.24
32 sonde	7	169.03	-183.59	-14.57
	5.5	173.31	-183.48	-10.17
	4	171.77	-178.62	-6.85
64 sonde	7	170.75	-186.17	-15.42
	5.5	175.50	-185.86	-10.36
	4	173.81	-180.51	-6.71

Tabella 5.8 Valori del flusso termico al quinto anno per il 2° profilo di temperatura

	Interasse [m]	Calore estratto dal terreno [MWh]	Calore immesso nel terreno [MWh]	Calore immagazzinato nel terreno [MWh]
16 sonde	7	341.34	-446.78	-105.44
	5.5	359.47	-437.20	-77.74
	4	363.34	-420.54	-57.21
32 sonde	7	346.69	-445.30	-98.62
	5.5	366.52	-435.27	-68.75
	4	370.35	-417.35	-47.00
64 sonde	7	348.99	-452.94	-103.95
	5.5	371.05	-441.32	-70.28
	4	375.39	-421.41	-46.02

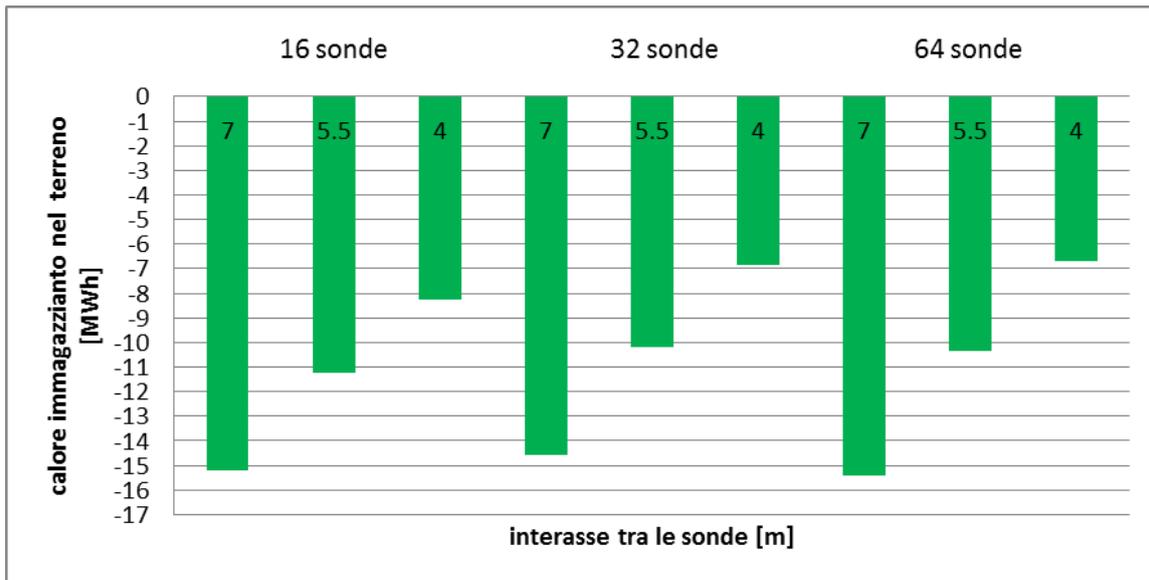


Figura 5.13 Rappresentazione grafica del calore annuale immagazzinato nel terreno al quinto anno per il 1° profilo di temperatura

