

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

Scuola di Scienze
Corso di Laurea in Fisica

Geotermia a bassa entalpia: validazione dei software

Relatore:
Prof. Maurizio Bonafede

Presentata da:
Giuseppe Russo

Correlatore:
Dott. Gabriele Ponzoni

Sessione I
Anno Accademico 2013/2014

Sommario

ABSTRACT	6
1.LA GEOTERMIA	7
Calore della Terra	8
Origine del calore terrestre	8
Propagazione del calore	10
Radiazione solare.....	10
Effetto in profondità di variazioni periodiche della temperatura in superficie.....	11
Gradiente geotermico	13
Entalpia	14
Sistemi geotermici	14
Classificazione dei sistemi geotermici	15
Sistemi geotermici ad alta entalpia	16
Tipologia d’impianti.....	16
La situazione in Italia e nel mondo	17
Geotermia a bassa entalpia.....	20
Impatto ambientale	23
La pompa di calore geotermica	24
Sistema di accumulo e distribuzione del calore	25
Pro e contro	26
Costo e risparmio.....	27
Diffusione in Europa e in Italia	28
2.STUDIO DI FATTIBILITÀ	30
Inquadramento del sito, fabbisogni e obblighi normativi	30
Parametri di input.....	32
Casi di studio.....	33
Conclusioni	35
3.SIMULAZIONI E ANALISI DATI	36
Modelizzazione di un impianto	36
Descrizione dei software	37
Creazione del modello.....	38
Discretizzazione	38
Corpi idrici.....	38
Agenti esterni	39
Simulazione	39

Risultati ottenuti.....	40
Conclusioni	47
Riferimenti bibliografici	49

ABSTRACT

Trovare una fonte alternativa ai combustibili fossili non costituisce più una scelta, ma un obbligo. Lo sfruttamento dell'energia geotermica sta diventando una realtà sempre più diffusa, in quanto una forma di energia rinnovabile, pulita, economicamente conveniente, e con una giusta politica energetica potrebbe dare il suo importante contributo all'energia ottenuta da fonte rinnovabile.

Ci sono però dei fattori da non sottovalutare, l'installazione e il funzionamento di impianti geotermici per il riscaldamento o raffrescamento di edifici può produrre alterazioni sull'ambiente circostante e nella falda acquifera. Attraverso un attento studio vengono presi in considerazione tutti i fattori che potrebbero provocare un cambiamento dell'equilibrio preesistente, e vengono individuate le soluzioni che permettono la fattibilità del progetto rispettando i parametri imposti dalla legge. Nell'installazione di sistemi geotermici a bassa entalpia, il principale elemento da tenere sotto osservazione riguarda la previsione e il controllo delle temperature, in modo tale da impedire lo sviluppo di anomalie termiche.

Il sistema preso in considerazione in questa tesi è un sistema geotermico open loop: attraverso un pozzo di adduzione viene prelevata acqua direttamente dalla falda acquifera, per il riscaldamento o il raffrescamento di un edificio, e reimpressa, ad una temperatura diversa, attraverso un pozzo di reimmissione. Si valuta l'impatto del sistema nel sottosuolo e le temperature raggiunte a seguito della messa in opera dell'impianto. In particolare, è proposto un modello numerico MODFLOW di un sistema open loop in un acquifero di sabbia e ghiaia, al fine di determinare l'influenza della reimmissione dal punto di vista idrico e termico. I dati risultanti da questo modello saranno confrontati con quelli ottenuti utilizzando un potente software, COMSOL MULTIPHYSICS. Infine si effettua l'analisi e il confronto dei dati ottenuti dai due software nelle diverse configurazioni del sistema e se ne individua la più adatta alle caratteristiche del sito in esame.

1.LA GEOTERMIA

La geotermia è la scienza che studia l'insieme dei fenomeni naturali che contribuiscono alla produzione e alla propagazione del calore terrestre. I suoi principi vengono utilizzati per l'uso diretto del calore o per la produzione di energia elettrica. Tale energia è chiamata energia geotermica e rappresenta una fonte rinnovabile ed ecocompatibile. Rinnovabile in quanto il calore della terra si rigenera continuamente, per effetto del decadimento radioattivo negli strati profondi e dell'irraggiamento solare nello strato superficiale. Ecocompatibile perché è pulita e generalmente non prevede emissione di gas serra.

Se consideriamo il sostanziale aumento di anidride carbonica nell'atmosfera, e a questo aggiungiamo il fatto che per garantire un grado soddisfacente di sviluppo umano è necessaria una quantità di energia pari al doppio di quanta consumata oggi, e che l'energia da fonti fossili è limitata e sarà esaurita (o diventerà molto rara e costosa) nell'arco dei prossimi 40 anni, è chiaro che bisogna correre ai ripari. È necessario sostituire le fonti fossili con fonti rinnovabili in un periodo relativamente breve, ma tenendo conto della quantità totale di energia necessaria e della sua ripartizione nel mondo ¹.

La geotermia, ad oggi, ancora molto dietro rispetto a tecnologie più finanziate quali il fotovoltaico e l'eolico, ha un potenziale enorme, e con una giusta politica energetica potrebbe dare il suo grosso contributo all'energia ottenuta da fonti rinnovabili.

Elemento fondamentale dell'energia geotermica è il calore terrestre; conoscere la sua origine, la sua distribuzione in superficie e le modalità di propagazione è di essenziale importanza per il suo sfruttamento.

Calore della Terra

Origine del calore terrestre

Il calore proveniente dall'interno della terra è dovuto in primo luogo al calore primordiale, generatosi nella fase di formazione e accrescimento del pianeta che, per attrazione gravitazionale, attira su di sé polveri e gas costituenti il disco d'accrescimento che lo circonda. Dopodiché, con la materia in uno stato prossimo alla fusione, si ha un enorme rilascio di calore per effetto della differenziazione del nucleo: gli elementi più pesanti, per effetto della gravitazione, si spostano verso il centro del pianeta. Infine è il fenomeno del decadimento radioattivo di elementi instabili a causare l'aumento di temperatura. Durante il decadimento un isotopo radioattivo si trasforma in un elemento più leggero rilasciando energia, tramite l'emissione di particelle α, β, γ o sotto forma di energia cinetica ceduta ai prodotti minori, che viene prontamente assorbita sotto forma di calore.

I più importanti processi di decadimento che contribuiscono al bilancio termico della Terra sono²:

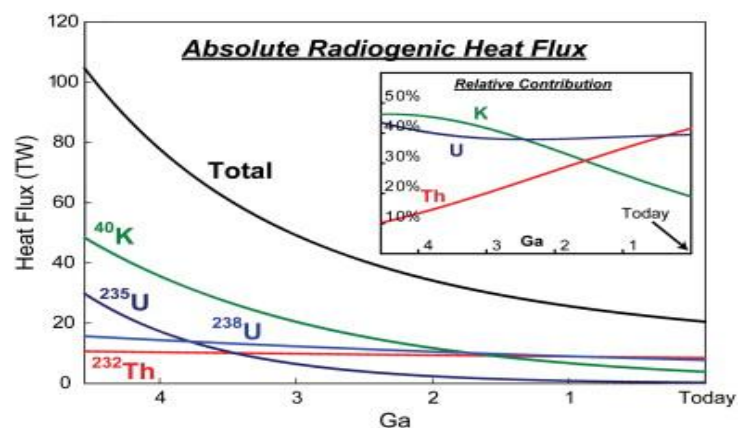
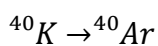
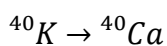
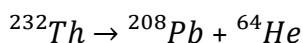
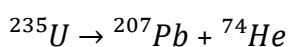
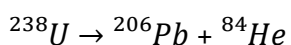


Figura 1: Principali decadimenti degli isotopi radioattivi(Uranio, Torio , Potassio) e tasso di produzione di calore nel mantello in funzione del tempo.

Fonte: <http://www.geo.mtu.edu/~hamorgan/bigideaswelcome.html>

Oggi il contributo più importante è dato dalle catene di decadimento dell'uranio 238 con abbondanza isotopica pari al 99,28%, e quella del torio 232 con abbondanza isotopica pari al 100%; il contributo dell'uranio 235 è trascurabile poiché la sua abbondanza isotopica è pari allo 0,72%.

Per quanto riguarda il potassio, l'unico isotopo radioattivo è il potassio 40, che pur avendo un abbondanza isotopica relativa bassissima, pari allo 0,0167%, dà un contributo non trascurabile, secondo i valori del Bulk Silicate Earth Model, poiché la massa del potassio supera di cinque ordini di grandezza quella dell'uranio. La figura 1 mostra il tasso di produzione di calore degli isotopi radioattivi nel mantello partendo da 4,5 miliardi di anni fa fino ad arrivare ad oggi; è evidente quanto, in passato, il contributo dell'uranio 235 e del potassio 40 fosse importante, e dato che il processo di raffreddamento della terra è molto lento, il flusso di calore registrato in superficie è dovuto anche a elementi che ad oggi sono presenti in percentuali piccole o in tracce.

Il decadimento si conclude con la formazione di un prodotto finale attraverso una catena di nuclei intermedi e l'emissione di antineutrini elettronici, chiamati geoneutrini. La misura del flusso di geoneutrini è fondamentale per avere informazioni sull'origine del calore terrestre e a rilevare la distribuzione e l'abbondanza relativa degli elementi radioattivi presenti all'interno della terra. Anche a tale scopo sono in funzione rilevatori di geoneutrini, tra cui il laboratorio italiano del Gran Sasso³.

Dalle numerose misure del flusso di calore eseguite in punti sparsi su tutto il globo risulta che i continenti emettono calore ad un tasso medio di $56,5 \text{ mW/m}^2$, mentre i fondali oceanici emettono mediamente $78,2 \text{ mW/m}^2$. Tenendo conto della superficie delle piattaforme continentali e della superficie degli oceani, la Terra emette complessivamente un flusso medio di calore pari a 70 mW/m^2 .

Se la Terra fosse in regime stazionario, il calore emesso dovrebbe essere pari a quello prodotto dai radionuclidi presenti all'interno della Terra.

Considerazioni di natura geochimica (convalidati da studi sperimentali sulle meteoriti) portano ad escludere la presenza di significative concentrazioni di radionuclidi nel nucleo. Di conseguenza, il calore della Terra viene prodotto essenzialmente da crosta e mantello.

Il calore complessivo emesso dalla Terra è $Q_T = 3,55 \cdot 10^{13} \text{ W}$. Il calore prodotto dalla crosta oceanica è trascurabile. Mentre la crosta continentale, pur avendo una massa trascurabile

rispetto a quella del mantello, produce una notevole quantità di calore, dovuto soprattutto alla sua composizione granitica, e quindi ricca di radionuclidi.

La crosta continentale produce attualmente $Q_C = 4,6 \cdot 10^{12} \text{W}$, che ammonta a circa il 13% del calore prodotto da tutta la Terra. Quindi il calore prodotto per unità di tempo dal solo mantello vale $Q_M = Q_T - Q_C$. Tuttavia bisogna considerare solo l'80% di questo valore in quanto la Terra non è in equilibrio termico. La produzione di calore in passato era più elevata di quanto non sia attualmente e la Terra si sta progressivamente raffreddando.

Si stima che circa il 20% del flusso di calore sia imputabile al raffreddamento dell'interno della Terra, sicché la produzione attuale di calore nel mantello è pari a $Q_M = 2,47 \cdot 10^{13} \text{W}$, circa il 70% del calore totale⁴.

Propagazione del calore

La propagazione del calore avviene in modo diverso a seconda delle proprietà fisiche dello strato considerato.

Nella litosfera, parte solida esterna del pianeta costituita dalla crosta e dalla porzione superficiale del mantello superiore, il calore si propaga per conduzione.

Nel mantello superiore troviamo materia allo stato liquido che presenta un deciso moto convettivo dovuto alla bassa viscosità; invece, l'elevata viscosità del mantello inferiore crea un regime convettivo molto lento per poi diventare vorticoso nel nucleo esterno liquido.

Radiazione solare

Il flusso di energia incidente sulla superficie esterna dell'atmosfera è di 1360 W/m^2 ed è detto costante solare, anche se è soggetto a modeste variazioni nel tempo: la geometria dell'orbita terrestre dà luogo a variazioni stagionali, il ciclo solare a variazioni undicennali.

