

Tecnologia e potenzialità dei sistemi geotermici a bassa entalpia

Alessandro Casasso*
Rajandrea Sethi*

* Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente, il Territorio e le Infrastrutture, Politecnico di Torino

Il riscaldamento globale e la crescente domanda di combustibili fossili stanno fornendo una spinta notevole alla diffusione delle fonti energetiche rinnovabili e a bassa emissione di gas serra. La climatizzazione degli edifici rappresenta la parte più importante dei consumi energetici mondiali, ed è quindi fondamentale implementare in questo campo soluzioni tecniche di risparmio energetico e impianti che utilizzano fonti di energia rinnovabile, tra le quali la geotermia a bassa entalpia. Le pompe di calore geotermiche, che scambiano calore con il terreno o con l'acqua di falda, non producono emissioni inquinanti sul posto. Se correttamente dimensionate, permettono consistenti risparmi economici, di energia primaria e di emissioni di gas serra. A differenza di altre fonti rinnovabili, la loro applicabilità è pressoché universale.

In questo articolo si descrivono le tecnologie e i principali metodi di dimensionamento degli impianti di geoscambio, mostrando i vantaggi e gli svantaggi di ciascuna soluzione, i benefici e i rischi ambientali legati alla loro applicazione.

Parole chiave: effetto serra, energie rinnovabili, geotermia, pompa di calore, sonde geotermiche.

Technology and potentiality of geothermal heat pumps. The global warming and the growing demand of fossil fuels are fostering the spread of renewable and low-emission energy sources. The building air conditioning is responsible for the major part of the world primary energy consumption, therefore it is vital to implement energy saving solutions and renewable thermal energy sources in this field, like low-enthalpy geothermics. The geothermal heat pumps are based on the heat exchange with the shallow subsoil or with groundwater, with no emissions on site. If they are correctly designed, they achieve relevant economic and energetic savings, and they reduce the greenhouse gases emissions. In addition, this technology can be applied almost everywhere.

In this paper, the technologies and the most used project and simulation methods are described, explaining the advantages and the drawbacks of each technical solution and showing the environmental benefits and risks connected to their application.

Keywords: greenhouse effect, renewable energy sources, geothermics, heat pump, borehole heat exchangers.

Technologie et potentialités des pompes à chaleur de géothermie. Le réchauffement climatique et la croissante exigence des combustibles fossiles ont promu la diffusion des énergies renouvelables et avec réduites émissions des gaz à effet de serre. La climatisation des bâtiments représente la partie la plus grande du consume total d'énergie primaire au niveau mondial. Donc, il faudra concentrer dans cette domaine les majeurs efforts pour l'implémentation des solutions pour l'épargne d'énergie et la diffusion des implants avec fonts d'énergie renouvelables, comme les pompes à chaleur géothermiques, qui échangent chaleur avec le sol ou l'eau de nappe souterraine, sans émissions des polluants sur site. Ces implants permettent des grandes économies et des forts réductions des émissions des gaz à effet de serre e du consume d'énergie primaire. Ces technologies peuvent être appliquées presque partout.

Dans cette articule, les technologies, les principales méthodes de projet et de simulation sont décrits, en montrant les avantages et les inconvénients de chaque typologie d'installation, les effets favorables et les risques environnementaux liés à leur application.

Mots-clés: effet de serre, énergies renouvelables, géothermie, pompe à chaleur, sondes géothermiques.

1. Introduzione

Da oltre trent'anni le tematiche dell'inquinamento atmosferico, dell'effetto serra, del riscaldamento globale e del possibile esaurimento

dei combustibili fossili sono al centro di un acceso e a volte controverso dibattito internazionale. Tuttavia, la comunità scientifica è da tempo concorde circa la necessità di contenere i consumi di energia e di operare una

rapida transizione verso fonti energetiche rinnovabili. Tale auspicio è ancora più valido per la climatizzazione degli edifici che è responsabile di circa il 70% dei consumi energetici mondiali (EIA, 2009).

I sistemi geotermici a bassa entalpia, per la loro applicabilità su larga scala, sono tra le più promettenti tecnologie di climatizzazione ad utilizzare fonti rinnovabili di energia termica (Lund, 2004). Tali sistemi, che si basano sull'utilizzo di una pompa di calore per trasferire energia termica tra il sottosuolo e l'impianto di climatizzazione dell'edificio, sono stati ampiamente utilizzati in USA, Svezia, Germania e stanno destando un forte interesse anche in Italia. A differenza dei sistemi geotermici ad alta entalpia, che sfruttano anomalie termiche del sottosuolo presenti in pochi siti, i sistemi a bassa entalpia sono installabili pressoché ovunque, poiché sfruttano il calore naturalmente presente a basse profondità nel terreno.

Nel nostro Paese, che pure è il quinto produttore mondiale di energia elettrica da fonte geotermica (Holm et al., 2010), la geotermia a bassa entalpia è ancora poco diffusa. L'alto costo dell'energia elettrica e l'incertezza normativa hanno finora ostacolato la diffusione di questi impianti, tant'è che nel 2010 risultavano installate solamente 12000 pompe di calore geotermiche, con una potenza totale di 231 MW (EuroObserv'ER, 2011).

Nell'ambito di questo studio viene riportata una sintesi della letteratura scientifica e tecnica relativa al funzionamento dei sistemi geotermici a circuito aperto (open loop), che utilizzano il calore dell'acqua di falda

prelevata da pozzi, e a circuito chiuso (closed loop), che invece scambiano calore tramite l'impiego di un fluido termovettore confinato all'interno di una tubazione a contatto con il sottosuolo.

Verranno illustrati i parametri per la valutazione delle prestazioni dei sistemi e descritti gli scambiatori al suolo, fornendo cenni alle tecniche più idonee ad un corretto dimensionamento ed evidenziandone vantaggi e svantaggi. In ultima analisi verranno descritti scenari e potenzialità in termini di risparmio economico e di riduzione delle emissioni di gas serra.

2. Sistemi geotermici a bassa entalpia

Un impianto di condizionamento geotermico a bassa entalpia è costituito da un sistema di scambio termico con il suolo, da una pompa di calore e dai terminali dell'impianto di condizionamento dell'edificio (Fig. 1).

La pompa di calore, il cuore del sistema, è una macchina in grado di trasferire energia termica da una sorgente a bassa temperatura ad una a temperatura più elevata, a spese del lavoro meccanico di un compressore.

