



NUMERO **111**

# **IL GEOLOGO**

PERIODICO UFFICIALE



**ORDINE DEI GEOLOGI  
DELLA TOSCANA**

**Il Punto - Editoriale**

**Nota a cura del coordinatore di redazione**

**Termogeologia: la nuova frontiera della geotermia**

**Nummuliti, i fossili guida dell'Eocene**

**Mappatura di faglie capaci mediante integrazione di metodi geofisici ad alta risoluzione**

**Il Codice dei Contratti Pubblici al tempo del Coronavirus**





**PROF. MARCELLO VITI**

DIPARTIMENTO DI SCIENZE FISICHE, DELLA TERRA E  
DELL'AMBIENTE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SIENA

# Termogeologia: la nuova frontiera della geotermia

## Cos'è la Termogeologia

Il termine "*Thermogeology*" è stato coniato dall'idrogeologo David Banks per mettere in luce l'analogia tra il flusso nell'acquifero ed il trasporto dell'energia termica dal sottosuolo alla superficie (Banks, 2008). Nel primo caso, l'acqua si sposta nella direzione del gradiente piezometrico in relazione alla conducibilità idraulica delle rocce. Tuttavia, l'uomo interviene con pozzi e pompe idrauliche per estrarre l'acqua sotterranea, anche laddove essa non potrebbe raggiungere la superficie. Inoltre, vari tipi di reflui agricoli, civili ed industriali si possono iniettare in profondità per evitare danni alle comunità umane ed ai sistemi ecologici. Anche l'energia immagazzinata nel sottosuolo può essere trasferita alla superficie, usando opportune macchine termiche dette pompe di calore. Il trasferimento può avvenire anche nella direzione opposta in base alle esigenze dell'utente.

Il nome *Termogeologia* è più appropriato di altri sinonimi, come *Geotermia per la climatizzazione*

(Tinti, 2008) e *Geotermia a bassa entalpia* (Casasso e Sethi, 2013). Quest'ultima definizione può essere fuorviante, in quanto non distingue le applicazioni geotermiche classiche da quelle termogeologiche. Com'è noto, l'industria geotermica si è affermata a scala mondiale dalla seconda metà del secolo scorso, con l'obiettivo principale di produrre energia elettrica a spese dell'entalpia trasportata dal fluido geotermico. Quando il contenuto energetico è insufficiente, il geofluido estratto può comunque essere usato per il riscaldamento degli edifici, di serre agricole e floreali e di vasche per l'allevamento del pesce. Il termine *bassa entalpia* andrebbe dunque riservato a tali applicazioni.

La distinzione tra geotermia e termogeologia sta invece nel fatto che nel primo caso si ricerca, si estrae e si sfrutta un geofluido, mentre nel secondo caso l'obiettivo è il trasferimento di calore da o verso il sottosuolo. La geotermia è in primo luogo interessata all'identificazione delle cosiddette anomalie geotermiche, caratterizzate da elevati valori del flusso termico superficiale.

Tali anomalie corrispondono ad un rapido aumento della temperatura con la profondità, causato per esempio da camere magmatiche o plutoni in raffreddamento. Se la struttura della crosta consente l'esistenza, sopra la fonte di calore, di serbatoi saturi di acqua liquida o vapore, l'anomalia può essere raggiunta dalle perforazioni per estrarre il geofluido. In definitiva, la geotermia è contraddistinta dal prelievo di grandi portate di geofluido, mediante pozzi profondi (>1 km) che pescano in serbatoi con temperature anche maggiori di 300 °C (si veda Viti, 2019 per la descrizione dei sistemi geotermici toscani).