Solo il 51% dell'energia solare è assorbita dal suolo (29% diretta, 22% diffusa) mentre circa il 30% (la cosiddetta albedo) viene riflessa nello spazio (4% dal suolo, 6% dall'atmosfera, 20% dalle nubi). Il restante 19% è assorbita dall'atmosfera (16%) e dalle nubi (3%). Il sistema Terra-atmosfera assorbe quindi il 70% della radiazione solare. Il processo di assorbimento della radiazione solare da parte dell'atmosfera, dovuto alla presenza di vapore acqueo, anidride carbonica e ozono, contribuisce ad elevare notevolmente la temperatura della Terra; se questo

processo, chiamato effetto serra, non avesse luogo la temperatura terrestre sarebbe di circa 40°C più bassa dell'attuale⁵.

Per quanto attiene alla geotermia a bassa entalpia è importante conoscere l'andamento delle temperature a profondità relativamente basse e gli effetti delle variazioni climatiche sulla superficie terrestre.

Effetto in profondità di variazioni periodiche della temperatura in superficie

L'equazione del calore è la seguente:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + \rho H$$

H è il calore prodotto per unità di tempo ed unità di massa di una sostanza e si misura in W/kg, k è la costante di conducibilità termica, c_p e ρ sono rispettivamente il calore specifico e la densità del materiale dello strato considerato.

La trasmissione del calore nella parte solida della Terra avviene per conduzione e dato che il regime stazionario nei continenti è raggiunto dopo un tempo $t_d = 300$ Ma, tempo molto inferiore alla età tipica dei continenti, nello studio delle geotermie continentali la temperatura media è descritta dall'equazione stazionaria:

$$k \nabla^2 T + \rho H = 0$$

Le deviazioni dalla temperatura media (dovute alle variazioni diurne, stagionali, climatiche) in un mezzo solido in quiete sono descritte dalla seguente equazione di diffusione:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \nabla^2 T, \quad D = \frac{k}{\rho c_p}$$

Il coefficiente di diffusività termica D vale tipicamente $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ per le rocce e quindi i fenomeni transienti saranno importanti se consideriamo temperature variabili su intervalli temporali inferiori al tempo caratteristico di diffusione $t_d = \frac{L^2}{D}$, con L distanza caratteristica lungo la quale si ha una variazione di temperatura ΔT .

Il ciclo diurno di riscaldamento della superficie terrestre da parte della radiazione solare, oppure il ciclo annuale (stagionale), o più in generale i cicli climatici associati alle variazioni dei parametri orbitali terrestri e alle glaciazioni, possono essere considerati come riscaldamento di un corpo da parte di una sorgente esterna, modulata armonicamente nel tempo. Consideriamo quindi la seguente equazione con le condizioni al contorno:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{c_p} H(z) & \text{in } z \geq 0, \forall t \\ T(z=0, t) = T_s + \Delta T \cos \omega t \\ \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=\infty} = \frac{1}{k} q_\infty \end{cases}$$

dove T_s è la temperatura media alla superficie, ΔT è costante, q_∞ il flusso di calore a grande profondità.

La soluzione del sistema, ci dà la variazione della temperatura in funzione della profondità e della durata della sorgente esterna:

$$T(z, t) = T_0(z) + \Delta T e^{-\frac{z}{\delta}} \cos \left(\omega t - \frac{z}{\delta} \right)$$

dove $T_0(z)$ è la temperatura media (nel tempo) del mezzo, $\delta = \sqrt{\frac{2D}{\omega}}$ è lo “spessore di penetrazione” (skin depth).

Questa soluzione, estremamente semplice, si presta ad interessanti considerazioni:

- l'ampiezza delle variazioni diminuisce esponenzialmente all'aumentare della profondità;

- l'andamento con la profondità è governato da un fattore di scala δ proporzionale alla radice quadrata del periodo $\frac{2\pi}{\omega}$ le oscillazioni di lungo periodo penetrano più in profondità di quelle a corto periodo;
- le variazioni in profondità sono sfasate rispetto alla superficie con un ritardo proporzionale alla profondità stessa⁶.

Gradiente geotermico

Il fatto che la temperatura aumenta con la profondità è un fenomeno noto da tempo, registrato con le prime miniere di carbone che raggiungevano profondità anche di mille metri, ma l'ipotesi che l'interno della terra fosse a temperature molto alte era già nata con l'osservazione dei più comuni fenomeni di origine vulcanica.

Il gradiente geotermico misura la variazione della temperatura con l'incremento della profondità, il cui andamento è dato dalla geoterma terrestre. Nei primi 30 Km la temperatura aumenta rapidamente fino a raggiungere i 600°C, con un gradiente medio di $30 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Km}}$ per poi diminuire fino a $8 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Km}}$ alla base della crosta, ma può variare sensibilmente in funzione della posizione in cui ci troviamo.

Scendendo dalla superficie terrestre fino ad una certa profondità (normalmente variabile fra 5 – 20 m) la temperatura misurabile varia durante l'anno in funzione della temperatura climatica media, fino ad una profondità dove la temperatura registrata rimane costante per tutto l'anno con un valore pari alla temperatura media annuale locale. Tale superficie è detta di omotermia. La temperatura del sottosuolo a basse profondità può discostare dalla temperatura media locale in presenza di: infiltrazioni d'acqua fredda, permafrost (suolo ghiacciato perennemente, o da almeno due anni) e anomalie geotermiche.

Entalpia

In un sistema termodinamico l'entalpia è una funzione di stato (funzione che non dipende dalla particolare trasformazione) pari: $H = U + pV$

dove U è l'energia interna, p la pressione e V il volume del sistema. L'entalpia nel sistema internazionale è espressa in Joule.

In geotermia l'entalpia esprime il contenuto energetico del fluido vettore, e in linea di massima indica le potenzialità del serbatoio geotermico. L'entalpia è proporzionale alla temperatura e permette una prima importante classificazione dei sistemi geotermici.

Gli intervalli di temperatura associati alla bassa, media e alta entalpia sono molteplici, una pratica classificazione definisce le risorse più adatte alla generazione di elettricità come alta entalpia, quelle più adatte all'uso diretto del calore come bassa entalpia.

Sistemi geotermici

Un generico sistema geotermico è definito da tre elementi: una **sorgente di calore**, un **serbatoio** e un **fluido vettore**.

Nella crosta terrestre esistono zone privilegiate caratterizzate da valori del gradiente geotermico decisamente più alti di quello medio; questo fenomeno, detto anomalia geotermica, è dovuto alla presenza di intrusioni magmatiche che raggiungono profondità di 5-10 Km. Le masse magmatiche, che possono essere fluide o solide in via di raffreddamento, costituiscono la sorgente geotermica.

L'energia termica accumulata in queste aree viene resa disponibile a profondità accessibili da vettori termici chiamati fluidi geotermici.

I fluidi, costituiti essenzialmente da acque meteoriche, penetrano nel sottosuolo e a contatto con il complesso di rocce calde si riscaldano formando acquiferi che raggiungono temperature superiori ai 300°C.

Quest'area, costituita da rocce permeabili calde sature di acqua, ricoperta da uno strato impermeabile, forma il serbatoio geotermico. Generalmente il serbatoio è connesso ad una zona di ricarica di acque superficiali e contiene anche vapore e gas incondensabili. Talvolta i fluidi, contenuti nei serbatoi, possono dar origine a manifestazioni geotermiche naturali,

raggiungendo spontaneamente la superficie formano: geysers, fumarole, sorgenti calde, soffioni, ecc.

Classificazione dei sistemi geotermici

I sistemi geotermici vengono classificati in base alle diverse caratteristiche, una prima importante suddivisione viene fatta tra sistemi geotermici ad **acqua dominante** e sistemi geotermici a **vapore dominante** (o a vapore secco). Nei sistemi ad acqua dominante, l'acqua liquida è la fase continua, che controlla la pressione. Il vapore può essere presente, in forma di bolle. Questi sistemi geotermici, la cui temperatura può andare da 125°C a più di 225°C, sono i più diffusi nel mondo. Essi possono produrre, in funzione della loro temperatura e pressione, acqua calda, una miscela di acqua e vapore, vapore umido e, in alcuni casi, vapore secco. Per vapore umido s'intende vapore che coesiste con l'acqua in equilibrio termodinamico con essa. Mentre si chiama vapore secco il fluido presente totalmente nello stato di vapore. Sia il vapore umido che il vapore secco prendono il nome di vapore saturo. Infine, se si aumenta la temperatura sino a superare la temperatura di evaporazione, per esempio a 120°C, avremo vapore surriscaldato.

Nei sistemi a vapore dominante normalmente coesistono vapore, che costituisce la fase continua e controlla la pressione, e l'acqua. Sono sistemi ad alta temperatura e normalmente producono vapore secco o surriscaldato. I sistemi geotermici di questo tipo sono piuttosto rari; i più conosciuti sono: "Larderello" in Italia e "The Geysers" in California.

Un'altra suddivisione dei sistemi geotermici è basata sullo *stato di equilibrio del serbatoio*, che tiene conto della circolazione dei fluidi e dello scambio termico nel serbatoio.

Nei **sistemi dinamici** l'acqua ricarica in continuazione il serbatoio, si riscalda e poi o raggiunge la superficie o si disperde nel sottosuolo stesso. Il calore è acquisito dal sistema per conduzione e per effetto della circolazione dei fluidi. Nei **sistemi statici** la ricarica del serbatoio è molto ridotta o nulla e lo scambio termico avviene soltanto per conduzione⁷.

Il calore terrestre pur essendo in quantità praticamente inesauribile, risulta molto disperso e solo in rari casi concentrato. Come detto prima, la principale differenza fatta tra i sistemi geotermici è tra quelli ad alta e bassa entalpia, dipendente essenzialmente dalla temperatura

del serbatoio termico, fattore che ne determina l'utilizzo finale: produzione di energia elettrica o climatizzazione.

Sistemi geotermici ad alta entalpia

Un uso indiretto delle risorse geotermiche permette, tramite gli impianti geotermici ad alta entalpia, la produzione di corrente elettrica. L'Italia ha un' antica tradizione in questo campo e, anche se quello che si è fatto fin ora è poco rispetto alle potenzialità di un Paese ricco di anomalie termiche, costruisce centrali all'avanguardia come quelle del complesso di Larderello e del monte Amiata, in Toscana. Il geotermico ad alta entalpia costituisce per molti paesi un importante contributo alla produzione di energia elettrica da rinnovabile, e lo diventerà per molti altri nei prossimi anni. Grandi anomalie geotermiche si trovano in particolare nelle regioni prossime ai confini tra placche(e.g. l'Islanda), dove il gradiente geotermico può essere nettamente superiore al valore medio.

Per l'immediato futuro, i più grandi progetti riguardano alcuni Paesi situati nei pressi della "cintura di fuoco"(Indonesia, Filippine) e della Rift Valley (Kenia, Etiopia).

Tipologia d'impianti

A seconda delle caratteristiche delle risorse geotermiche disponibili gli impianti si dividono in: **impianti convenzionali** e **impianti binari**.

Gli impianti convenzionali richiedono fluidi con una temperatura di almeno 150°C, possono essere a **contropressione** (con scarico diretto nell'atmosfera) e a **condensazione**. Gli impianti a contropressione sono facilmente realizzabili e meno costosi. Il vapore è prelevato, direttamente dai pozzi, se questi producono vapore secco, oppure dopo la separazione della parte liquida, se i pozzi producono vapore umido. Dopodiché il vapore viene convogliato nella turbina e scaricato nell'atmosfera dopo aver attraversato una serie di filtri che riducono al minimo i gas presenti in esso. Invece negli impianti a condensazione il vapore uscente dalla turbina viene recuperato per lo sfruttamento del calore residuo ed infine l'acqua ottenuta iniettata nel sottosuolo.

Con gli impianti a contropressione il consumo di vapore per kilowattora prodotto, a parità di pressione, è circa il doppio di quello di un impianto a condensazione, tuttavia questi impianti sono molto utili come impianti pilota e come impianti temporanei collegati a pozzi isolati di portata modesta. Questi impianti, generalmente di piccole dimensioni, hanno una potenza di 2-5 MWe (We sta per W elettrico), mentre quelli a condensazione generalmente hanno una potenza di 55–60 MWe, ma recentemente sono stati costruiti anche impianti da oltre 100 MWe. I notevoli progressi, realizzati negli ultimi decenni, nella tecnologia dei cicli binari hanno reso possibile produrre elettricità, sfruttando fluidi geotermici a temperatura medio-bassa.