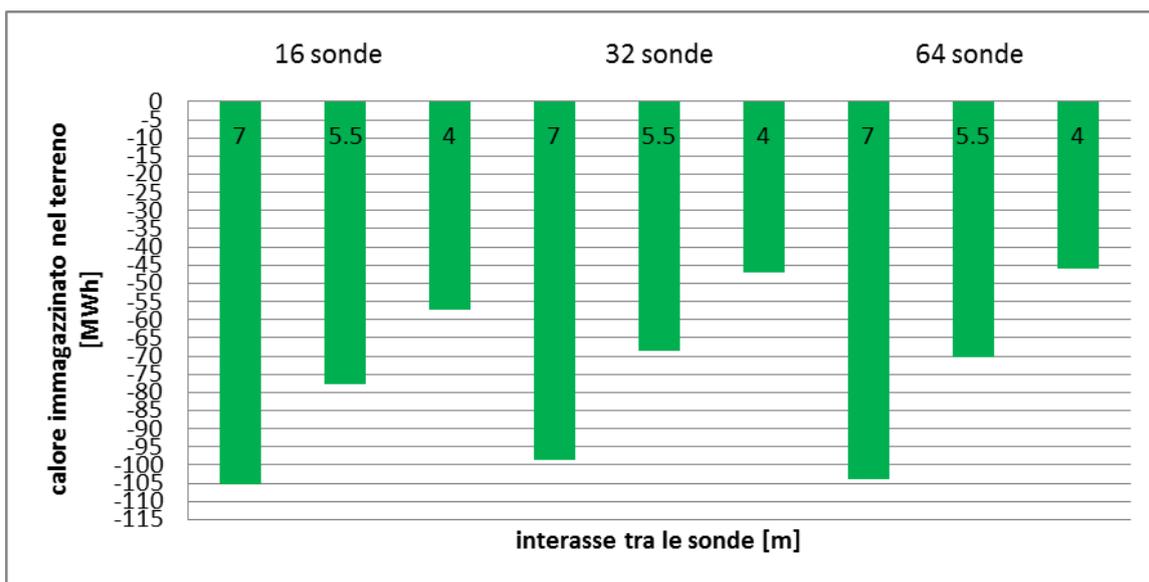


Figura 5.14 Rappresentazione grafica del calore annuale immagazzinato nel terreno al quinto anno per il 2° profilo di temperatura

Sulla base delle Figure 5.13 e 5.14 si può notare, innanzitutto, che dal punto di vista del calore scambiato con il terreno, è conveniente utilizzare 16 sonde di 100 m di profondità, piuttosto che 32 sonde di 50 m o 64 sonde di 25 m. Quindi, dal punto di vista del calore immagazzinato al terreno a parità di superficie di scambio con il terreno, è conveniente utilizzare un numero di sonde minore ma installate ad una profondità più elevata. Chiaramente questa

considerazione si scontra poi con il limite tecnologico che non permette di realizzare sonde geotermiche profonde oltre i 150 m. Risulta comunque vantaggioso, dal punto di vista logistico, ridurre il più possibile il numero di sonde, in quanto è opportuno limitare il numero di sonde interessate dal campo sonde soprattutto in aree geografiche dove gli edifici si trovano uno vicino all'altro. In queste situazioni risulta conveniente utilizzare sonde tanto più profonde perché permettono di lavorare con strati di terreno la cui temperatura non è influenzata dalle variazioni climatiche (come detto nei paragrafi precedenti, infatti, sopra i 20 m di profondità la temperatura del terreno è soggetta alla stagionalità ambientale).

È importante vedere anche come variano le temperature delle sonde (che sono le sonde centrali al campo sonde e quindi soggette a variazioni di temperature più accentuate) a parità di interasse tra le sonde (interasse pari 7 m) e al variare del numero delle sonde.