Tutt'altre caratteristiche presenta la Termogeologia. Infatti, essa non richiede (ed anzi evita) le anomalie geotermiche della crosta. La profondità delle perforazioni va da pochi metri (sistemi orizzontali) a 100-300 metri al più (sistemi verticali). Inoltre, l'eventuale prelievo avviene dalla falda idrica superficiale, non certo da un serbatoio geotermico profondo. D'altra parte, le applicazioni più promettenti non prevedono alcun prelievo d'acqua sotterranea. I vantaggi di una tale impostazione

sono evidenti. Anzitutto, gli impianti termogeologici possono essere installati, con opportuni accorgimenti, in ogni località del pianeta e sotto ogni condizione climatica. Il fatto di non prelevare geofluidi profondi consente evita i problemi legati allo smaltimento dei liquidi esausti e dei gas non condensabili, tra cui l'anidride carbonica (si veda Viti, 2020 per l'analisi dell'impatto ambientale degli impianti geotermici toscani). Inoltre, la costruzione dell'impianto termogeologico può essere affrontata anche da piccole aziende e professionisti, tra i quali spicca il Geologo.

Al momento, il costo d'installazione di tali impianti è superiore a quello delle soluzioni tradizionali (come le caldaie a gas naturale ed i condizionatori elettrici). Tuttavia è ampiamente dimostrato che il considerevole risparmio sui consumi elettrici permette l'ammortamento del costo iniziale dopo i primi anni di esercizio. Successivamente, la climatizzazione termogeologica dell'edificio costa meno delle tecniche tradizionali, anche per le minori spese di manutenzione.

## La temperatura, il calore e le proprietà termiche delle rocce

Per comprendere i fondamenti e le applicazioni della Termogeologia è opportuno richiamare alcune nozioni di termodinamica. Un sistema è una porzione di materia distinta dalle porzioni adiacenti. L'energia interna ( $U$ ) di un sistema è la somma delle energie possedute dalle particelle che lo compongono (atomi o molecole): energia cinetica, rotazionale, vibrazionale, dei legami chimici e delle interazioni nucleari. Il sistema può inoltre interagire con ciò che lo circonda, compiendo o ricevendo lavoro ( $L$ ) meccanico, elettrico, chimico o altro.

Supponiamo che dell'energia sotto forma di calore ( $Q$ ) fluisca dall'esterno verso il sistema. In generale, il sistema risponde sia variando la propria energia interna, sia compiendo lavoro verso l'esterno:  $Q = \Delta U + L$  (in joule, J o kilojoule, kJ). L'incremento dell'energia interna  $\Delta U$  si riflette nell'aumento di una grandezza facilmente misurabile, la temperatura assoluta  $T$  (espressa in kelvin, K); è opportuno precisare che  $T = t(^{\circ}\text{C}) + 273,15$ . Ricordiamo che il

calore fluisce in modo spontaneo nella direzione in cui la temperatura diminuisce.

Il calore fornito è collegato con l'aumento della temperatura del sistema dalla semplice ma importante relazione:

$$Q = m c_{sp} \Delta T \quad (1)$$

dove  $m$  è la massa del sistema (kg) e  $c_{sp}$  il suo *calore specifico* (J/kg K). Pertanto l'aumento di temperatura è inversamente proporzionale al calore specifico. Più grande è il calore specifico di una sostanza, minore sarà l'aumento o la diminuzione di temperatura quando essa riceve oppure perde calore. Grazie alle sue proprietà molecolari, l'acqua liquida ha un elevato calore specifico ( $c_{sp} = 4186$  J/kg K). Solidi come il ghiaccio, il vetro e il piombo presentano valori più piccoli, rispettivamente 2100, 500 e 130 J/kg K. Il calore specifico dei sedimenti e delle rocce varia nell'intervallo 700-1100 J/kg K. L'acqua è dunque un ottimo accumulatore termico, capace di scambiare molto calore con poca variazione della temperatura. Del resto, è ben noto il ruolo dei grandi corpi d'acqua (laghi e mari) nel mitigare il clima delle aree costiere. Una sorgente termica ideale è un sistema che può emettere o ricevere una quantità indefinita di calore senza variare la sua temperatura. La formula (1) implica che una sorgente reale si avvicina al caso ideale solo se la sua massa è molto grande. Per esempio, il sottosuolo può essere considerato una sorgente termica (seppur non ideale) nei riguardi dell'impianto termogeologico. In altre parole, il sottosuolo si comporta come una riserva quasi inesauribile di energia termica, anche se la sua temperatura è relativamente bassa (10-20 °C nelle applicazioni considerate). Il problema centrale della termogeologia è quindi lo spostamento di abbondante calore a bassa temperatura verso l'edificio da riscaldare. Durante la stagione estiva occorrerà invece trasferire il calore in eccesso dall'edificio al sottosuolo. Consideriamo dunque le modalità di trasmissione del calore. Anzitutto, un corpo irradia onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda sempre più piccola man mano che aumenta la sua temperatura assoluta. Tuttavia, la potenza emessa dipende dalla quarta potenza della temperatura ed è