Gli impianti binari utilizzano un fluido secondario di lavoro, di solito butano o pentano, che ha un basso punto di evaporazione, ed un'elevata pressione di vapore a bassa temperatura, rispetto al vapore acqueo. Il fluido di lavoro viene vaporizzato a contatto col fluido geotermico caldo, che viene poi reiniettato nel terreno. Il fluido di lavoro viene poi raffreddato e riutilizzato. Il sistema è quindi completamente chiuso, senza emissioni in atmosfera. Gli impianti binari sono di solito costruiti in unità modulari di potenza compresa tra poche centinaia di kWe ed alcuni MWe. Queste unità possono essere collegate l'una con l'altra in modo da formare impianti della potenza di qualche decina di megawatt. Questi impianti sono più economici di quelli tradizionali ma la loro efficienza è decisamente più bassa⁸.

Vale la pena citare una tecnica, chiamata **Hot Dry Rock (HDR)**, per la creazione di centrali geotermiche là dove è presente solo la sorgente termica, mentre il fluido e il serbatoio sono artificiali. Acqua ad alta pressione viene pompata attraverso condotti, fatti tramite trivellazione, in un corpo di roccia calda e compatta, provocandone la fratturazione idraulica. L'acqua, attraversa le fratture artificiali, estrae il calore dalle rocce, e mediante un secondo pozzo viene estratta. Tale tecnologia è ancora in fase sperimentale, sono attivi diversi progetti HDR nel mondo, tra cui il progetto europeo in Alsazia (Francia), che sembra anche quello di maggior successo.

La situazione in Italia e nel mondo (geotermia ad alta entalpia)

I Paesi guida per lo sfruttamento dell'energia geotermica sono: Usa, Nuova Zelanda, Italia, Islanda, Messico, Filippine, Indonesia e Giappone. Gli Stati Uniti sono leader mondiale con una potenza geotermica installata di 3.086 MWe, seguiti dalle Filippine con una potenza installata

di 190 MWe. Il paese europeo geotermico per eccellenza è l'Islanda: eppure l'Italia ha una potenza installata di 843 MWe contro i 575 MWe dell'Islanda. Quello che differenzia i due Paesi, oltre al contributo della geotermia al fabbisogno nazionale (25% Islanda, 1,5% Italia) è soprattutto l'aumento di potenza installata, negli ultimi 5 anni in l'Italia è stato minore del 10% , mentre in l'Islanda si è avvicinato al 200%.

Geotermia a bassa entalpia

In assenza di anomalie geotermiche il calore geotermico è utilizzato in modo diretto per la produzione di energia termica, prestandosi a numerosi impieghi: climatizzazione domestica, teleriscaldamento, uso termale, uso industriale, uso agricolo e zootecnico.

Questo studio andrà ad analizzare le caratteristiche, la diffusione e le potenzialità dei sistemi a bassa entalpia con pompa di calore, detti GSHP (Ground Source Heat Pump). Talvolta tali sistemi sono chiamati a “bassissima entalpia” proprio perché il loro funzionamento si basa sullo sfruttamento di sorgenti con temperature anche di 10°C.

I sistemi GSHP sono riconosciuti a livello mondiale come la più efficiente e pulita tecnologia per la climatizzazione di edifici di svariata grandezza: da piccole utenze a centri commerciali.

Il principio di funzionamento di un GSHP è estremamente semplice. Il sottosuolo al di sotto della superficie di omotermia (15-20m) non subisce più l'influenza delle variazioni giornaliere, stagionali e climatologiche; la temperatura a queste profondità, a meno di piccole oscillazioni (decimi di grado), resta costante nel tempo.

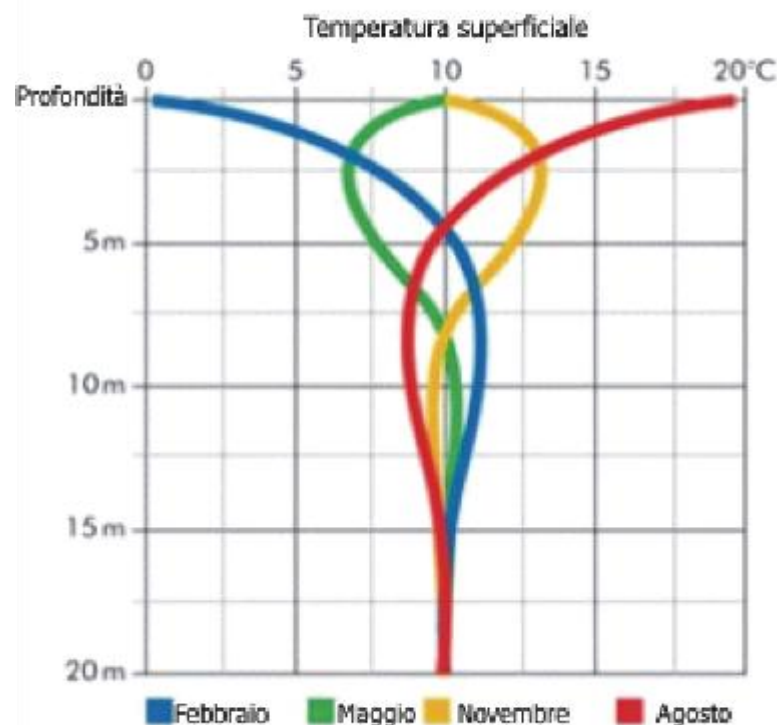


Figura 2: andamento teorico della temperatura in funzione della profondità in diversi mesi dell'anno. Si noti che a circa 15 metri di profondità la temperatura raggiunge un valore pressoché costante.

Fonte: <http://www.geoinsubrica.it/geotermia.htm>

Questo tipo di risorsa è presente in qualsiasi luogo della terra, con valori di temperatura pari alla media stagionale del luogo considerato, quindi le variazioni da un luogo all'altro sono dovute essenzialmente alla latitudine e alla presenza di anomalie geotermiche.

Un impianto geotermico tradizionale è costituito principalmente: da un **sistema di captazione di calore** in cui scorre un fluido termovettore, da una **pompa di calore** e da un **sistema di accumulo e distribuzione del calore**. Uno dei vantaggi di un sistema GSHP è che permette con un solo impianto quello che solitamente viene fatto con due: il riscaldamento e il raffrescamento di un edificio.

In inverno la terra cede calore al fluido termovettore che, tramite la pompa di calore, viene trasferito all'edificio, riscaldandolo; il fluido viene reimpresso nel sottosuolo a temperatura più bassa di quella iniziale.

In estate il processo è inverso, il calore dall'edificio passa al fluido tramite la pompa di calore, raffrescando l'edificio. Il fluido caldo circolando nel sottosuolo si raffredda, e il ciclo si ripete.

Sistema di captazione del calore

Si tratta di un sistema di scambiatori di calore solitamente costituiti da tubature di polietilene, che assorbono o cedono calore a contatto con il sottosuolo o l'acquifero. Lo scambio termico tra fluido circolante e sorgente di calore può essere realizzato mediante due diverse tecnologie: attraverso il sistema a circuito chiuso (**closed loop**), oppure attraverso un sistema aperto ad acqua di falda (**open loop**). L'impatto energetico, economico ed ambientale delle due tecnologie risulta alquanto differente e lo riprenderemo in seguito per ulteriori considerazioni.

Per quanto riguarda il sistema a circuito chiuso, le sonde possono essere interrato verticalmente nel terreno a grandi profondità (sonde geotermiche verticali), oppure orizzontalmente a circa 2 metri di profondità (sonde o collettori orizzontali).



Figura 3:rispettivamente: sonde geotermiche verticali e orizzontali closed loop; sistema open loop.
 Fonte: <http://www.geoinsubrica.it/geotermia.htm>

Le **sonde geotermiche verticali** permettono di sfruttare lo spazio in profondità quindi non hanno bisogno di ampia superficie d'applicazione. Una sonda geotermica verticale, posta tramite trivellazione ad una profondità che va dai 70 ai 150 m, è cementata con una miscela di bentonite, un materiale argilloso che rende più efficiente lo scambio di calore. Essa è composta da una o più coppie di tubi in polietilene, a forma di U, in modo da formare un circuito chiuso (andata-ritorno), all'interno dei quali circola un fluido composto da acqua e antigelo (non tossico). Le sonde vengono collegate in superficie ad una pompa di calore tramite un collettore.

Tra i sistemi closed loop troviamo anche le fondazioni energetiche (o pali energetici); questa tecnologia è uguale alla precedente tranne che per un aspetto: in edifici che richiedono fondazioni su pali, i tubi in polietilene vengono fissati nella gabbia d'armatura. Si dovrà però evitare che la temperatura di questo fluido scenda al di sotto di 0°C, in quanto si potrebbero avere ripercussioni statiche e geotecniche. Il diametro dei pali può variare da 40 cm a oltre 1m. Il vantaggio maggiore di queste applicazioni è la notevole riduzione del costo di installazione, in quanto viene eliminato il costo di perforazione. L'aspetto negativo è una diminuzione della resa termica.

Le **sonde geotermiche orizzontali** sono più economiche e di più facile installazione rispetto a qualsiasi altro sistema. Esse sono poste a profondità di circa 2 metri e sono costituite da tubi in polietilene ad alta densità o in alternativa in rame con una protezione esterna, all'interno dei quali circola acqua e antigelo. Le sonde vengono poste nel terreno secondo diverse disposizioni (areale, in trincee, a spirale) e collegate in superficie ad una pompa di calore tramite un collettore.

Indicativamente per un edificio con una superficie di circa 100 metri quadrati sono necessari circa 120–150 metri quadrati di superficie di captazione. L'installazione delle sonde geotermiche non crea alcun tipo di alterazione nel terreno.

I **sistemi open loop** prelevano direttamente acqua dall'acquifero e tramite una pompa di calore scambiano energia termica con l'edificio. Tale sistema fornisce generalmente dei risultati di resa migliori rispetto alle sonde geotermiche verticali, infatti, con portate sufficienti si ottiene la potenza termica necessaria con un numero molto inferiore di perforazioni, risultando in questo modo decisamente più economico. Un pozzo geotermico di estrazione va in genere ad intercettare una falda acquifera, l'acqua viene estratta da un pozzo, detto di estrazione o di adduzione, attraversa la pompa di calore e viene reimpressa in un altro pozzo, detto di reimmissione. I due pozzi devono essere posti ad una distanza tale da rendere minima la corto-circuitazione, fenomeno che consiste nel prelevare parte dell'acqua reimpressa. La corto-circuitazione oltre ad abbassare l'efficienza dell'impianto può provocare un anomalo aumento di temperatura nel sottosuolo.

Impatto ambientale

I sistemi geotermici a bassa entalpia sono molto sicuri, puliti ed inoltre non hanno impatto estetico, in quanto invisibili.

Tuttavia imprevisti dovuti ad errori in fase di progettazione, costruzione o condizioni climatiche estreme, possono provocare problemi all'ambiente circostante.

Per quanto riguarda i sistemi closed loop, la terra satura d'acqua può gelare a ridosso delle sonde, oppure è direttamente l'acqua nelle sonde a gelare in seguito ad un sottodimensionamento dello scambiatore, provocando un aumento di pressione e rottura della tubazione. La miscela acqua-antigelo che fuoriesce crea danni al terreno circostante nel caso delle sonde orizzontali, mentre nelle sonde verticali la perdita è contenuta dal cemento che le ricopre. I danni d'impatto maggiore possono verificarsi durante la perforazione: 1. due falde sovrapposte possono essere messe in comunicazione; 2. possono essere sversati inquinanti nella falda; 3. si può avere un lieve intorbidimento dell'acqua.

La situazione è più delicata per i sistemi open loop in quanto, essendoci un contatto diretto tra la falda acquifera e l'ambiente esterno, ci sono limitazioni legislative più rigide per la tutela dell'acquifero e dell'ambiente circostante. Per quanto riguarda la fase di trivellazione del pozzo i problemi restano quelli visti in precedenza, in più, oltre a dover mettere al sicuro l'acqua da qualsiasi contaminazione esterna, in tutto il suo percorso, bisogna fare in modo che l'acqua reimpressa non modifichi la temperatura dell'ambiente circostante, con possibili alterazioni della microflora o microfauna.