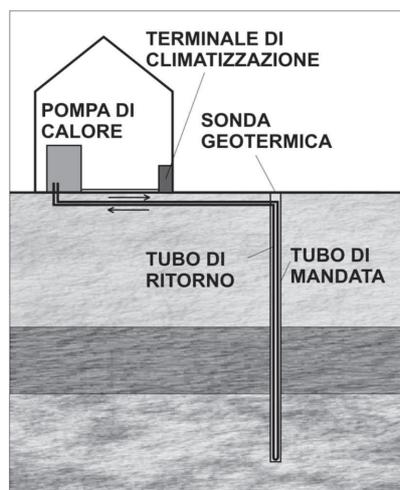


Fig. 1. Schema di un impianto geotermico a circuito chiuso con sonda geotermica. Scheme of a closed-loop geothermal heat pump with a borehole heat exchanger.

re. In inverno il calore viene trasferito dal terreno a bassa temperatura verso l'impianto di riscaldamento dell'edificio (a temperatura più elevata), mentre in estate il ciclo si inverte per il raffreddamento. Nonostante l'energia elettrica fornita alla pompa possa essere prodotta da fonti non rinnovabili, la geotermia a bassa entalpia è considerata una fonte rinnovabile: con un corretto dimensionamento dell'impianto di scambio termico, infatti, il calore del sottosuolo può essere sfruttato per un tempo teoricamente infinito.

A differenza degli impianti di climatizzazione tradizionali, il dimensionamento dell'impianto è basato non solo sulla potenza termica massima di riscaldamento e raffreddamento, ma anche sull'andamento temporale del carico termico, in modo da poter stimare come evolva nel tempo la temperatura del suolo, dalla quale dipende la performance energetica del sistema, in risposta alla sollecitazione imposta dallo scambio termico.

Le prestazioni del sistema vengono misurate mediante il COP (coefficient of performance) ossia il rapporto tra il calore fornito (o sottratto

all'edificio) ed il consumo di energia elettrica della pompa di calore. Il COP è sempre superiore all'unità e, come si può notare in figura 2, minore è la differenza tra la temperatura della sorgente e quella del terminale d'impianto dell'edificio, più è prestante il sistema (e quindi maggiore il COP). Grazie all'elevata inerzia termica del terreno e della falda eventualmente presente, il sottosuolo ha una temperatura pressoché costante durante l'anno, circa pari alla temperatura media annuale dell'aria, e ciò garantisce prestazioni superiori rispetto alle pompe di calore aerotermiche, che sono invece soggette alle variazioni di temperatura durante l'anno.

Altro elemento del sistema è costituito dai terminali di climatizzazione: i più adatti per l'utilizzo con le pompe di calore sono i pannelli radianti ed i ventilconvettori. Questi sistemi permettono il raggiungimento di un COP più elevato grazie alla minore differenza di temperatura rispetto alla sorgente. Sono invece sconsigliabili i radiatori (comuni termosifoni), che operano a temperature molto elevate, peggiorando notevolmente le performance energetiche del sistema.

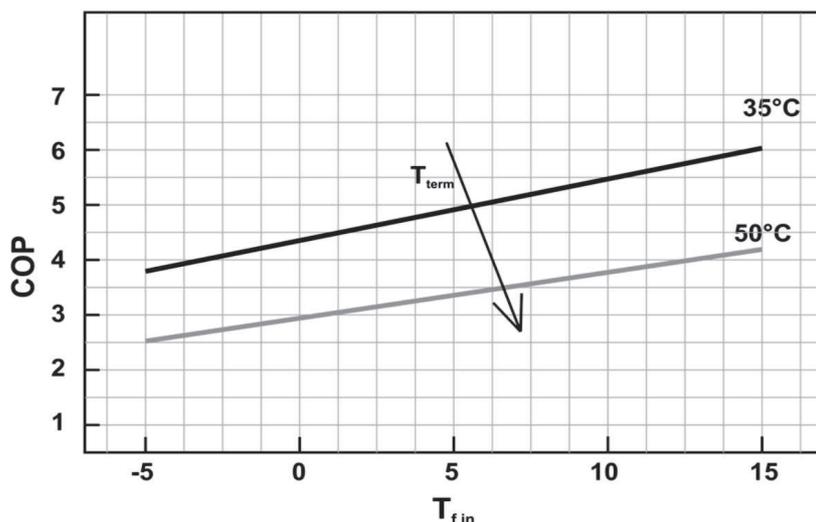


Fig. 2. Andamento tipico del COP di una pompa di calore geotermica, al variare della temperatura di ingresso del fluido della sonda (T_{fin}) e della temperatura del terminale di riscaldamento (T_{term}).

Typical diagram of the COP dependence from the temperatures of the inlet pipe fluid (T_{fin}) and of the heating terminal (T_{term}).

Infine gli scambiatori al suolo si differenziano a seconda della sorgente sulla quale viene operato lo scambio termico:

- negli impianti a circuito chiuso (closed loop), un circuito idraulico di tubi interrati scambia calore con il suolo tramite la circolazione di un fluido termovettore;
- negli impianti a circuito aperto (open-loop), una coppia di pozzi (prelievo e reimmissione) scambia calore con l'acqua di falda che viene successivamente scaricata.

Nei prossimi paragrafi verranno descritti gli scambiatori al suolo e le tecniche di dimensionamento più comunemente impiegate.

3. Impianti a circuito chiuso

Gli impianti a circuito chiuso sono i più diffusi, sia per la possibilità di applicazione anche nelle zone in cui la falda non sia sfruttabile (basse portate estraibili o elevata soggiacenza) che per la maggiore facilità delle procedure di approvazione.

Il circuito chiuso di scambio termico può essere installato in posizione verticale in una perforazione appositamente effettuata (sonde geotermiche verticali) o in un palo di fondazione (pali geotermici), oppure posato orizzontalmente in una trincea o in uno sbancamento (sonde geotermiche orizzontali).

3.1. Sonde geotermiche orizzontali

Le sonde geotermiche verticali sono la tipologia più diffusa di scambiatore a circuito chiuso. Sono costituite da una tubazione all'interno della quale circola il fluido termovettore che opera lo scambio termico con il terreno (Fig. 1). Vengono installate all'interno di una perforazione di diametro da 10 a 20 cm con lunghezze comprese tra i 50 ed i

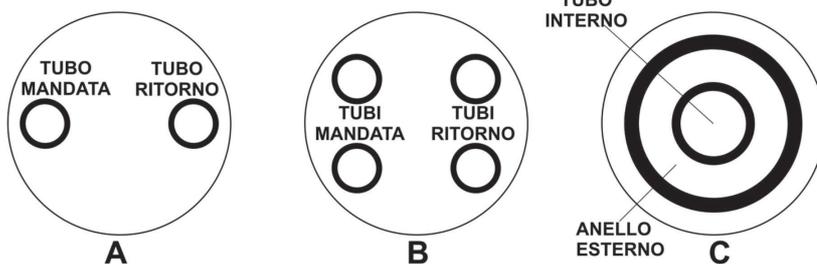


Fig. 3. Sezioni trasversali delle sonde geotermiche: tubo a U singola (A), tubo a U doppia (B), sonda coassiale (C).

Cross-sections of borehole heat exchangers: single U-pipe (A), double U-pipe (B) and coaxial pipes (C).

300 m. La potenza massima scambiata dalle sonde geotermiche è pari a $30 \div 60$ W/m, a seconda della conducibilità termica del suolo.