trascurabile per  $t < 100$  °C. Molto importante invece è il processo di convezione, per cui un fluido (liquido, vapore o gas) trasporta energia termica quando si muove sotto l'azione di forze esterne. La convezione è detta naturale se il fluido si sposta a causa delle variazioni di densità che si generano tra superfici poste a differente temperatura. La convezione è invece forzata se il fluido è sottoposto ad un gradiente di pressione, per esempio entro un circuito idraulico azionato da una pompa. Nell'ambito termogeologico, il contributo della convezione è rilevante quando il calore è trasportato dall'acqua sotterranea, che può essere pompata in superficie oppure può lambire il pozzo termico, se questo intercetta una falda idrica. Come vedremo, anche negli impianti senza prelievo di acqua di falda il calore è trasportato in superficie grazie alla convezione forzata di un apposito fluido di lavoro, detto *termovettore*.

Il meccanismo di conduzione riguarda sia i solidi che i fluidi, purché immobili. Per esempio, un pozzo termico verticale riceve calore mediante conduzione termica dalle rocce circostanti. In generale, la conduzione è un processo transitorio, per cui ogni punto del corpo attraversato dal calore cambia nel tempo la propria temperatura. Tuttavia, in certe condizioni sussistono condizioni stazionarie, per le quali la temperatura varia nel conduttore ma non dipende dal tempo. A tal proposito, consideriamo un prisma di lunghezza  $L$  e sezione trasversale  $A$ , in cui il calore è trasmesso dalla faccia a temperatura maggiore verso quella a temperatura minore (sia  $\Delta T$  la differenza tra le due temperature). Se il processo è stazionario, il calore  $Q$  trasmesso da una faccia all'altra nell'intervallo di tempo  $\Delta \tau$  è la potenza termica  $P$  (in watt, 1W = 1J/s):

$$P = Q \Delta \tau = k A \Delta T L \quad (2)$$

Pertanto la potenza trasmessa dipende dalla forma del prisma, aumentando se le facce sono più grandi e la loro distanza diminuisce. Anche la differenza di temperatura tra le facce influenza la potenza termica; il rapporto  $\Delta T/L$  è detto gradiente termico. Tuttavia, la potenza dipende anche dal tipo di materiale in base alla

sua *conducibilità* (o conduttività)  $k$ , espressa in W/mK. La conoscenza di tale proprietà termica, e di come essa varia con la profondità, è uno degli obiettivi fondamentali dell'indagine geologica che precede la costruzione dell'impianto termogeologico. Per fissare le idee, la Tabella 1 riporta le proprietà termofisiche principali di terre e rocce. Compare anche la densità  $\rho$  (in kg/m<sup>3</sup>), che entra nella definizione della *diffusività termica*  $D$  (in m<sup>2</sup>/s):

$$D = k / \rho c p \quad (3)$$

Tale parametro descrive la rapidità con cui il flusso termico si propaga nella roccia ed entra in gioco quando la conduzione termica avviene in regime transitorio, ossia non stazionario. Il trasferimento di calore dal sottosuolo all'impianto sussiste per lunghi intervalli di tempi (per esempio la stagione termica invernale), nei quali una prima fase transitoria è seguita dal regime stazionario. La trattazione fisico-matematica della conduzione non stazionaria è alquanto complessa, per

cui spesso si adottano soluzioni analitiche semplificate. Nei casi più difficili si ricorre a potenti strumenti di calcolo numerico, come la procedura degli Elementi Finiti, avvalendosi delle moderne tecnologie informatiche (si veda Banks, 2008).