Prima di procedere alla realizzazione dell'impianto, si effettua la stratigrafia e la stesura di una relazione geologica del sito in esame, per accertarsi dei requisiti necessari che il terreno deve possedere. Solitamente nella fase di verifica della fattibilità del progetto vengono utilizzate stratigrafie di aree a ridosso dell'area interessata, spesso effettuate durante una eventuale bonifica o ispezione per la ricerca di idrocarburi, dopodiché, se il progetto è fattibile si provvede al campionamento e alla costruzione di un impianto pilota.

I parametri e le dimensioni dell'impianto dipendono da:

- luogo di installazione (temperatura media esterna);
- caratteristiche specifiche del terreno (calore specifico, conducibilità termica, umidità, densità);
- volume e isolamento termico dell'edificio;
- temperatura necessaria per il sistema di riscaldamento e/o raffrescamento (potenza richiesta);

La pompa di calore geotermica

La pompa di calore geotermica viene installata all'interno degli edifici, costituisce il centro del sistema e fa da mediatore tra le sonde e i radiatori. Consente infatti di trasferire calore dal terreno o dall'acqua all'ambiente interno, in fase di riscaldamento, e di invertire il ciclo nella fase di raffrescamento.

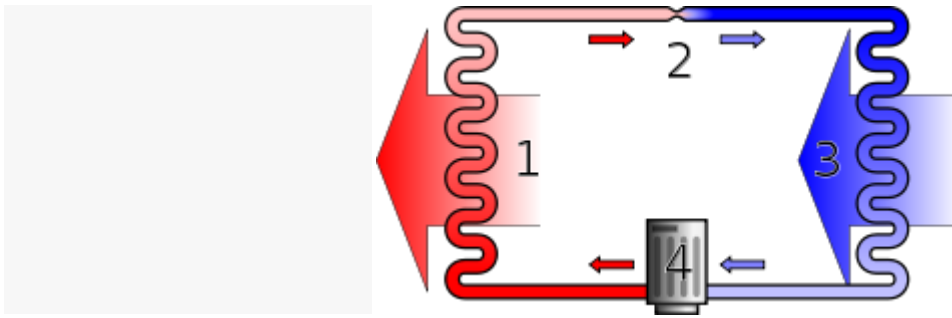


Figura 4: schema pompa di calore:

1 condensatore – 2 valvola di laminazione – 3 evaporatore – 4 compressore.

Fonte: http://it.wikipedia.org/wiki/Pompa_di_calore

Principio di funzionamento:

Il fluido di refrigerazione attraversa l' evaporatore, e trovandosi ad una più bassa pressione, evapora e assorbe calore; il compressore spinge il gas nel condensatore con aumento di pressione, il fluido condensa rilasciando il calore assorbito e in uno stato liquido-vapore attraversa la valvola di laminazione ritornando all'evaporatore: il ciclo si ripete.

La resa di un GSHP dipende dal coefficiente di prestazione Cop uguale al rapporto tra l'energia termica ottenuta e l'energia elettrica consumata. Il Cop ha un valore medio annuo che varia tra 4 e 6¹⁰. Ciò significa che per ogni kWh elettrico consumato si producono dai 4 ai 6 kWh termici. La pompa di calore è solitamente più efficiente nel riscaldamento che nel raffreddamento, dato che la macchina dissipa sempre una parte di energia in calore. Le pompe di calore fanno parte delle tecnologie rinnovabili che stanno avendo sempre più successo nel mercato europeo; nonostante abbiano bisogno di energia elettrica per funzionare, il bilancio energetico è largamente positivo.

Sistema di accumulo e distribuzione del calore

Affinché questo metodo di sfruttamento dell'energia geotermica sia vantaggioso dal punto di vista economico, sono necessari impianti di riscaldamento a bassa temperatura, ad es. a pavimento, a parete, a soffitto. I pannelli radianti sono la più efficiente tecnologia impiantistica: in inverno fanno circolare acqua calda a circa 30°C e in estate acqua fredda a

circa 20°C. I tradizionali impianti di riscaldamento utilizzati lavorano a temperature maggiori di 40°C , pur essendo in qualche modo utilizzabili per il riscaldamento, risultano assolutamente inadatti per raffrescare gli ambienti.

La presenza di un **serbatoio di accumulo** per l'acqua calda risulta indispensabile per immagazzinare il calore per poi utilizzarlo per il riscaldamento e per gli usi sanitari¹¹.

La scelta della tecnologia più appropriata è fatta in base alle caratteristiche geologiche e climatiche del sito d'installazione, ed ovviamente, anche in funzione della potenza desiderata e della superficie a disposizione.

Pro e contro

Lo svantaggio più grande per i sistemi GSHP è principalmente il costo. La spesa è rappresentata in gran parte dalle trivellazioni per la posa di sonde o per la creazione di pozzi, e dal costo della pompa di calore.

Un altro difetto è che tali sistemi non sono indipendenti ma devono essere accoppiati ad altri sistemi di generazione elettrica per il funzionamento delle pompe. Però questo è compensato dal fatto che le spese di gestione e manutenzione sono minime e l'investimento iniziale può essere recuperato in 5-8 anni.

Tra i vantaggi oltre a quelli già citati, sostenibilità, impatto ambientale pari a zero, unico sistema riscaldamento/raffrescamento, costo di manutenzione minimo, troviamo: la sicurezza, in quanto non si ha a che fare con fluidi infiammabili quali sono i combustibili, e rumorosità minima. Ma senza dubbio, l'elemento che più di tutti lo porta a fare un passo avanti rispetto alle altre fonti rinnovabili è l'assenza di fluttuazione della potenza, dovuta a fattori esterni. La produzione di energia termica non ha il problema dell'intermittenza, dovuto a cambiamenti climatici, la sorgente termica resta costante su scala temporale di gran lunga più grande di quella della vita di un uomo.

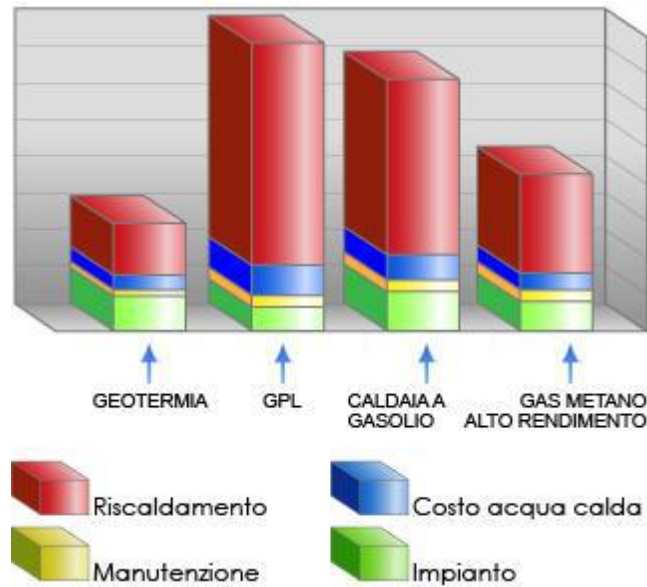


Figura 5: confronto tra i costi dei più comuni sistemi di riscaldamento.

Fonte: <http://www.impianti-geotermici.it/>

Costo e risparmio

A fronte di un sostanziale costo iniziale, il sistema GSHP ha dalla sua parte un considerevole abbattimento dei costi di esercizio. Grazie alle moderne tecnologie il rendimento di un impianto di questo tipo è molto alto e questo permette, in relazione con altre fonti utilizzabili per il riscaldamento, un beneficio economico del 60% rispetto ai tradizionali impianti a metano, e dell'80% rispetto ai sistemi a gasolio o GPL.

La produzione di acqua calda permette di risparmiare circa il 30% durante l'inverno, mentre durante l'estate la produzione è gratuita, in quanto l'acqua viene riscaldata (a circa 60 – 70°C) utilizzando il calore sottratto all'edificio per la climatizzazione. Per farsi un'idea economica sui sistemi GSHP, in un'abitazione di 100 m², il costo dell'impianto è di circa 10.000 - 25.000 €, a seconda delle condizioni geologiche e del tipo di impianto (a sonde verticali il costo è più elevato), quindi del tutto paragonabile a quello di un impianto tradizionale a gasolio, metano o GPL, a parità di superficie radiante installata. La pompa di calore costa poco più di una buona caldaia, e il costo maggiore è la realizzazione dell'impianto di distribuzione. I risparmi energetici permettono di ammortizzare il costo iniziale in circa 5 anni¹².

Diffusione in Europa e in Italia

Il numero di sistemi GSHP è aumentato costantemente nel corso degli ultimi anni. Per alcuni paesi il GSHP è già considerato un'opzione più che valida; tuttavia solo una piccola parte del suo potenziale viene attualmente utilizzata in Europa.

La diffusione di tale tecnologia non è equa: in Svezia, in Francia e in Germania, sono installate circa 600.000 pompe di calore delle circa 800.000 installate in tutta Europa. La crescita di installazioni in questi Paesi è importante, negli ultimi anni infatti si sono stimate crescite nell'ordine del 30-40 % (tra geotermiche e aerotermiche).

Nel nostro Paese invece la diffusione ancora molto limitata. In Italia sono stimate meno di 10.000 installazioni residenziali, un numero inferiore di quante ne sono state realizzate ad esempio in Belgio, Paese 10 volte meno esteso e con una popolazione 6 volte minore che l'Italia. Ovviamente una buona spinta all'utilizzo di nuove tecnologie ad elevata efficienza ma con ancora poca diffusione viene dagli incentivi e dalle agevolazioni statali, che hanno lo scopo di favorire l'utilizzo di apparecchiature a basso consumo e a basse emissioni inquinanti.

In Italia, le pompe di calore installate nel residenziale, grazie ai benefici delle agevolazioni fiscali (55 % sulle spese di acquisto e installazione di pompe di calore) introdotte con la Finanziaria del 2007, hanno iniziato a dare i loro primi interessanti risultati nel 2009 e nel 2010¹⁰. Attualmente in Italia sono stimati 850 MWt di potenza installata per uso diretto, dei quali il 10% per le pompe di calore, 27% per teleriscaldamento, 16% per acquacoltura, 13% per le serre, 1% per usi agricoli e industriali e 32% per usi termali e balneologia¹³.

Global GSHP Installed Capacity (MWt)

6 Largest Countries

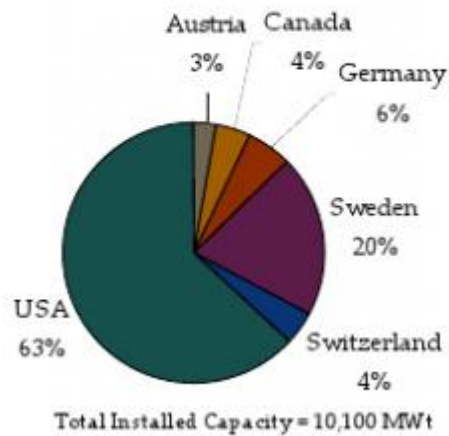


Figura 6: Capacità GSHP installata nel mondo.

Fonte: <https://www.geothermalgenius.org/blog/geothermal-heat-pumps-in-the-u-s-and-europe>

Si conclude col mostrare la distribuzione dei sistemi GSHP nel mondo. Gli USA sono leader mondiali seguiti dalla Svezia, ma è importante sottolineare che è la Svizzera ad avere la più alta percentuale di potenza installata procapite con sistemi GSHP.

2.STUDIO DI FATTIBILITÀ

Premessa

L'installazione e il funzionamento delle sonde geotermiche o dei pozzi di presa e di reimmissione può produrre alterazioni sull'ambiente circostante e nella falda acquifera. Questa eventualità va valutata con molta attenzione, non solo per non violare le leggi e i regolamenti esistenti in materia, ma soprattutto perché un cambiamento dell'equilibrio preesistente può dare vita a una catena di eventi, il cui effetto è difficilmente individuabile in anticipo. Nell'installazione di sistemi geotermici open loop è importante tenere sotto controllo la temperatura, la depressione in prossimità del pozzo di presa e il drenaggio delle acque di reimmissione. Lo studio di fattibilità permette di individuare e analizzare gli elementi caratterizzanti il sistema geotermico, in modo tale da impedire che anomalie di qualsiasi tipo portino ad alterazioni ambientali o al cattivo funzionamento dell'impianto.

Questo studio, condotto da Geo-Net, società di servizi e consulenza professionale, che opera nel campo della geologia e della geotermia, ha come fine quello di determinare la fattibilità di un impianto di climatizzazione basato sul principio dello scambio geotermico con un sistema open loop, in progetto presso un sito nel comune di Milano.