Il circuito di scambio può avere tre diverse configurazioni: a U singola, a U doppia o coassiale (Fig. 3). La configurazione a U singola è la più semplice e lo scambio di calore con il suolo avviene sia in discesa che in risalita. Le tubazioni sono in polietilene ad alta densità (HDPE) con diametri esterni di 25, 32 o 40 mm, e resistenza alla pressione compresa tra 16 e 25 bar. Per mezzo di appositi spaziatori viene assicurata la massima distanza tra i tubi all'interno della sonda, per limitare il cortocircuito termico e minimizzare la resistenza termica dello scambiatore al suolo. Si possono affiancare, nello stesso foro, due circuiti (sonda a doppia U) al fine di ottenere uno scambio termico più efficace e di avere un sistema ridondante, in grado di funzionare anche in caso di rottura di una delle due tubazioni. Le sonde coassiali sono formate da due tubi concentrici di diametro differente, collegati sul fondo della perforazione. L'ingresso del fluido può avvenire dal tubo centrale o dalla corona circolare tra il tubo interno e quello esterno: lo scambio di calore con il suolo avviene però soltanto quando il fluido transita nella corona circolare esterna. Rispetto alla sonda a U, la superficie di scambio con il terreno è più ampia e il contatto termico è più diretto. Tali vantaggi sono però compensati dalla maggiore cortocir-

cuitazione termica esistente tra le tubazioni e da una fase di posa in opera decisamente più complessa e delicata. Per tali motivi, la configurazione più utilizzata è la sonda a U singola e, soprattutto in Germania e Svizzera, a U doppia.

Lo spazio tra il foro ed i tubi deve essere riempito con un materiale termicamente conduttivo (Tab. 1). In Svezia, dove per prime si diffusero le sonde geotermiche negli anni Ottanta, nelle perforazioni in roccia si utilizza l'acqua come riempimento, poiché essa raggiunge un'elevata conducibilità termica allo stato solido, mentre allo stato liquido il gradiente verticale di temperatura e densità genera moti convettivi che riducono la resistenza allo scambio termico (Gustafsson e Westerlund, 2011). Nei terreni non coesivi, si può utilizzare la sabbia quarzifera solo nelle installazioni in sistemi

Tab. 1. Conducibilità termiche dei materiali di riempimento delle sonde geotermiche più comunemente utilizzati.

Thermal conductivities of the most commonly adopted borehole filling materials.

Materiale	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
Acqua	0.59
Ghiaccio	2.32
Sabbia quarzifera	5
Bentonite	0.6
Calcestruzzo	1.8
Grout geotermici convenzionali	2÷2.8
Grout geotermici con grafite	>5

monofalda, avendo cura comunque di impermeabilizzare (ad esempio con bentonite) la parte più superficiale della sonda per evitare che diventi una via di migrazione preferenziale per un eventuale fenomeno di contaminazione superficiale. Più comunemente si adottano calcestruzzi premiscelati specifici, contenenti bentonite e additivi che migliorano le performance termiche. L'aggiunta di bentonite serve inoltre ad evitare di mettere in comunicazione acquiferi differenti, eventualità piuttosto probabile viste le profondità abituali di perforazione. Tra gli altri additivi si possono annoverare gli inerti di sabbia quarzifera ma anche micro particelle di grafite (Delaleux *et al.*, 2012) con la funzione di aumentare la conducibilità termica del materiale di riempimento. L'iniezione deve essere effettuata a partire dal fondo del foro, per evitare la formazione di vuoti nella cementazione che aumenterebbero la resistenza termica dello scambiatore.

Il fluido utilizzato per il trasporto di calore nel circuito sonde deve avere un basso punto di solidificazione, una bassa viscosità, un'elevata conducibilità termica e una ridotta tossicità. I fluidi più utilizzati sono soluzioni di glicole propilenico, glicole etilenico e cloruro di calcio, con concentrazioni differenti a seconda delle temperature minime previste durante il funzionamento dell'impianto (Tab.

2): per estrarre calore dal sottosuolo, infatti, la temperatura del fluido della sonda può scendere di alcuni gradi sotto lo zero. In generale, aumentando la concentrazione di antigelo, diminuisce la temperatura di solidificazione ma aumenta la viscosità e conseguentemente il costo energetico di circolazione del fluido. Il glicole etilenico è un fluido poco costoso, di media viscosità e con una buona conducibilità termica, ma la sua forte tossicità lo rende pericoloso nell'ipotesi (pur poco probabile) di un suo sversamento in falda o di una fuoriuscita dal circuito sonde. Per questo motivo si ricorre sempre più frequentemente al glicole propilenico, che è atossico (è utilizzato anche nell'industria alimentare e farmaceutica) ma ha un costo maggiore ed è più viscoso. La degradazione in falda del glicole etilenico e propilenico è rapida, tuttavia la presenza di additivi anticorrosione e antimuffa può inibirli fortemente (Klotzbücher *et al.*, 2007). Le soluzioni di cloruro di calcio, a parità di temperatura di solidificazione, hanno valori di viscosità molto inferiori rispetto a quelle dei glicoli e costi molto inferiori. Esse presentano tuttavia lo svantaggio di essere corrosive e richiedono, pertanto, componenti appositamente progettate. L'utilizzo di acqua pura richiede un sovradimensionamento dell'impianto, per evitare che la temperatura del fluido scenda sotto gli 0°C.

Tab. 2. Proprietà fisiche dei fluidi termovettori più comunemente utilizzati negli impianti geotermici a bassa entalpia.

Physical properties of the most commonly adopted BHE heat carrier fluids.

Fluido	T_{cong} [°C]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	μ [10 ⁻³ Pas ⁻¹]	
			a 0°C	a 30°C
Acqua pura	0	0.59	1.79	0.80
Glicole propilenico 20%	-7	0.45	4.00	1.78
Glicole propilenico 30%	-12	0.42	7.00	2.37
Glicole etilenico 20%	-8	0.44	3.27	1.03
Glicole etilenico 30%	-16	0.42	4.38	1.30
CaCl ₂ 10%	-7	0.57	2.13	0.93
CaCl ₂ 20%	-20	0.54	3.12	1.54

3.2. Dimensionamento e simulazione dell'impianto

La progettazione dei campi di sonde geotermiche si basa sul calcolo delle temperature del fluido termovettore, dalle quali dipendono le performance della pompa di calore. Il dimensionamento deve quindi minimizzare il costo di installazione, che è superiore rispetto alle altre soluzioni per la climatizzazione, con il vincolo di mantenere temperature del fluido compatibili con una accettabile efficienza dell'impianto, per ottenere una congrua riduzione dei costi di mantenimento rispetto agli impianti tradizionali.

Negli impianti geotermici a circuito chiuso, la pompa di calore scambia una potenza termica P con il circuito del fluido termovettore:

$$P = (\rho c)_f \cdot Q_f \cdot \Delta T_f \quad (1)$$

Dove Q_f è la portata di circolazione del fluido termovettore [L³T⁻¹], mentre $(\rho c)_f$ è la sua massa termica [ML⁻¹T²K⁻¹] e $\Delta T_f = T_{f,out} - T_{f,in}$ è la differenza di temperatura del fluido tra il ritorno e la mandata al circuito di geoscambio.