La Tabella 1 indica che il calore specifico e la conducibilità di sedimenti e rocce porose aumentano con il contenuto d'acqua. Nelle rocce secche i pori sono riempiti dall'aria, che accumula meno calore dell'acqua (per unità di massa) ed è inoltre un isolante termico. Si nota anche che la presenza di certi minerali come il quarzo aumenta la conducibilità della roccia. Tale proprietà può essere sfruttata nella realizzazione del pozzo di prelievo del calore. Infine, il ghiaccio conduce il calore molto meglio dell'acqua liquida. In alcune tipologie di impianto, il raffreddamento progressivo del terreno può portare alla formazione di ghiaccio intorno alle tubazioni di scambio termico. Tale effetto è favorevole per l'efficienza dell'impianto stesso, sebbene il congelamento del terreno possa dar luogo a problemi di tipo geotecnico, soprattutto se il fenomeno avviene

presso le fondazioni degli edifici, i parcheggi o le strade.

## Il cuore del problema: la pompa di calore

Una macchina termica è un dispositivo termodinamico che produce lavoro meccanico consumando calore. Come indicato nella Figura 1(a), la sorgente termica calda (a temperatura  $T_1$ ) cede il calore  $Q_1$  all'apparato che produce il lavoro  $L$ . Una frazione del calore ( $Q_2 < Q_1$ ) è ceduto alla sorgente fredda a temperatura  $T_2 < T_1$ . La conservazione dell'energia impone che il lavoro prodotto sia minore del calore in entrata:  $L = Q_1 - Q_2$ . Negli impianti geotermoelettrici il vapore cede la sua entalpia alla turbina, la cui rotazione produce corrente elettrica alternata mediante un generatore elettromagnetico. Il vapore che condensa uscendo dalla turbina rappresenta dunque la sorgente fredda della macchina (geo)termica. L'efficienza di un tale dispositivo è misurata dal rendimento:

$$\eta = Q_1 - Q_2 / Q_1 \quad (4)$$

### ▼ Tabella 1

Proprietà termiche delle terre, delle rocce, dell'aria e dell'acqua. I dati per i sedimenti e le rocce sono presi da Baietto et alii (2010).

Terre e rocce	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)
Argille e limi asciutti	1440	840	0,2 - 1,0
Argille e limi umidi	2100	1050	1,2 - 2,3
Marne umide senza quarzo	2080 - 2640	879	1,0 - 1,6
Marne umide con quarzo	2080 - 2640	879	1,7 - 3,1
Ghiaie e sabbie secche	1890	800	0,3 - 0,9
Ghiaie e sabbie umide	2010	840	1,3 - 1,8
Ghiaie e sabbie sature	2100	960	1,8 - 2,4
Calcari	1600 - 2700	920	2,4 - 3,4
Arenarie	1900 - 2500	1005	1,5 - 4,2
Dolomiti	2700 - 2850	879	3,2 - 5,0
Gneiss	2600 - 2850	920	2,1 - 4,2
Marmi	2670 - 2750	920	2,5 - 3,0
Graniti	2650	879	2,4 - 3,8
Granodioriti	2700	879	2,9 - 3,5
Dioriti	2800	920	2,8 - 3,6
Basalti	2950	796	1,3 - 2,9
Gabbri	2950	753	1,9 - 4,0
Aria a 25 °C	1,2	717 - 1003	0,025
Ghiaccio a 0 °C	900	2100	2,1
Acqua a 25 °C	1000	4177	0,6