In particolare, sono state valutate le potenzialità e le problematiche connesse al prelievo di acque dalla falda idrica mediante pozzi di prelievo, e alla loro successiva restituzione mediante pozzi di reimmissione.

Lo studio è stato condotto sulla base delle caratteristiche previste dall'impianto e sui caratteri stratigrafici, idrogeologici e termici del sito in oggetto: questi ultimi sono stati in parte ricavati da fonti bibliografiche, ed in parte presi dallo studio sul sito, condotto in passato, nel quadro del progetto di bonifica ambientale fatta dalla società di consulenza AMEC Earth & Environmental.

Inquadramento del sito, fabbisogni e obblighi normativi

Il sito si trova a 121 m sul livello del mare ed è un'area sostanzialmente pianeggiante, in particolare, l'area nella quale dovrà essere alloggiato l'impianto è costituita dal cortile interno di un edificio residenziale, le cui dimensioni risultano pari a circa 22 x 10 m; è ipotizzabile la realizzazione del pozzo o pozzi di reimmissione all'interno di locali interrati che si trovano a 5 metri sotto il livello del piano campagna (indicato in seguito con p.c.).

Come si evince dall'analisi stratigrafica realizzati sul sito, il sottosuolo dell'area interessata può essere così schematizzato:

- Un primo intervallo, di spessore stimato pari a circa 3 m costituito da terreni di riporto eterogenei.
- Dai 3 m fino a circa 10 m di profondità troviamo uno strato costituito da sabbia, a tratti limosa, e ciottoli di ghiaia.
- Tra i 10 m e i 19 m di profondità sono presenti ghiaie in matrice sabbiosa.
- Al di sotto dei 19 m di profondità sono presenti sabbie grossolane con ciottoli.

Dalla "carta idrogeologica" del Comune di Milano si rileva che in corrispondenza del sito in esame:

la falda idrica si trova ad una profondità media di circa 17 m;

la superficie piezometrica si abbassa in direzione N-S con gradiente medio pari a circa 1,7 ‰;

la temperatura media delle acque di falda è pari a 14°C.

Per la valutazione e la progettazione dell'impianto l'elemento primo da considerare è il fabbisogno energetico a cui far fronte. Il valore stimato in prima istanza dal committente è pari a 300 kW di potenza, sia in estate che in inverno. Va sottolineato che tale dato rappresenta il valore massimo di picco, tuttavia, a vantaggio della sicurezza, tale valore è stato assunto come valore di riferimento per la potenza richiesta, ed impiegato in tutti i calcoli e simulazioni.

Un ulteriore elemento che concorre a determinare i parametri di fattibilità dell'impianto è costituito dal quadro normativo in materia. In particolare, la realizzazione dei pozzi di presa e dispersione è vincolata al rispetto di alcuni parametri ambientali, idrogeologici e termici:

- Non devono essere presenti plumes di contaminazione della falda: questo dovrà essere appurato in sede di indagine e di realizzazione dei pozzi mediante appositi campionamenti ed analisi di laboratorio, tanto sui terreni quanto sulle acque di falda stesse.
- Le acque reimmesse in falda devono avere caratteristiche qualitative non peggiori di quelle prelevate. In particolare, la temperatura delle acque reimmesse non deve, in nessun caso, superare i 20°C.

- è richiesto che le caratteristiche delle acque prelevate e reimmesse, ottenute tramite un'analisi fisico-chimica, siano in accordo con i parametri previsti per legge.

Dato che, adottate le dovute precauzioni, l'unico effetto di alterazione è dovuto allo scambio di calore, l'elemento che più ci interessa è: *"la variazione massima tra temperature medie, di qualsiasi sezione, a monte e a valle del punto di immissione non deve superare i 3°C"*.

Parametri di input

Sulla base delle considerazioni fatte, prima di passare alla modellizzazione dell'impianto, sono stati fissati i parametri di input dello studio di fattibilità:

- L'impianto è stato dimensionato ipotizzando potenze massime di 300kW, sia in estate che in inverno.
- Si stima che il soddisfacimento di tale requisito richiederà l'adduzione (e la successiva reimmissione) di acque di falda con una portata pari a 15 l/s.
- In ragione delle caratteristiche litologiche dei terreni che costituiscono il sottosuolo del sito in oggetto, la conducibilità idraulica dei terreni stessi è stata stimata pari a $K=10^{-3}$ m/s: tale parametro dovrà essere confermato sperimentalmente mediante apposite prove di permeabilità da condurre in sede di indagine.
- La temperatura media dell'acqua di falda è stata assunta pari a 14°C.
- Il gradiente idraulico medio della falda è stato assunto pari a 1,7‰, in direzione N-S.
- L'impianto dovrà essere situato entro la corte interna dell'edificio e nei locali interrati del fabbricato. Data la limitatezza degli spazi disponibili e le incertezze relative alla dislocazione degli apparati, l'impianto dovrà essere in grado di funzionare considerando una distanza minima di 20 m tra il pozzo di presa e il pozzo/pozzi di reimmissione.
- La temperatura massima delle acque da reimmettere è stata fissata a 18°C, inferiore al limite di 20°C previsto dalla normativa vigente.
- La variazione massima di temperatura media della falda tra due sezioni qualunque, a monte e a valle del punto di reimmissione, non dovrà mai superare i 3°C, come previsto dalla normativa vigente.

Casi di studio

Sulla base dei parametri di input è stato simulato il funzionamento dell'impianto in varie configurazioni. Le simulazioni sono state condotte con l'ausilio del software di modellazione ad elementi finiti "COMSOL", per mezzo del quale sono stati modellati il funzionamento dell'impianto in progetto, l'efficienza delle sue singole porzioni e l'impatto che l'impianto indurrà sulla falda idrica sotterranea e, più in generale, sul sottosuolo del sito in oggetto.

Di seguito, vengono descritte quattro configurazioni di progetto, selezionate sulla base della loro fattibilità logistica, della loro capacità di soddisfare i fabbisogni indicati dal committente, della loro efficienza e della loro conformità ai requisiti imposti dalla normativa vigente.

Caso 1a

Questa prima configurazione vede la realizzazione di:

- Un pozzo di adduzione di diametro minimo $\varnothing 250$ mm e profondità di 30 m rispetto al p.c. da realizzarsi in corrispondenza della corte interna del fabbricato. Tale pozzo consentirà l'adduzione di acqua dalla falda con una portata massima pari a 15 l/s.
- Un pozzo di reimmissione di diametro $\varnothing 120$ cm, da realizzarsi entro i locali del seminterrato; poiché la profondità del piano di calpestio di tali locali risulta 5 m sotto il p.c. scavando per altri 6 m sarà possibile raggiungere una profondità complessiva di 11 m. Tale pozzo consentirà una reimmissione superiore alle necessità di progetto pari a 20,5 l/s.
- Il pozzo di adduzione e il pozzo di reimmissione sono distanti l'uno dall'altro 20 m.
- La temperatura dell'acqua in uscita dall'impianto è stata fissata in 10°C durante la stagione invernale e 18°C durante la stagione estiva (valori inferiori alle prescrizioni normative).
- Il funzionamento dell'impianto indurrà deboli fenomeni di corto-circuitazione termica (circostanza che si crea quando il pozzo di presa adduce una parte significativa delle acque reimmesse): tali fenomeni saranno tuttavia molto contenuti al punto che l'impianto a regime darà luogo a fluttuazioni massime di temperatura delle acque captate pari a 0,5°C rispetto alla temperatura media della falda idrica (14,0 °C).

- Le differenze di temperatura tra due sezioni qualunque a monte e a valle del pozzo di reimmissione risulteranno, in ogni caso, inferiori a 3°C.

Caso 1b

Questa configurazione è analoga in ogni sua parte a quella precedente, l'unica differenza è costituita dalla realizzazione di un pozzo di adduzione con profondità di 50 m. Questa variazione risulta utile per minimizzare gli effetti dei fenomeni di corto-circuitazione termica. Aumentando la profondità del pozzo di adduzione le fluttuazioni massime si riducono a 0,2 °C, rispetto a 0,5°C del caso precedente.

Caso 2a

Questa configurazione vede la realizzazione di:

- Un pozzo di adduzione di diametro minimo $\varnothing 250$ mm e profondità 30 m Tale pozzo con una portata massima pari a 15 l/s.
- Due pozzi di reimmissione di diametro $\varnothing 300$ mm, da realizzarsi entro i locali del secondo piano interrato con una profondità complessiva di 17 m dal piano campagna. Tali pozzi consentiranno la reimmissione di 17,1 l/s complessivamente, pari alle necessità di progetto.
- Il pozzo di adduzione e i pozzi di restituzione saranno situati a m. 20,0 l'uno dall'altro.
- La temperatura dell'acqua da reimmettere è stata fissata in 10°C durante la stagione invernale e 18°C durante la stagione estiva (valori inferiori alle prescrizioni normative).
- Il funzionamento dell'impianto indurrà alcuni deboli fenomeni di corto circuitazione termica con fluttuazioni massime di temperatura delle acque captate pari a 0,5°C rispetto alla temperatura media della falda idrica (14,0 °C).
- Le differenze di temperatura tra due sezioni qualunque a monte e a valle del pozzo di reimmissione risulteranno, in ogni caso, inferiori a 3°C.

Caso 2b

Anche in questo caso la configurazione è analoga in ogni sua parte a quella precedente, si cambia solo la profondità del pozzo di reimmissione, portandola a 50 m, minimizzando le fluttuazioni massime ottenute, pari 0,2°C.

Conclusioni

- Tutti i casi di studio sopra descritti risultano realizzabili, dal punto di vista idraulico, idrogeologico e geotermico.
- Tutti i casi di studio sopra citato risultano conformi a quanto richiesto dalla normativa vigente in materia.
- In tutti i casi di studio sopra esposti sono stati osservati deboli fenomeni di corto-circuitazione termica. Questi fenomeni appaiono tuttavia modesti, tali da non compromettere il corretto funzionamento dell'impianto.

In ogni caso, prima della progettazione definitiva dovrà essere verificata la fattibilità logistica dei pozzi previsti e la permeabilità dei terreni presenti nel sottosuolo. La conferma che tale parametro è conforme a quanto stimato ($K=10^{-3}$ m/s) costituisce infatti una condizione essenziale per la validità delle simulazioni condotte ed il corretto funzionamento dell'impianto.

Inoltre dovrà essere validata, mediante appositi campionamenti e analisi di laboratorio, la conformità dei terreni e delle acque di falda ai criteri qualitativi fissati dalla normativa vigente, tenendo conto della presenza di un progetto di bonifica in corso sul sito in oggetto.

3.SIMULAZIONI E ANALISI DATI

La fattibilità del sistema descritto nel capitolo precedente dipende essenzialmente da due fattori: 1. L'acqua reimpressa deve essere assorbita interamente dal terreno; 2. La temperatura del terreno non deve, in nessun caso, superare i 20°C, soglia massima imposta per legge.

Utilizzando **COMSOL Multiphysics**, un potente software di modellazione, che permette di simulare un gran numero di processi fisici, tra cui il comportamento idraulico e termico delle acque sotterranee, viene verificato il corretto funzionamento dell'impianto, appurando che i parametri rientrino nei limiti previsti.

Infine viene effettuata la validazione di **MODFLOW**, un software molto diffuso, creato esclusivamente per simulare il comportamento idraulico di un sistema, in particolare si confrontano i risultati ottenuti dai due software.

Modelizzazione di un impianto

I modelli relativi alle acque sotterranee, se ben fatti, sono rappresentazioni della realtà e, possono essere strumenti previsionali per la variazione dei parametri del sistema. Modelli matematici analitici sul flusso delle acque sotterranee sono stati usati fino all'avvento dei moderni metodi di calcolo. Il limite della trattazione col metodo analitico consiste nella difficoltà di risoluzione delle equazioni differenziali alle derivate parziali che descrivono il moto delle acque sotterranee. Generalmente con tali metodi è possibile descrivere solo sistemi omogenei e isotropi, differenti da quelli reali. Di pari passo alla diffusione dei calcolatori si è avuto lo sviluppo di software per la simulazione di sistemi idrici con tecniche numeriche. Tali metodi hanno oggi raggiunto una elevata affidabilità di previsione, ovviamente l'attendibilità delle simulazioni dipende da quanto bene il modello approssima la realtà.