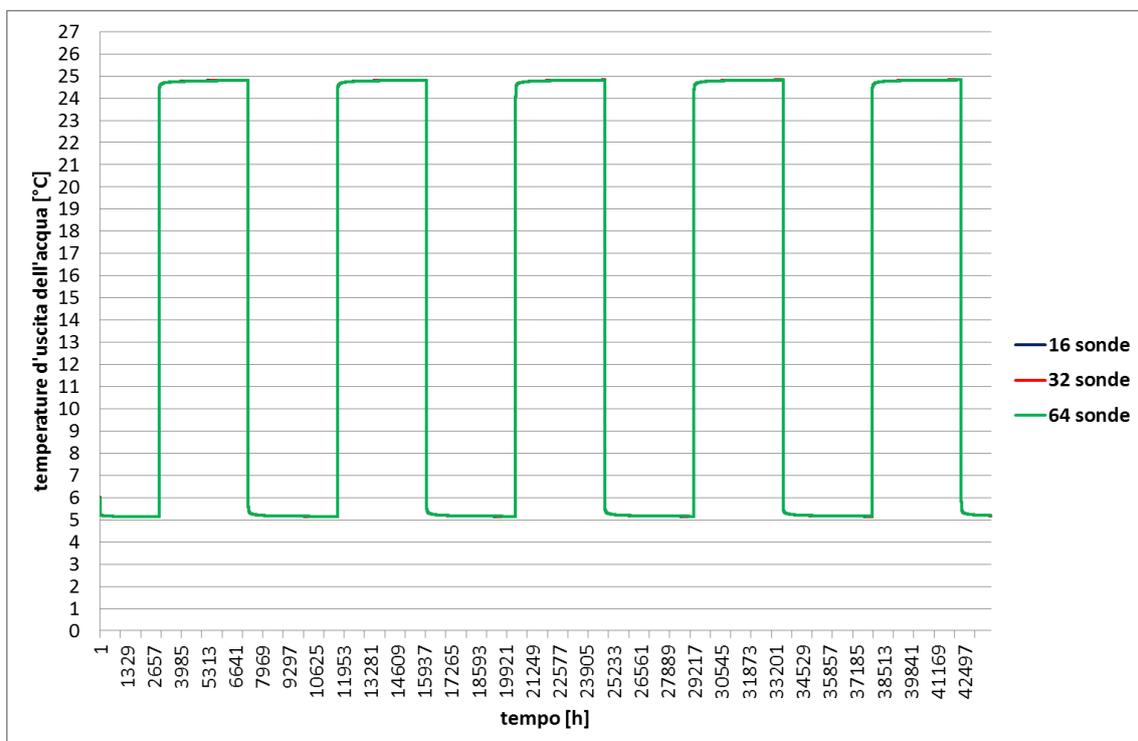


Figura 5.15 Confronto tra le temperature d'uscita dell'acqua dalle sonde a parità di interasse pari a 7 m e al variare del numero di sonde (16 sonde di 100 m di profondità, 32 sonde di 50 m di profondità e 64 sonde di 25 m di profondità) mantenendo costante l'area di scambio totale con il terreno e la portata di massa del sistema

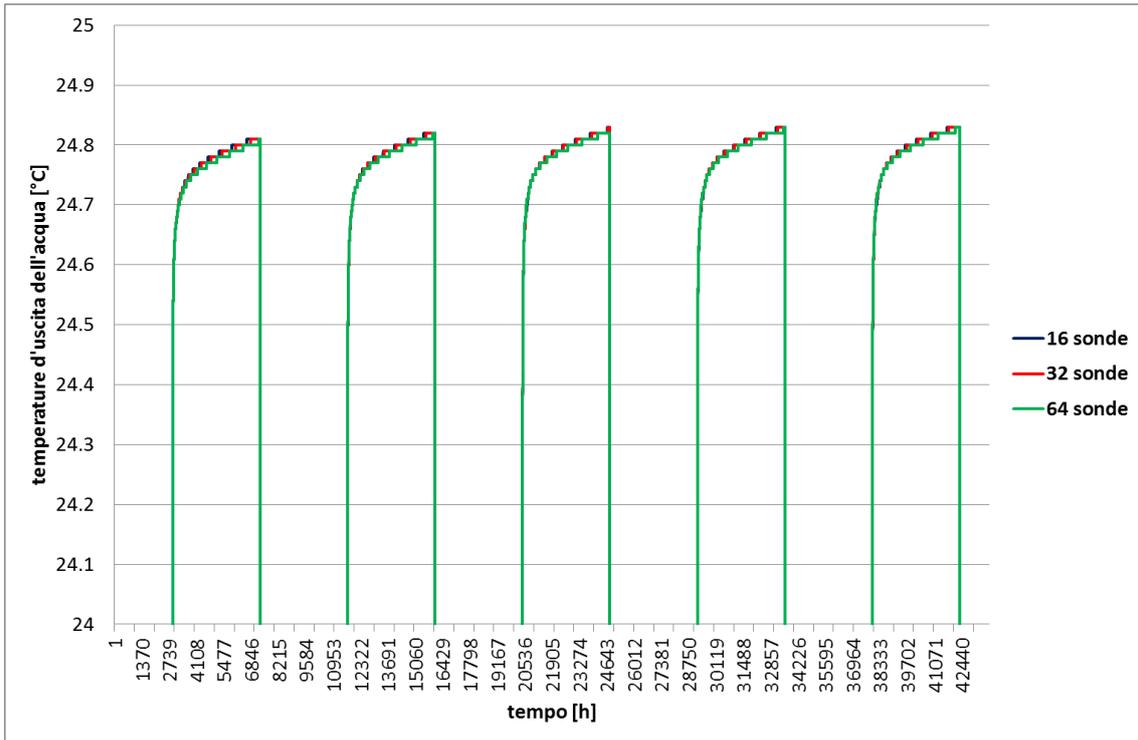


Figura 5.16 Dettaglio dei valori superiori dei profili riportati nella Figura 5.15

Figura 5.17 Dettaglio dei valori inferiori dei profili riportati nella Figura 5.15