da cui  $\eta < 1$  (o  $\eta < 100\%$ ). In realtà, la dissipazione dell'energia e l'irreversibilità dei processi fanno sì che il rendimento di una macchina termica reale sia sempre inferiore al rendimento della macchina termica ideale (o di Carnot) che lavora tra le stesse temperature della macchina reale:

$$\eta < \eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (5)$$

Ciò indica che l'efficienza della macchina aumenta con il divario di temperatura tra le sorgenti calda e fredda. Nel campo della produzione di energia elettrica, i sistemi più efficienti sono le turbine a gas naturale, in quanto la combustione genera gas ad altissima temperatura (sino ad oltre 1300 °C, con  $\eta > 50\%$ ). Ben diversa è la situazione delle centrali geotermoelettriche, caratterizzate da  $\eta < 10\%$ , essendo alimentate dal geofluido a soli 100-300 °C (DiPippo, 2015).

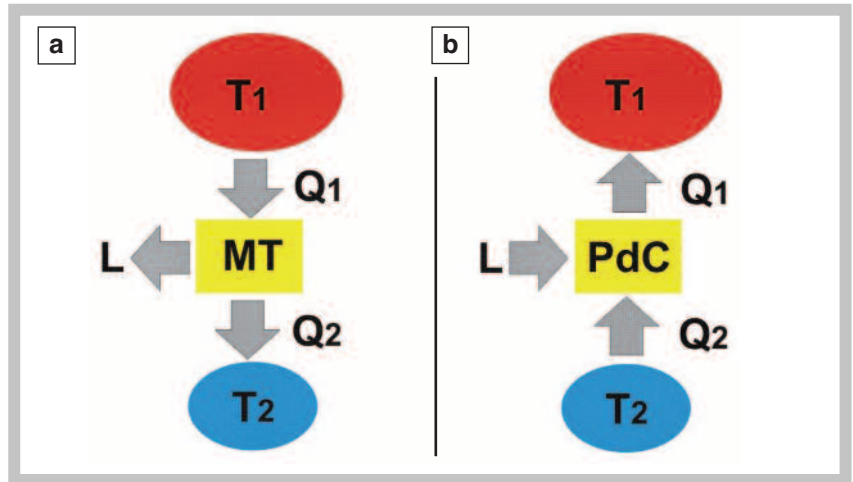
Il funzionamento della pompa di calore è opposto a quello della macchina termica (Figura 1b). In tal caso, si preleva il calore  $Q_2$  dalla sorgente fredda e lo si sposta alla sorgente calda, spendendo energia sotto forma di lavoro meccanico  $L$ . Pertanto la sorgente calda riceve la somma  $Q_1 = Q_2 + L$ . È chiara l'analogia con la pompa idraulica, la quale consumando energia elettrica sposta l'acqua verso alto, aumentandone l'energia potenziale. In ambito termogeologico, la sorgente fredda è il sottosuolo che cede calore, mentre la sorgente calda è l'edificio che viene riscaldato. Poiché lo scopo di una pompa di calore è trasferire calore a spese del lavoro, è conveniente valutarne l'efficienza con il cosiddetto coefficiente di prestazione o *COP*:

$$COP = \frac{Q_1}{L} = \frac{L + Q_2}{L} = 1 + \frac{Q_2}{L} \quad (6)$$

La definizione (6) implica che  $COP > 1$  (da non confondere con  $\eta < 1$ ). Inoltre il *COP* aumenta quanto più il calore  $Q_2$  prelevato dal sottosuolo prevale sul lavoro  $L$  speso dall'apparato. Il *COP* di una pompa di calore dipende sia dalle caratteristiche costruttive (i modelli più recenti sono di solito i più efficienti) che dalle caratteristiche di esercizio. In particolare, il *COP* diminuisce con l'aumento della temperatura richiesta dall'utenza