Descrizione dei software

COMSOL

COMSOL Multiphysics è un software scientifico molto diffuso, basato sul metodo degli elementi finiti, creato per la simulazione di sistemi fisici complessi. Il suo punto di forza è la capacità di modellare e simulare una gran varietà di processi fisici e anche combinarli tra loro. Tramite l'utilizzo di moduli opzionali, ognuno specifico per una determinata disciplina, è possibile trattare problemi in svariati campi: acustica, elettromagnetismo, fluidodinamica, termodinamica, chimica, ecc.

Senza inoltrarci troppo nell'argomento, possiamo spiegare sommariamente il metodo degli elementi finiti attraverso tre passaggi: 1. Il dominio viene diviso in elementi più piccoli chiamati celle; 2. Su ciascun elemento viene descritta la relazione tra le variabili; 3. Gli elementi vengono assemblati in modo da ottenere una relazione tra le variabili dell'intero dominio.

MODFLOW

MODFLOW, è un software sviluppato dall'USGS (United States Geological Survey) negli anni '70, che simula il flusso di acque sotterranee nelle tre dimensioni spaziali utilizzando il metodo delle differenze finite. Per il suo funzionamento necessita di un'interfaccia grafica, quella utilizzata in questo lavoro è MODEL MUSE. Sia MODFLOW che MODEL MUSE sono scaricabili gratuitamente e gli ultimi aggiornamenti risalgono al 2005.

Il modello offre la possibilità di simulare:

- Il moto delle acque di: fiume, diga, lago, mare, ecc;
- flussi associati ad agenti artificiali o naturali quali: pozzi, ricarica da pioggia, drenaggi, evapo-traspirazione.
- differenti tipi di acquifero: libero, confinato, semiconfinato.
- anisotropia nelle caratteristiche idrauliche dell'acquifero.

MODFLOW permette la simulazione in regime stazionario o dinamico con la possibilità, in quest'ultimo caso, di variare per periodi definiti le caratteristiche del sistema in oggetto.

Lo sviluppo dell'equazione di flusso con il metodo delle differenze finite deriva dall'equazione di continuità: la somma di tutti i flussi in ingresso ed in uscita dalle celle deve essere uguale, a meno di un errore. Il dominio viene suddiviso in un numero finito di celle, ad ogni cella viene associato un valore iniziale, che soddisfa le condizioni di input. Il software attraverso iterazioni successive fa in modo che l'equazione di continuità sia verificata per tutte le celle, se questo è possibile, altrimenti rileva un errore.

Creazione del modello

COMSOL e MODFLOW sono simili nella fase di costruzione di un modello e prima di poter eseguire una simulazione c'è bisogno di compiere le seguenti operazioni :

Discretizzazione

Per la modellizzazione dell'impianto la prima operazione da eseguire è la discretizzazione dello spazio nelle coordinate (x,y,z) .

In base alle dimensioni del sito interessato, andremo a suddividere lo spazio fisico in un numero finito di elementi, chiamati celle. Nel nostro caso andremo a considerare un'area di 250 m², divisa in 250 righe e 250 colonne, in modo tale che ad ogni cella viene associata un' area pari a 1m².

La stratigrafia del sottosuolo viene riprodotta con la creazione di livelli, chiamati layer, a cui vengono associati la profondità e i parametri geologici. Questa operazione viene effettuata in modo tale da rendere il modello quanto più prossimo alla realtà.

Corpi idrici

Nella fase successiva, mediante la creazione di oggetti, vengono definiti i corpi idrici e le caratteristiche idrogeologiche e termiche (nel caso di COMSOL). Quindi introduciamo nel sistema la falda acquifera che viene riprodotta mediante la presenza di celle con carico idraulico

variabile lungo l'asse delle x , simulando un gradiente idraulico di 1,7‰ (caso specifico considerato nella tesi). Poi inseriamo i parametri caratterizzanti le singole celle, ovviamente diversi a seconda dell'oggetto considerato: permeabilità, densità, porosità, conducibilità termica, calore specifico e temperatura. Nel caso dei substrati, a seconda che siano saturi di acqua o meno, questi parametri variano. Inoltre è possibile creare dei confini, rendendo delle celle, che non hanno interferenza col sistema, inattive.

Agenti esterni

Utilizzando un'apposita funzione vengono introdotti un pozzo di presa e un pozzo di reimmissione, specificando il flusso di acqua sottratto o fornito. Nel nostro caso il flusso è pari a 15 l/s ed è costante in tutto l'arco dell'anno. La configurazione dei pozzi dipende dal caso in esame.

Simulazione

Una volta fatte le operazioni precedenti, abbiamo tutti gli elementi per eseguire la simulazione, nel caso ci fossero dei problemi il software ce li segnala come errori o nel migliore dei casi con dei warning, spiegandone la possibile causa. Una volta provveduto ad eliminarli si riavvia il software osservando i risultati in uscita. Come detto precedentemente, lo scopo principale della simulazione è trovare la miglior configurazione possibile per il corretto deflusso delle acque e il controllo della temperatura.

In fase progettuale si cercano i possibili problemi riscontrabili:

1. l'acqua reimpressa potrebbe non essere interamente assorbita dal pozzo;
2. d'estate la temperatura potrebbe aumentare fino a superare i limiti imposti dalla legge;
3. si potrebbero verificare effetti consistenti di cortocircuitazione;

Il primo problema viene risolto aumentando la larghezza o la profondità del pozzo di reimmissione, cioè aumentando rispettivamente la superficie di drenaggio o il carico idraulico. Il secondo problema viene risolto miscelando l'acqua calda uscente dalla pompa di calore con acqua prelevata direttamente dalla falda (anche se aumenta il flusso da smaltire), se ciò non

dovesse bastare si valutano possibili riduzioni della potenza fornita. Il terzo problema è risolto variando la profondità del pozzo di adduzione: a profondità maggiori l'influenza dell'acqua reimpressa si riduce.

Le simulazioni eseguite sono numerose, si fanno variare le caratteristiche dell'impianto trovando la configurazione in cui i problemi sopra elencati vengono eliminati, o quantomeno ridotti fino a farli rientrare nel limite degli errori.

Risultati ottenuti

Parte idraulica

Le simulazioni effettuate con COMSOL, e confermate da MODFLOW, permettono di stabilire che le acque reimmesse vengono correttamente drenate nelle seguenti configurazioni:

- un pozzo di reimmissione con profondità di 11m e diametro di 120 cm;
- due pozzi di reimmissione con profondità di 17m e diametro di 30 cm;

Le misure sopra elencate sono comprese dei margini di sicurezza, tenendo comunque conto del fattore economico: un pozzo potrebbe essere anche più profondo, a tutto vantaggio della sicurezza, ma bisogna tener conto anche del suo costo.

Parte termica

Prima di mostrare i risultati ottenuti, è d'obbligo una precisazione sul funzionamento di MODFLOW. Questo software è stato creato esclusivamente per studiare il moto dei fluidi, e quindi non tiene conto delle variazioni di temperatura e scambi di calore. Tuttavia, a causa delle somiglianze matematiche tra trasporto di energia termica e trasporto di massa (inteso come diffusione molecolare), il modello di trasporto multi-specie MT3DMS (pacchetto di MODFLOW), in determinate condizioni, dovrebbe essere in grado di simulare il trasferimento di calore. In altre parole, quando le variazioni di viscosità e di densità sono piccole, l'acqua

reimmessa, a temperatura più alta, che si diffonde nel sottosuolo, può essere vista come un soluto che si diffonde nel solvente.

Sono state fatte numerose simulazioni in merito, e si hanno risultati conformi con quelli ottenuti con COMSOL una volta raggiunto il livello di falda, ma nello strato superiore si riscontrano inaspettate anomalie: valori di T più alti del valore massimo e valori di T più bassi del valore minimo.

Sebbene già in diversi studi di casi specifici questa tecnica è stata applicata con successo per simulare il trasporto del calore, non si hanno a disposizione le fonti necessarie, per questo motivo si sceglie di considerare, per gli aspetti termici, solo i risultati ottenuti con COMSOL.

Riportiamo la tabella riassuntiva con i valori di temperatura dell'acqua presa e reimessa nelle quattro possibili configurazioni.

Modello 1 pozzo di 41e immissione d=1200mm			Modello 2 pozzi di 41e immissione d=300 mm		
Potenza= 300KW			Portata= 15 l/sec		
Caso 1a Hpozzo presa=30 m	Hpozzo reim=11m		Caso 2a Hpozzo presa=30 m	Hpozzo reim =17m	
	Interferenza sì			Interferenza sì	
	T presa			T presa	
	Test [°C]	Tinv [°C]		Test [°C]	Tinv [°C]
	14,5	13,5		14,5	13,5
	T reim			T reim	
	T est [°C]	T inv [°C]		T est [°C]	T inv [°C]
18	10	18	10		
Caso 1b Hpozzo presa=50 m	Hpozzo reim =11m		Caso 2b Hpozzo presa=50 m	Hpozzo reim =17m	
	Interferenza sì(trascurabile)			Interferenza sì(trascurabile)	
	T presa			T presa	
	Test	Tinv		Test [°C]	T inv [°C]
	14,2	13,8		14,2	13,8
	T reim			T reim	
	T estiva [°C]	T invernale [°C]		T estiva [°C]	T invernale [°C]
18	10	18	10		

Tabella 1: valori di temperatura ottenuti dalle simulazioni nei casi 1a, 1b, 2a, 2b.

Per considerare l'effetto delle stagioni le simulazioni sono state effettuate su cicli annuali, variando le temperature di input che caratterizzano il sistema di presa e di reimmissione.

Guardando i valori delle temperature di presa si nota che gli effetti della corto-circuitazione sono minimi in tutti i casi, infatti tali valori hanno una variazione massima di 0,5 °C rispetto alla temperatura dell'acqua di falda. Tuttavia l'effetto dell'interferenza dell'acqua reimpressa è trascurabile solo nei casi 1b e 2b, dove il pozzo di adduzione è posto a 50 m di profondità.

Temperatura acqua prelevata

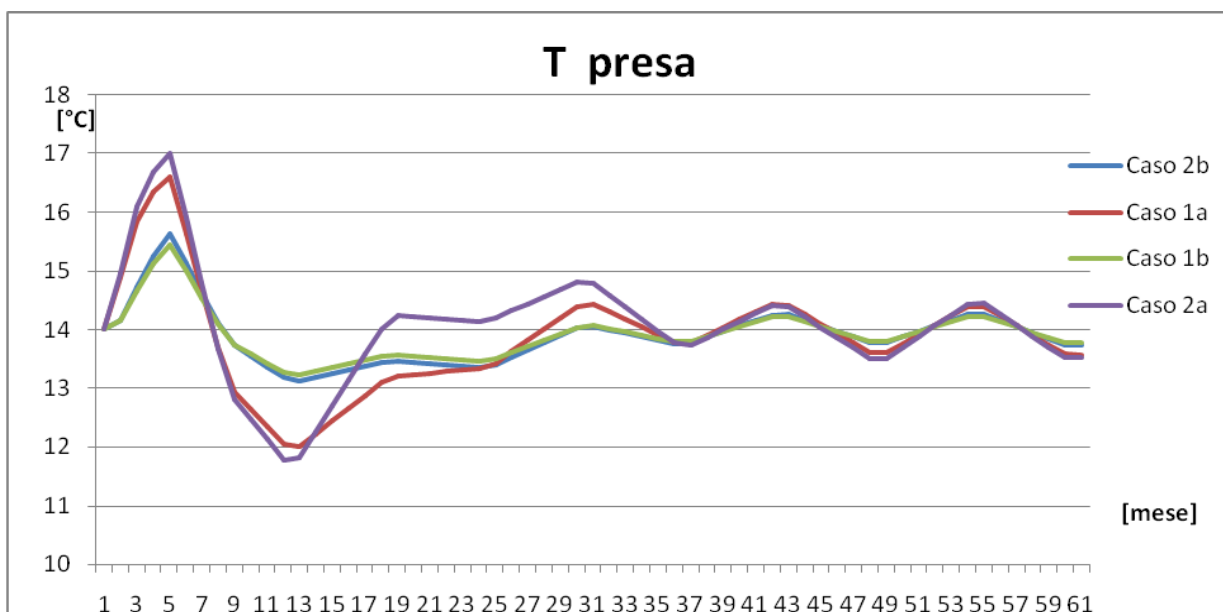


Figura 1: Temperatura dell'acqua prelevata dal pozzo di adduzione al variare dei mesi per le diverse configurazioni previste.