Lo scambio di calore tra la sonda e il terreno circostante fu modellizzato da Eskilson (1987) con un'analogia con un circuito elettrico (Fig. 4) composto da due resistenze in serie (la resistenza termica della sonda R_b e quella del suolo R_g) e tre nodi, che rappresentano:

- il terreno ad una distanza infinita dalla sonda, alla quale si può considerare che il disturbo termico sia nullo:

$$T_s = T(r = \infty, t) = T_0 \quad (2)$$

- la parete della perforazione, di raggio r_b , che è l'interfaccia tra il suolo e la sonda geotermica, alla temperatura:

$$T_s(r = r_b, t) = T_b(t) \quad (3)$$

- il fluido termovettore alla tempe-

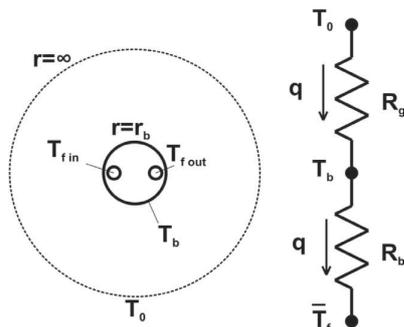


Fig. 4. Analogia tra sonda geotermica e circuito elettrico (adattata da (Eskilson, 1987)).

Electrical circuit analogy of a borehole heat exchanger (adapted from (Eskilson, 1987)).

ratura media tra ingresso e uscita della sonda:

$$\bar{T}_f(t) = \frac{T_{f\text{in}}(t) + T_{f\text{out}}(t)}{2} \quad (4)$$

La variazione di temperatura del suolo all'interfaccia con la sonda (T_b) rispetto alla temperatura indisturbata T_0 è quindi:

$$T_b(t) - T_0 = qR_g(t) \quad (5)$$

dove q è la potenza termica per unità di lunghezza [MLT⁻³] ed è positiva se è immessa nel suolo e negativa se è estratta.

La differenza tra la temperatura dell'interfaccia della sonda (T_b) e la temperatura media del fluido (\bar{T}_f), dovuta alla resistenza termica della sonda R_b , è:

$$\bar{T}_f(t) - T_b(t) = qR_b \quad (6)$$

Il salto termico dovuto alla resistenza della sonda va sempre a sfavore del rendimento della pompa di calore. I fattori che influenzano maggiormente il parametro R_b sono la conducibilità termica del grout, la disposizione dei tubi (distanza reciproca e distanza dalla parete del perforo), la portata e il tipo di fluido termovettore: su questi parametri si può intervenire per ottimizzare il rendimento della sonda. Per una trattazione esaustiva delle formule comunemente

utilizzate per il calcolo della resistenza termica della sonda, si rimanda al lavoro di Lamarche *et al.* (2010) e al modello di Bauer *et al.* (2011).

La resistenza termica del suolo R_g è calcolata con formule analitiche o con modelli numerici e dipende dalle proprietà termiche del suolo e dalla configurazione della sonda o del campo di sonde. Il metodo più comunemente utilizzato è quello delle *g-functions* (Eskilson, 1987), funzioni adimensionali che descrivono l'andamento temporale della resistenza termica del suolo:

$$g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) = 2\pi\lambda_g R_g \quad (7)$$

$$R_g = \frac{1}{2p\lambda_g} g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) \quad (8)$$

dove r_b è il raggio del perforo, H è la lunghezza della sonda, λ_g e c_g sono rispettivamente la conducibilità e la capacità termica del suolo, e $t_s = H^2 \cdot c_g / 9\lambda_g$ è il tempo necessario al raggiungimento della stazionarietà dello scambio conduttivo tra sonda e terreno. A titolo di esempio, in Fig. 5 è riportato un grafico che rappresenta le *g-functions* in un campo di 4 sonde poste ai vertici di un quadrato,

per differenti valori della distanza reciproca tra gli scambiatori.

La conducibilità termica del suolo influenza fortemente lo scambio termico e quindi è un parametro fondamentale nel progetto dei campi di sonde geotermiche. Essa dipende dalla litologia e dalla saturazione del suolo e può variare in intervalli molto ampi (Tab. 3). Per stimare con precisione e in situ questo parametro, è stato elaborato il Thermal Response Test (Gehlin, 2002), una prova nella quale si immette una potenza termica costante (prodotta generalmente da una resistenza elettrica) in una sonda geotermica, per un tempo generalmente non inferiore a 48 ore. Da questi test si ricava, oltre alla conducibilità termica del suolo λ_g , anche la resistenza termica della sonda R_b permettendo una progettazione più precisa dei grandi impianti (ad es. sopra i 50kW).

La teoria di Eskilson è alla base dei due software più diffusi nella progettazione delle sonde geotermiche: Earth Energy Design (Hellstrom e Sanner, 2000) e GLHEPRO (Spitler, 2000). Entrambi i programmi, a partire dalle caratteristiche del suolo, dalla configurazione della sonda e dal carico termico mensile e di picco, calcolano le temperature del fluido ter-

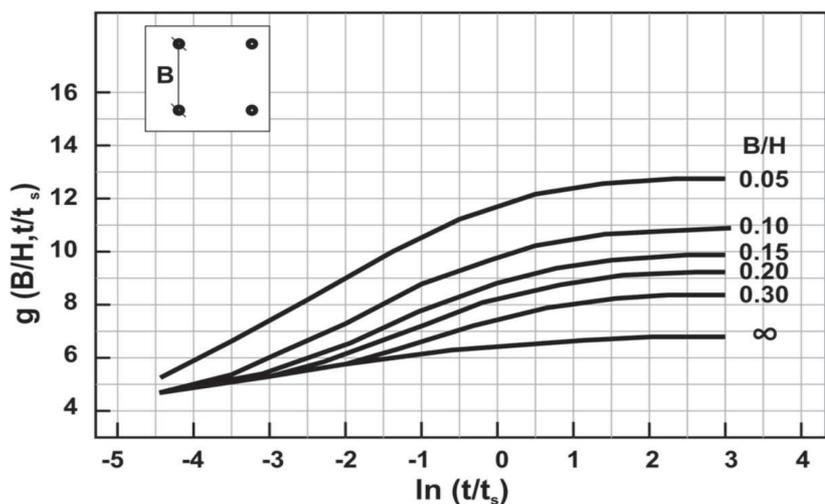


Fig. 5. Diagramma delle *g-functions* per un campo di 4 sonde geotermiche di lunghezza H , disposte ai vertici di un quadrato di lato B (adattata da (Eskilson, 1987)).

Diagram of g-functions of 4 borehole heat exchangers, each one with a depth H and positioned in the vertexes of a square with a side length B (adapted from (Eskilson, 1987)).

Tab. 3. Conducibilità termiche di alcune tipologie di suolo (adattato da (VDI, 2000)).
Thermal conductivities of different soil types (adapted from (VDI, 2000)).