I picchi più alti nei mesi iniziali, sono dovuti al fatto che il sistema ha bisogno di un periodo di stabilizzazione, dal 36° mese in poi i valori della simulazione diventano attendibili. Come detto prima, si può vedere anche graficamente, che gli effetti della corto-circuitazione sono minori nei casi 1b e 2b.

Temperatura acqua reimpressa

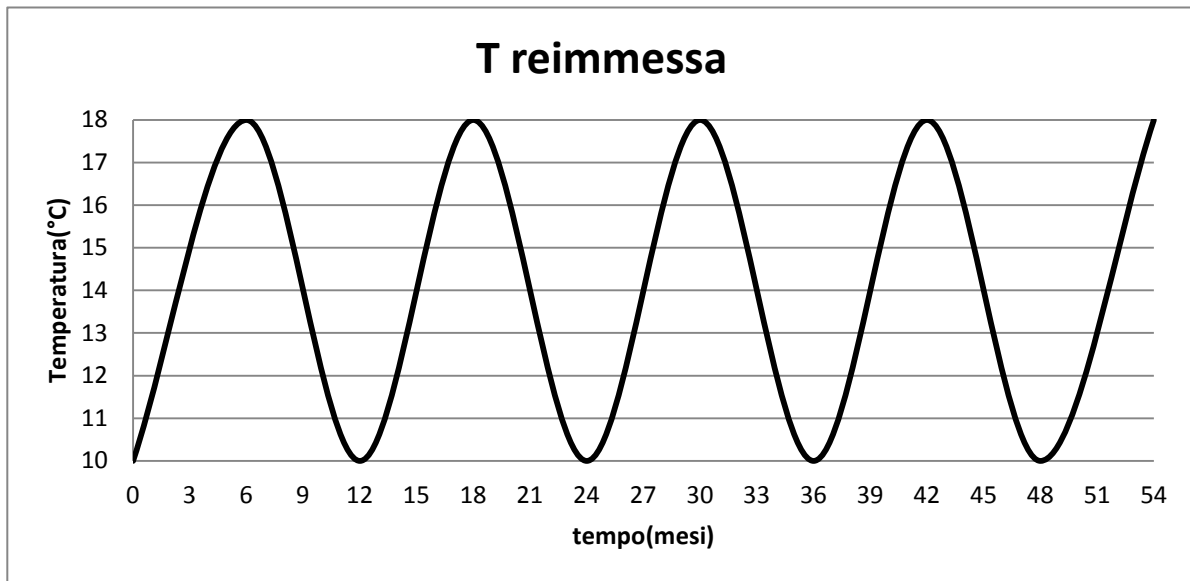


Figura 2: Variazione della temperatura dell'acqua reimpressa in funzione del tempo.

Nel precedente grafico, è possibile vedere l'andamento della temperatura dell'acqua reimpressa col passare dei mesi, ogni periodo della sinusoide rappresenta un anno. Si fa in modo che in estate la temperatura non vada oltre i 18°C, mentre in inverno non scenda al di sotto dei 10°C.

In seguito verranno mostrati diversi grafici per farsi un'idea della distribuzione della temperatura e del cono di pressione in prossimità dei pozzi. Proprio perché è a scopo illustrativo sarà considerato solo il caso 1a.

Distribuzione temperatura

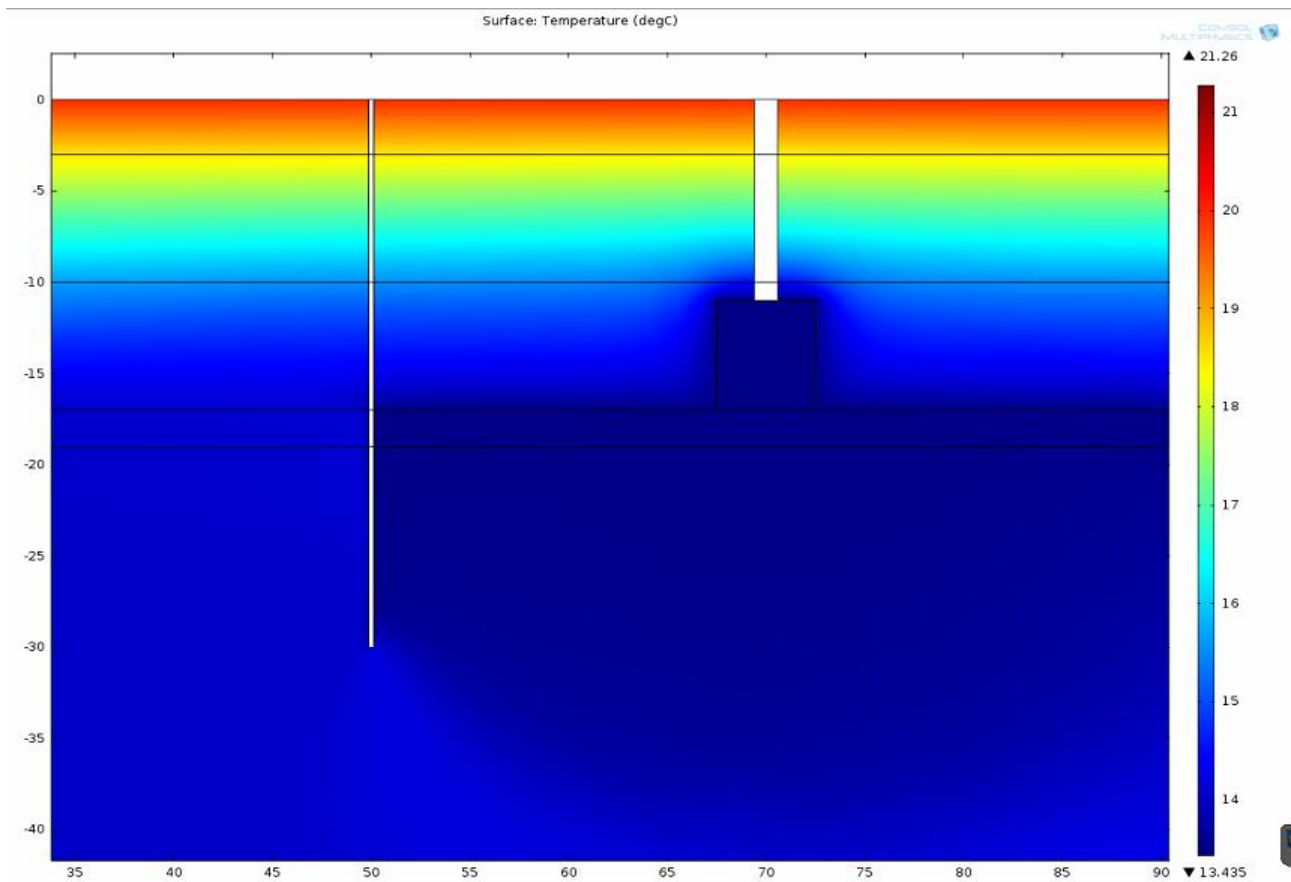


Figura 3: plume termico inverno sezione verticale. Distribuzione della temperatura in funzione della profondità.

In questo grafico, come nei seguenti, il flusso di falda va da sinistra a destra, e la disposizione dei pozzi dipende proprio da questo fattore: seguendo il flusso di falda il pozzo di reimmissione viene posto dopo quello di presa, limitando così la corto-circuitazione.

Questi grafici sono dati direttamente da COMSOL, e si chiede scusa per la grandezza delle scale.

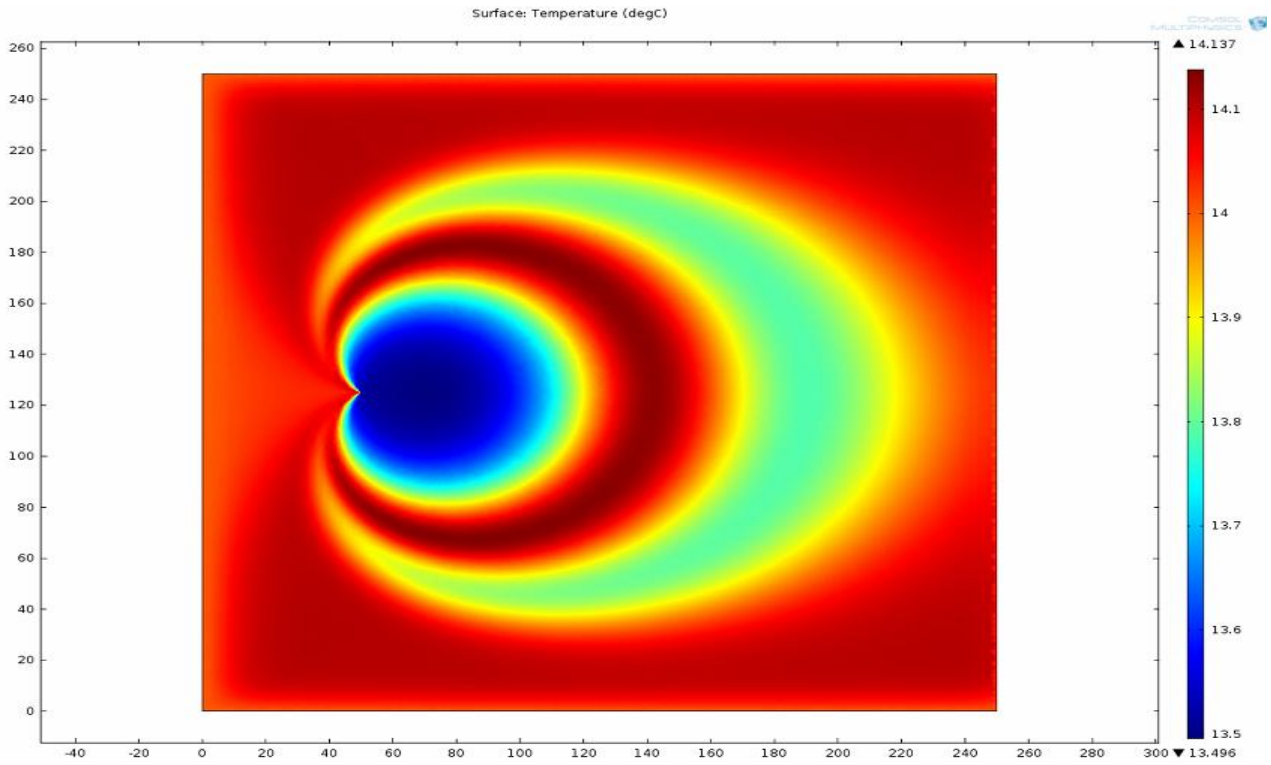


Figura 4: plume termico inverno sezione orizzontale. Distribuzione della temperatura in prossimità del pozzo di reimmissione ad una profondità di 17m(superficie della falda).