Materiale	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
Granito	2.4÷4.1
Calcere	2.5÷4.0
Arenaria	1.3÷5.1
Ghiaia asciutta	0.4÷0.5
Ghiaia satura	~1.8
Sabbia asciutta	0.3÷0.8
Sabbia satura	1.7÷5.0
Argilla/limo asciutto	0.4÷1.0
Argilla/limo saturo	0.9÷2.3
Torba	0.2÷0.7

movettore ricavando la lunghezza minima necessaria a soddisfare i requisiti di temperatura del fluido minima (in modalità riscaldamento) e massima (in modalità raffreddamento).

Negli ultimi anni si è imposto l'uso di codici numerici di flusso e trasporto anche nella progettazione dei campi di sonde geotermiche. Il codice FE-FLOW, ha un'apposita interfaccia per il calcolo delle temperature del fluido della sonda (Diersch *et al.*, 2011a; b), che utilizza il modello di Eskilson o quello, più recente, di Al-Khoury (2010). Il principale vantaggio delle simulazioni con questi codici numerici è la possibilità di tenere in conto l'advezione e la dispersione termica operata dai moti di falda e di utilizzare geometrie complesse dei campi di sonde, mentre i software EED e GLHEPRO prevedono solo alcune tipologie standard con uno scambio termico puramente conduttivo.

4. Altri impianti a circuito chiuso

4.1. Pali geotermici

I pali di fondazione possono essere utilizzati per lo scambio termico con il suolo, fissando le tubazioni per lo scambio termico all'armatura del

palo. I pali geotermici sono quindi scambiatori verticali con un funzionamento simile a quello delle sonde geotermiche. La differenza principale è la minore resa (10÷30 W/m, a fronte dei 30÷60 W/m delle sonde geotermiche), dovuta a due fattori: la minore conduttività termica dei terreni nei quali si utilizza questa fondazione (argille e terreni organici) e la necessità di contenere la dilatazione e contrazione termica del palo, che comprometterebbe la stabilità dell'edificio.

Il vantaggio principale dei pali geotermici è il risparmio sui costi di perforazione, dato dall'utilizzo di una perforazione per scopi sia strutturali che energetici. Per contro, la minore resa termica e la distribuzione spaziale dei pali, che richiede lunghe tubazioni di distribuzione, comporta dispersioni termiche e alti costi energetici per la circolazione del fluido.

L'istituto svizzero SUPSI ha sviluppato un software specifico per i pali geotermici, PILESIM 2 (Pahud e Hubbuch, 2007), tuttavia è comune anche l'utilizzo, seppure improprio, dei software di dimensionamento per le sonde geotermiche come EED e GLHEPRO.

4.2. Sonde geotermiche orizzontali

Nel caso sia disponibile vicino all'edificio una grande superficie di terreno, si può adottare un circuito chiuso orizzontale, installato a profondità molto ridotte (tra 0.8 e 2 m): a queste profondità, la temperatura del suolo varia durante l'anno, sia pure in un intervallo ridotto. Le tipologie adottate sono la tubazione a serpentina (eventualmente con alette per aumentare la superficie di scambio) o a bobina (gli "earth coils"), le tubazioni a sviluppo lineare e i cosiddetti "basket geotermici" (Fig. 8).

I costi di installazione sono inferiori rispetto a quelli delle sonde e dovuti in buona parte ai movimenti terra necessari per lo scavo della trin-

cea o dello sbancamento. Per contro, lo scambio termico con il suolo è meno efficiente rispetto alle altre tipologie, e i rendimenti energetici sono molto più bassi. È necessaria inoltre un'area molto grande per il circuito di geoscambio, poiché le rese sono molto basse: 10÷40 W/m² per le tubazioni a serpentina e 4÷16 W/m per quelle a sviluppo lineare, con una forte dipendenza dall'umidità del terreno (Caleffi *et al.*, 2010). Su quest'area, inoltre, non possono sorgere edifici o piante ad alto fusto e non si possono installare altri sottoservizi.

5. Impianti a circuito aperto

Negli impianti a circuito aperto, la pompa di calore opera uno scambio termico con l'acqua di falda superficiale, che viene prelevata da un pozzo (Fig. 6) e successivamente scaricata, con modalità differenti che dipendono sia dalle scelte progettuali che dalle prescrizioni normative.

La reimmissione in un corpo idrico superficiale (ad es. in un fiume o in un canale irriguo) è la modalità di scarico più semplice ed economica, ed evita il ritorno dell'acqua raffreddata (o riscaldata) al pozzo di prelievo (corto-circuitazione termica, si veda Fig. 7). Tale modalità crea tuttavia un depauperamento della risorsa idrica sotterranea. La reimmissione diretta in falda può avvenire in superficie, con bacini di ricarica o trincea drenante, o in profondità, con pozzi che iniettano nella zona satura o nella zona vadosa.

Una soluzione adottata più di rado è l'utilizzo di un pozzo di iniezione e di reimmissione lungo la verticale, detto Standing Column Well (Deng *et al.*, 2005; Orio *et al.*, 2005): la maggiore complessità dell'installazione e il rischio di corto circuitazione termica, infatti, non sono facilmente compensati dal risparmio ottenuto durante le operazioni di perforazione.

5.1. Dimensionamento e simulazione dell'impianto

La potenza termica (P) scambiata con la falda dipende dalla portata prelevata (Q) e dalla differenza di temperatura dell'acqua di falda tra prelievo e reimmissione (ΔT_w):

$$P = (\rho c)_w \cdot Q \cdot \Delta T_w \quad (9)$$

dove $(\rho c)_w$ è la massa termica dell'acqua ($4.18 \text{ MJ/m}^3 \text{ K}$).

In caso di reimmissione in falda, la differenza di temperatura tra ingresso e uscita deve essere il più possibile contenuta, per evitare l'alterazione dell'attività microbica e geochimica del sistema acquifero. Secondo la normativa tedesca VDI 4640 il valore di ΔT_w non deve superare i 6°C (VDI, 2000).

I parametri chimici dell'acqua devono essere studiati in fase progettuale: la presenza di ioni di ferro o manganese, o un'elevata durezza, per esempio, richiedono trattamenti preliminari dell'acqua prelevata, per evitare la formazione di incrostazioni nello scambiatore di calore. Nei pozzi, inoltre, l'attività batterica provoca fenomeni di incrostazione (biofouling) che richiedono periodici trattamenti di rimozione.