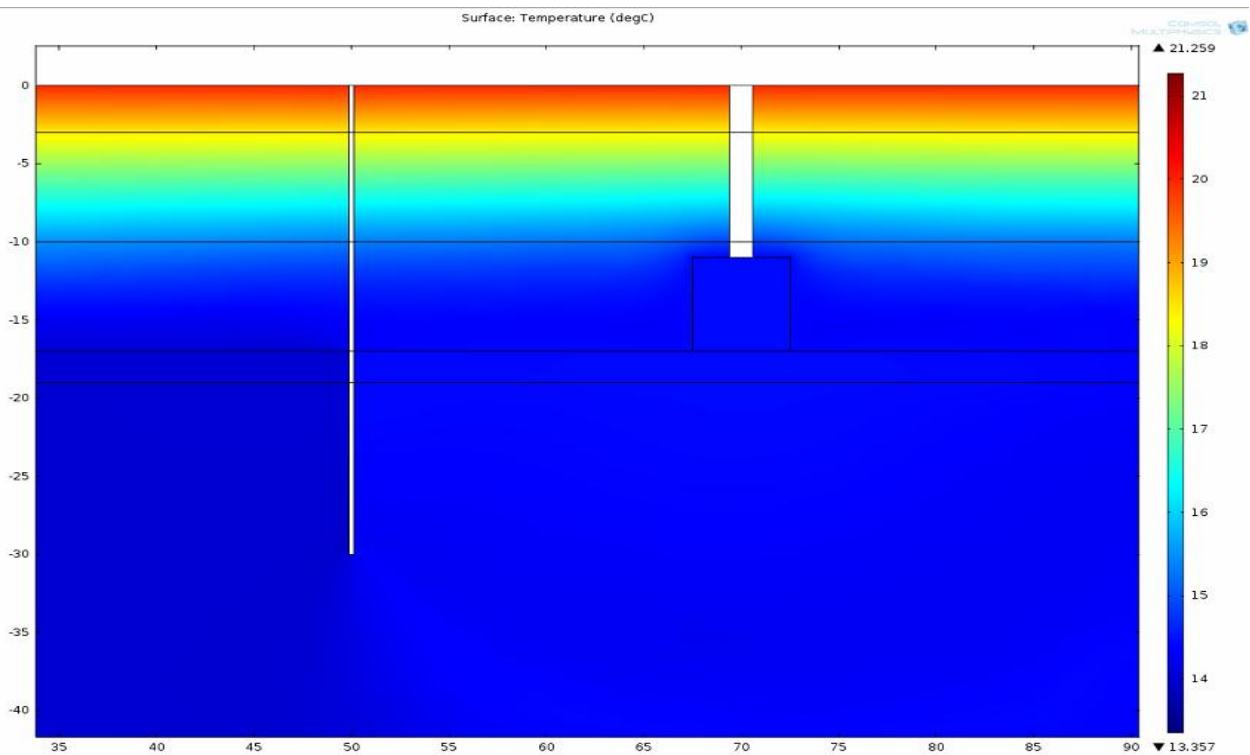


Figura 5: plume termico estate sezione verticale. Distribuzione della temperatura in funzione della profondità.

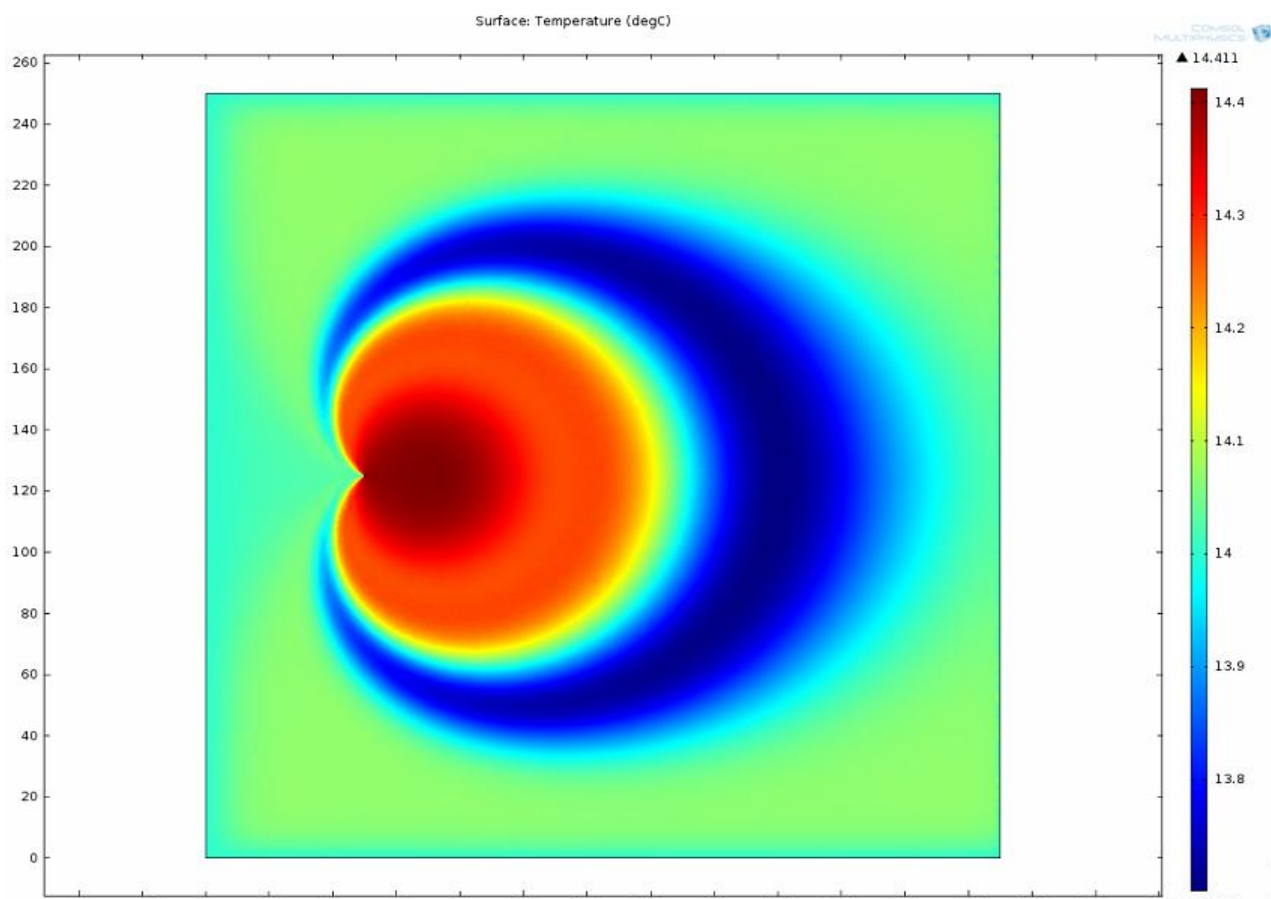


Figura 6: plume termico estate sezione orizzontale. Distribuzione della temperatura in prossimità del pozzo di reimmissione ad una profondità di 17m.

Da questi grafici si possono evidenziare, sopra ogni cosa, due elementi importanti:

1. Dalle sezioni verticali dei plume termici si può notare, come ci si aspetta, che all'aumentare della profondità l'influenza dell'acqua reimessa diventa sempre minore. Questo fattore suggerisce un modo per eliminare la corto-circuitazione, di fatto portando il pozzo di presa a 50m di profondità il problema è risolto;
2. Dalle sezioni orizzontali è possibile osservare che la temperatura è massima, di 4-5 decimi di grado superiore alla temperatura media della falda, solo nel raggio di circa 10 m dal pozzo di reimmissione.

Cono di depressione

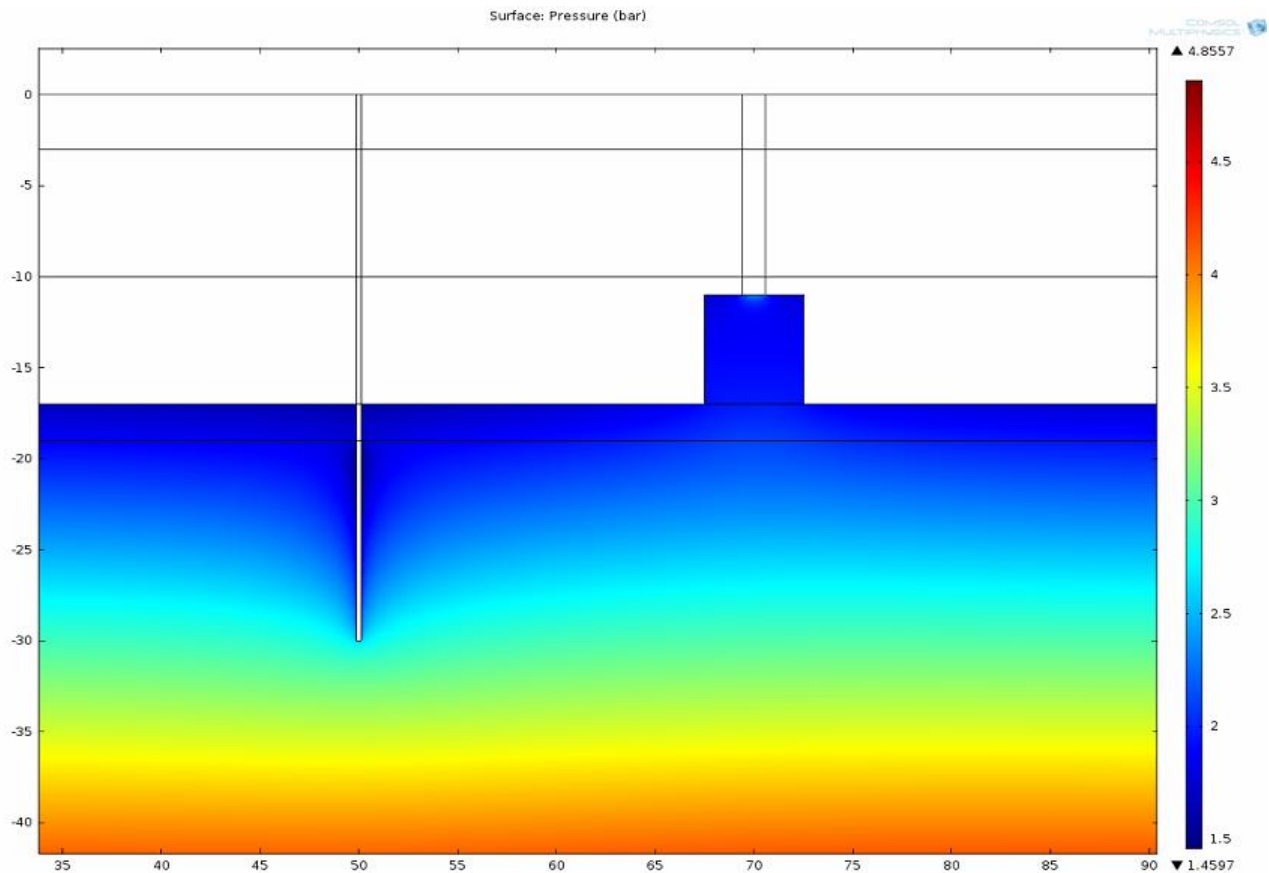


Figura 7: cono di depressione. Distribuzione della pressione in funzione della profondità.

L'adduzione di acqua provoca una depressione di forma conica, che nel caso di falda libera, ha come asse il pozzo di presa. L'area del cono di depressione dipende dalla portata di acqua prelevata, dal tempo di prelievo e dai parametri idrogeologici del sottosuolo. Generalmente, dopo un periodo iniziale dove l'area del cono tende ad aumentare si ha una stabilizzazione, venendo compensata la quantità di acqua estratta da nuove affluenze che riequilibrano il bilancio dell'acquifero. Anche la depressione rappresenta un parametro da osservare attentamente, in quanto valori alti potrebbero provocare un abbassamento del sottosuolo e nei casi peggiori un cedimento. Nel nostro caso non si riscontrano problemi.

Conclusioni

Si può affermare che il modello realizzato, e le simulazioni effettuate tramite i due software, si sono dimostrate un metodo di calcolo preciso e versatile. COMSOL e MODFLOW,

considerando solo i rispettivi campi in cui lavorano, sono entrambi validi software, ma il primo, anche per il fatto che è più recente, si mostra immediato e di più facile uso.

L'esito delle simulazioni eseguite, al variare dei parametri di progettazione, ha permesso di selezionare quattro configurazioni realizzabili, eliminando o rendendo minimi i problemi prima evidenziati, confermando la fattibilità dell'impianto senza dover per forza di cose dover ricorrere ad una riduzione di potenza.

Riferimenti bibliografici

1 http://www.emrg.it/Lezioni_Energia_Rinnovabile/2-Energia_Livello_di_vita.pdf

2-4-5 Bonafede - il calore terrestre.

3 Beniamino Toro- Tania Ruspandini – Geotermia: nuove frontiere delle energie rinnovabili.

6 Bonafede - conduzione del calore.

7 UGI(Unione geologi italiani) – La geotermia ieri, oggi, domani.

8 <http://geologia-e.igg.cnr.it/GeologiaeGeotermiaText.htm>

9-10 Manzella - Ungarelli - La geotermia.

11 <http://www.nextville.it/Geotermia/>

12 <http://www.eniscuola.net/it/energia/contenuti/geotermica/left/geotermia-per-abitazioni/costi-e-risparmi/>

13 Fonte: <http://www.roburperte.it/2011/11/14/le-pompe-di-calore-geotermiche-in-europa-italia-fanalino-di-coda/>

I dati sullo studio di fattibilità sono stati forniti da GEO-NET.

Le simulazioni e i dati riguardanti COMSOL sono stati forniti dall' Ing. Roberto Larghetti.

Siti internet di riferimento

www.idrogeologia.net

www.unionegeotermica.it