Gli impianti geotermici open loop con reimmissione in falda richiedono uno studio numerico in regime transitorio dell'estensione del disturbo termico nell'acquifero (thermal plume) e della cortocircuitazione termica (thermal breakthrough) tra pozzo di prelievo e pozzo di reimmissione. L'estensione e l'entità del disturbo termico, infatti, dipendono da parametri variabili nello spazio e/o nel tempo, come la portata e la potenza termica scambiata con la falda, la conducibilità idraulica, il gradiente idraulico, la porosità efficace e la dispersività termica. La cortocircuitazione termica (Fig. 7), che si verifica quando l'acqua prelevata dal pozzo di estrazione risente del disturbo termico provocato dal pozzo di reimmissione

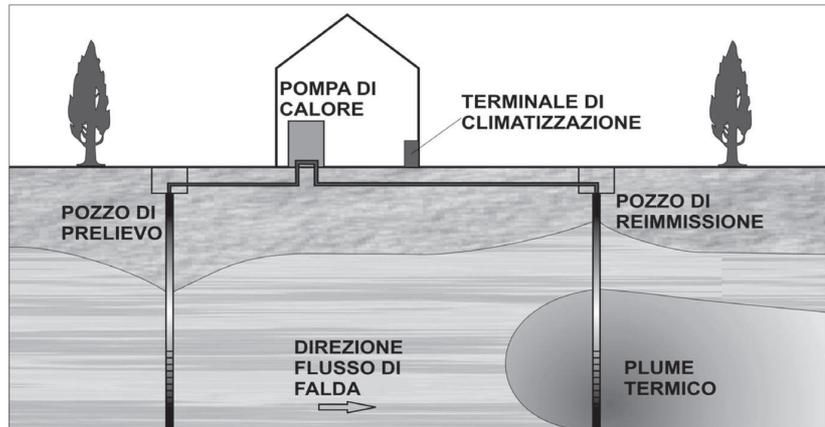


Fig. 6. Schema di un impianto geotermico a circuito aperto e del disturbo termico attorno al pozzo di reiniezione.

Scheme of an open-loop geothermal heat pump (groundwater heat pump) and of the thermal plume around the reinjection well.

ne, dipende dalla distanza tra i due pozzi e dall'estensione del plume termico (Banks, 2009b).

Per la simulazione termo-idrogeologica è consigliato l'utilizzo di codici numerici di modellizzazione di flusso e trasporto di calore, quali FEFLOW (DHI-WASY, 2002) e SEAWAT (USGS, 2002). Sfruttando l'analogia tra i due meccanismi di trasporto (Banks, 2009a) si possono anche utilizzare modelli di trasporto dei contaminanti nel sottosuolo come MODFLOW (USGS, 1988) per simulare il trasporto di calore (Hecht-Mendez *et al.*, 2010; Sethi e Di Molfetta, 2007).

5.2. Vantaggi e svantaggi dei sistemi a circuito aperto

I vantaggi principali degli impianti a circuito aperto sono il basso costo di installazione e l'ingombro limitato: ad esempio, con una coppia di pozzi (prelievo e reimmissione) con portata 40 l/s e una differenza di temperatura tra ingresso e uscita di 6°C , è possibile servire un impianto di potenza di 1 MW , mentre per un analogo impianto a circuito chiuso sarebbero necessarie perforazioni per almeno 15000 metri ($100 \div 150$ sonde).

Il rendimento della pompa di calore negli impianti a circuito aperto

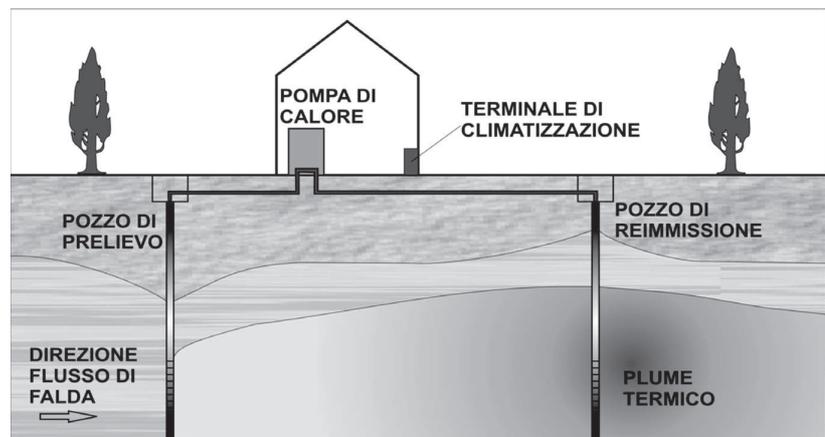


Fig. 7. Cortocircuitazione termica in un impianto open loop: il plume termico del pozzo di reimmissione raggiunge il pozzo di prelievo.

Thermal breakthrough in an open loop plant: the thermal plume of the reinjection well reaches the abstraction well.

è generalmente superiore rispetto a quello degli impianti a circuito chiuso: in assenza di cortocircuitazione termica, infatti, in un impianto open loop l'acqua di falda mantiene una temperatura costante, a differenza di quanto avviene in un impianto closed loop, nel quale il terreno circostante subisce un'alterazione della temperatura dovuta allo scambio termico.

Il consumo energetico dell'impianto dipende anche dalla soggiacenza di falda e quindi dalla prevalenza della pompa e dalla potenza impiegata per il pompaggio da pozzo, che si somma al consumo energetico della pompa di calore. In caso di elevata soggiacenza della falda, potrebbe essere più conveniente l'adozione di un impianto a circuito chiuso.

Gli svantaggi principali degli impianti a circuito aperto sono:

- la necessità di una caratterizzazione idrodinamica approfondita del sistema acquifero, che in mancanza di studi preesistenti può comportare anche l'effettuazione di

sondaggi e prove di falda (Di Molletta e Sethi, 2012);

- il depauperamento della falda e gli eventuali costi di smaltimento in fognatura, in caso di prelievo senza reimmissione;
- la diffusione di un plume termico, nel caso in cui l'acqua prelevata sia smaltita in falda, con conseguenze negative su eventuali impianti analoghi posti a valle;
- la lunghezza e la difficoltà delle procedure di approvazione, dovute non solo a una scarsa chiarezza della legislazione in materia, ma anche al rischio di mettere in comunicazione acquiferi differenti.

Per questi motivi, gli impianti a circuito aperto sono adatti per potenze elevate, dove i costi della caratterizzazione e della progettazione abbiano una minore incidenza sul costo totale.

La Pianura Padana è particolarmente adatta per gli impianti a circuito aperto, poiché gli acquiferi superficiali sono potenti, permeabili e hanno una ridotta soggiacenza (Lo Russo *et al.*, 2009).

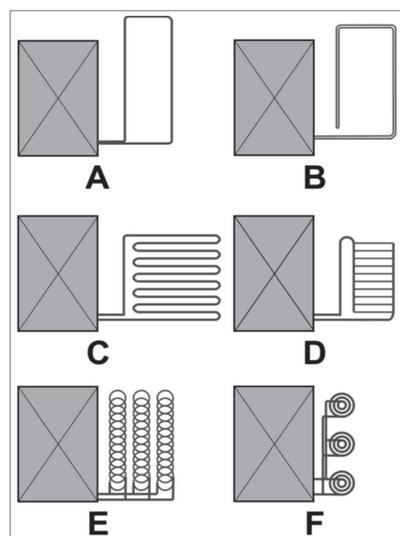


Fig. 8. Classificazione delle sonde geotermiche orizzontali: posa lineare con tubo singolo (A) e doppio (B), serpentina in serie (C) e in parallelo (D), earth coils (E) e basket geotermici (F).
Classification of horizontal closed-loop geothermal heat pumps: single (A) and double (B) linear pipe, serpentine in series (C) and in parallel (D), earth coils (E) and geothermal baskets (F).

6. Aspetti economici e ambientali

6.1. Riduzione delle emissioni di gas serra

Le pompe di calore geotermiche, se correttamente dimensionate, permettono di ridurre in modo notevole i consumi di energia primaria e le emissioni di gas serra. I fattori chiave sono il COP della pompa di calore e il mix di fonti utilizzate per la produzione di energia elettrica.

È stato stimato che il COP medio degli impianti open loop in Piemonte sia pari a 7.5 e, considerando la produzione elettrica italiana, a questo rendimento corrisponde una riduzione del 67% delle emissioni di CO₂ rispetto a una caldaia a metano (Lo Russo *et al.*, 2009). La Life Cycle Analysis (LCA) applicata alle sonde geotermiche (Saner *et al.*, 2010)

evidenzia come il principale impatto ambientale sia la CO₂ dovuta al consumo di energia elettrica (87.1%), seguito dalle perdite di refrigerante della pompa di calore (6.1%), sebbene quest'ultimo impatto si sia ridotto notevolmente con l'abolizione dei CFC. Esaminando i mix energetici di 29 Paesi Europei, Saner *et al.* concludono che le sonde geotermiche riducono le emissioni di CO₂ di circa il 75% rispetto ad una caldaia a metano in Paesi come Norvegia, Svezia, Francia e Svizzera (dove gran parte dell'energia elettrica è prodotta da centrali idroelettriche e nucleari), mentre in Italia (dove la produzione è ancora basata in gran parte sui combustibili fossili) tale risparmio si riduce al 28%.

6.2. Sicurezza e rischi ambientali

L'assenza di fiamme e di stoccaggi di idrocarburi rende le pompe di calore, al pari del teleriscaldamento, la soluzione più sicura per il riscaldamento degli edifici.

I potenziali rischi ambientali legati alla geotermia a bassa entalpia sono:

- le variazioni dei parametri geochimici dell'acquifero, pressoché trascurabili nell'intervallo di temperatura abituale delle pompe di calore geotermiche;
- alterazioni temporanee della microbiologia e dell'attività batterica in presenza di forti alterazioni termiche in falda (Briellmann *et al.*, 2009);
- la messa in comunicazione tra acquiferi differenti, che può avvenire con lo scavo di pozzi e di sonde: sebbene queste ultime siano ormai realizzate con grout geotermici poco permeabili, è possibile la formazione di fessure che diventano vie preferenziali di infiltrazione dei contaminanti;
- le eventuali contaminazioni dovute ai fanghi di perforazione;
- il rilascio del fluido termovettore, per rottura della tubazione o per sversamento accidentale. Si tratta comunque di un'eventualità

- piuttosto remota, il volume sversabile è di poche decine di litri, e la biodegradazione dei composti abitualmente usati (glicole propilenico o etilenico) è piuttosto rapida (Klotzbücher *et al.*, 2007);
- il rilascio di refrigerante della pompa di calore che solitamente è un composto a elevato potere di effetto serra (1000÷2000 volte maggiore dell'anidride carbonica).

6.3. Legislazione e pianificazione territoriale

Allo stato attuale manca una legislazione unificata a livello nazionale: solo in Lombardia è infatti presente un regolamento regionale che introduce una procedura semplificata per l'autorizzazione degli impianti a circuito chiuso (Regolamento Regionale n°7/2010), che ha avuto come conseguenza una considerevole crescita del numero di installazioni.

La mancanza di una normativa robusta, in verità, è un problema diffuso in molti Paesi (Haehnlein *et al.*, 2010) e limita fortemente la diffusione di tale tecnologia. In genere, vengono poste prescrizioni di installazione (es. obbligo di cementazione delle sonde), limiti di variazione della temperatura del suolo e dell'acqua di falda ($3 \div 11^\circ\text{C}$), distanze minime tra gli impianti ($5 \div 30\text{m}$), dal confine della proprietà ($2.5 \div 10\text{m}$) e da pozzi ad uso potabile (fino a 300m).

Per quanto riguarda l'estensione dei plume termici, l'esperienza maturata in città come Londra (Fry, 2009) dimostra che è importante programmare in tempo utile le procedure di autorizzazione, i sistemi informativi e la pianificazione territoriale delle pompe di calore geotermiche in ambiente urbano, soprattutto per i grandi impianti open loop (ad es. con potenze superiori a 1 MW), che provocano un disturbo termico riscontrabile anche a centinaia di metri di distanza dall'impianto. In caso contrario, il sovrasfruttamento termico dell'acquifero può portare a una forte riduzione delle performan-

ce di tutti gli impianti (Ferguson e Woodbury, 2006). Gli impianti a sonde geotermiche, invece, distribuendo il disturbo termico su grandi profondità, danno origine a plume termici di ridotta estensione areale.

7. Conclusioni

La tecnologia delle pompe di calore geotermiche si è sviluppata molto negli ultimi 30 anni, diffondendosi in Svezia, Stati Uniti, Germania, Svizzera e Austria, in particolare negli edifici di nuova costruzione. Negli ultimi anni, questa fonte rinnovabile di energia termica si sta diffondendo anche in Italia, sia pure con difficoltà dovute principalmente all'alto costo dell'energia elettrica, che rende le pompe di calore meno convenienti rispetto a quanto accade negli altri Paesi.

Le pompe di calore geotermiche si dividono in due grandi categorie: gli impianti open loop, che scambiano calore con l'acqua di falda, e gli impianti closed loop, nei quali lo scambio termico con il terreno è operato da un circuito chiuso di tubazioni, che può essere una serpentina orizzontale o una tubazione in trincea (sonde geotermiche orizzontali), un circuito inserito in un perforazione profonda effettuata appositamente (sonde geotermiche verticali) o in un palo di fondazione (pali geotermici). La sonda geotermica è la tipologia più diffusa, per il suo ridotto ingombro e la sua applicabilità quasi universale; seguono gli impianti open loop che, per le utenze di grandi dimensioni e in presenza di acquiferi di potenzialità adeguata, permettono notevoli risparmi economici rispetto agli impianti closed loop. I pali geotermici e le sonde orizzontali sono invece applicazioni di nicchia.

Per tutte le tipologie è fondamentale la fase di progettazione, poiché si tratta di impianti che hanno costi di installazione più elevati rispetto alle tipologie tradizionali, che possono es-

sere recuperati in tempi congrui solo se il dimensionamento è corretto. In particolare, è importante la simulazione del funzionamento dell'impianto per garantire uno sfruttamento sostenibile del calore nel sottosuolo.

Gli impianti geotermici a pompa di calore evitano le emissioni inquinanti sul sito, rendendo questa soluzione interessante per il riscaldamento degli edifici in ambito urbano. Il rendimento di energia primaria, soprattutto per il raffrescamento in ambito residenziale, è molto più elevato rispetto alle tradizionali pompe di calore aerotermiche. Un vantaggio importante è anche la possibilità di affidare a un solo impianto – peraltro di dimensioni contenute – la generazione del caldo e del freddo. L'assenza di fiamme e stoccaggi di combustibile rende questi impianti molto sicuri.

Gli aspetti ambientali più critici sono, negli impianti a circuito aperto, il prelievo e la reimmissione di acqua di falda, con conseguente alterazione della distribuzione spaziale del carico idraulico e della temperatura. Il problema della comunicazione tra acquiferi differenti, comune anche alle sonde geotermiche, deve essere attentamente considerato. Il rilascio o lo sversamento di fluidi termovettori è un'eventualità remota e le quantità coinvolte sono modeste, inoltre questo problema si può eliminare utilizzando antigelo atossici come il cloruro di calcio e il glicole propilenico. I nuovi refrigeranti utilizzati per le pompe di calore, che hanno sostituito da più di vent'anni i CFC, hanno un effetto sull'ozono trascurabile; anche l'effetto serra causato da eventuali fuoriuscite è modesto, viste le ridotte quantità utilizzate.

La riduzione delle emissioni di CO₂ ottenuta con le pompe di calore geotermiche dipende dal mix di fonti usate per la produzione di energia elettrica: in Italia, la riduzione di emissioni è stimata al 28% per gli impianti con sonde geotermiche, rispetto ad una caldaia a metano.

Le pompe di calore geotermi-

che rappresentano una soluzione interessante per la climatizzazione, soprattutto negli edifici di nuova realizzazione. Si rende però necessaria l'emanazione di una legislazione chiara e, preferibilmente, a livello nazionale. Nei contesti urbani è inoltre necessaria una pianificazione territoriale, soprattutto per gli impianti open loop, il cui disturbo termico in falda può estendersi per centinaia di metri a valle dell'impianto.

Bibliografia

- Al-Khoury, R., Kölbl, T., e Schramedei, R., 2010. Efficient numerical modeling of borehole heat exchangers. *Computers and Geosciences*, 36(10), pp. 1301-1315.
- Banks, D., 2009a. An introduction to 'thermogeology' and the exploitation of ground source heat. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42, pp. 283-293.
- Banks, D., 2009b. Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: a review and synthesis of analytical approaches. *Hydrogeology Journal*, 17(5), pp. 1149-1155.
- Bauer, D., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., e Diersch, H. J. G., 2011. Thermal resistance and capacity models for borehole heat exchangers. *International Journal of Energy Research*, 35(4), pp. 312-320.
- Brielmann, H., Griebler, C., Schmidt, S. I., Michel, R., e Lueders, T., 2009. Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiology Ecology*, 68(3), pp. 273-286.
- Caleffi, M., Guidetti, F., Casarino, S., Crimella, A., Doninelli, M., Doninelli, M., Mazzetti, D., Planca, R., Soldarini, A., Tadini, C., Tadini, M., e Tomasoni, M., 2010. Impianti a pompe di calore geotermiche. *Idraulica Caleffi, Poligrafica Moderna S.r.l. Novara, Novara*.
- Delaleux, F., Py, X., Olives, R., e Dominguez, A., 2012. Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grouts conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 33-34(1), pp. 92-99.
- Deng, Z., Rees, S. J., e Spitler, J. D., 2005. A model for annual simulation of standing column well ground heat exchangers. *HVAC and R Research*, 11(4), pp. 637-655.
- DHI-WASY, 2002. *FEFLOW User Manual*, DHI-Wasy, Berlin.
- Di Molfetta, A., e Sethi, R., 2012. *Ingegneria degli acquiferi*, Springer-Verlag Italia, Milano.
- EIA, U. S., 2009. *US Energy Information Administration - International Energy Statistics*.
- Eskilson, P., 1987. *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*, Lund University (Sweden).
- EurObserv'ER, 2011. *11th EurObserv'ER Report - The state of renewable energies in Europe*.
- Ferguson, G., e Woodbury, A. D., 2006. Observed thermal pollution and post-development simulations of low-temperature geothermal systems in Winnipeg, Canada. *Hydrogeology Journal*, 14(7), pp. 1206-1215.
- Fry, V. A., 2009. Lessons from London: regulation of open-loop ground source heat pumps in central London. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42, pp. 325-334.
- Gehlin, S., 2002. *Thermal Response Test - Method Development and Evaluation*, Lulea University of Technology, Lulea (Sweden).
- Gustafsson, A. M., e Westerlund, L., 2011. Heat extraction thermal response test in groundwater-filled borehole heat exchanger - Investigation of the borehole thermal resistance. *Renewable Energy*, 36(9), pp. 2388-2394.
- Haehnlein, S., Bayer, P., e Blum, P., 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), pp. 2611-2625.
- Hecht-Mendez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., e Bayer, P., 2010. Evaluating MT3DMS for Heat Transport Simulation of Closed Geothermal Systems. *Ground Water*, 48(5), pp. 741-756.
- Hellstrom, G., e Sanner, B., 2000. *Earth Energy Designer, User Manual Version 2.0*.
- Holm, A., Blodgett, L., Jennejohn, D., e Gawell, K., 2010. *Geothermal energy: international market update*. Geothermal energy association.
- Klotzbücher, T., Kappler, A., Straub, K. L., e Haderlein, S. B., 2007. Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers. *Geothermics*, 36(4), pp. 348-361.
- Lamarche, L., Kaji, S., e Beauchamp, B., 2010. A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. *Geothermics*, 39(2), pp. 187-200.
- Lo Russo, S., Boffa, C., e Civita, M. V., 2009. Low-enthalpy geothermal energy: An opportunity to meet increasing energy needs and reduce CO₂ and atmospheric pollutant emissions in Piemonte, Italy. *Geothermics*, 38(2), pp. 254-262.
- Lund, J. W., 2004. Geothermal energy use compared to other renewables. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 28(4), pp. 10-12.
- Orio, C. D., Johnson, C. N., Rees, S. J., Chiasson, A., Deng, Z., e Spitler, J. D., 2005. A Survey of Standing Column Well Installations in North America. *ASHRAE Transactions*, 111(2), pp. 109-121.
- Pahud, D., e Hubbuch, M., 2007. "Measured Thermal Performances of the Energy Pile System of the Dock Midfield at Zurich Airport." *European Geothermal Congress, Unterhaching (Germany)*, pp. 7.
- Saner, D., Juraske, R., Kübert, M., Blum, P., Hellweg, S., e Bayer, P., 2010. Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), pp. 1798-1813.
- Sethi, R., e Di Molfetta, A., 2007. Heat transport modeling in an aquifer downgradient a municipal solid waste landfill in Italy. *American Journal of Environmental Sciences*, 3(3), pp. 106-110.
- Spitler, J. D., 2000. "GLHEPRO - A design tool for commercial building ground loop heat exchangers." *4th International Heat Pumps in Cold Climates Conference, Aylmer, Quebec*, pp. 16.
- USGS, 1988. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*, USGS.
- USGS, 2002. *User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density*, USGS.
- VDI, 2000. *VDI 4640 - Thermal use of underground*. Blatt 1-4.