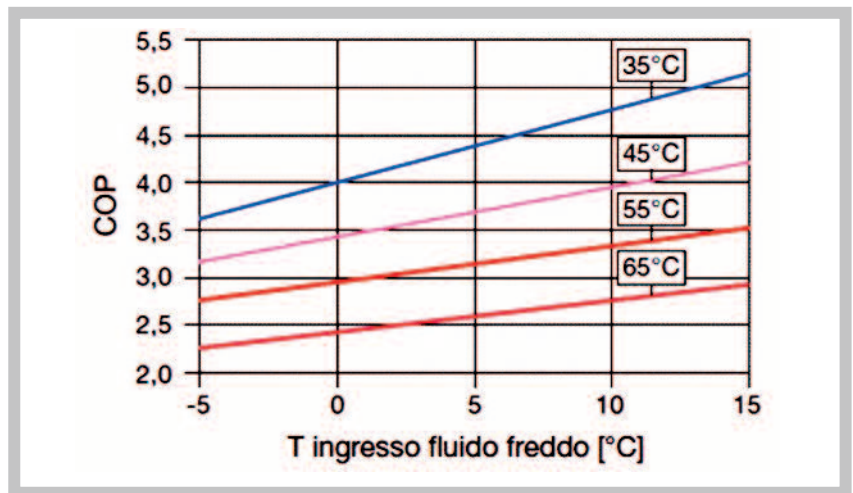
(l'acqua nell'impianto di riscaldamento o l'acqua calda sanitaria) e con la diminuzione della temperatura del sottosuolo da cui si preleva il calore. In altre parole è più facile trasportare calore dal sottosuolo che si trova a 10

°C verso l'interno di un edificio a 30 °C, piuttosto che passare da 5 °C a 50 °C. La Figura 2 illustra in modo chiaro la dipendenza del *COP* dalle suddette condizioni termiche. Occorre notare che il rendimento della pompa deve



▲ Figura 1

Schemi concettuali della macchina termica e della pompa di calore. Le ellissi rossa e blu indicano rispettivamente la sorgente calda e la sorgente fredda (temperatura assoluta  $T_1 > T_2$ ). (a) Nel caso della macchina termica,  $Q_1$  è il calore erogato dalla sorgente calda,  $Q_2$  è il calore ceduto alla sorgente fredda ed  $L = Q_1 - Q_2$  è il lavoro fornito dal ciclo termodinamico che avviene nella macchina. (b) Per la pompa di calore,  $Q_2$  è il calore prelevato dalla sorgente fredda,  $Q_1$  è il calore trasferito alla sorgente calda ed  $L = Q_1 - Q_2$  è il lavoro speso per operare il ciclo termodinamico che avviene nella pompa.



▲ Figura 2

Dipendenza del coefficiente di prestazione della pompa di calore (*COP*) dalla temperatura della sorgente fredda (riportata in ascissa) e dalla temperatura della sorgente calda (indicata sopra le curve colorate). Come discusso nel testo, una minore differenza tra le due temperature ( $\Delta T$ ) migliora la prestazione dell'impianto. Per esempio, l'efficienza sarebbe mediocre ( $COP \approx 2,5$ ) se le due temperature fossero rispettivamente 2,5 °C e 65 °C ( $\Delta T = 62,5^\circ C$ ). Invece, se le due sorgenti fossero a 13 °C e 35 °C ( $\Delta T = 22^\circ C$ ) il *COP* salirebbe a 5. Schema tratto da Doninelli e Doninelli (2007).

essere valutato nell'arco di un'intera stagione termica, spesso definita con intervalli di attività di 1800 o 2400 ore. Una pompa di calore efficiente dovrebbe presentare un *COP* medio superiore a 3. In tal caso, la formula (6) indica che il lavoro consumato dal sistema sarà meno del 33% del calore trasferito all'utenza. Ricordiamo inoltre il processo avviene senza combustione, in quanto è l'energia elettrica che provvede al lavoro meccanico richiesto.

Descriviamo com'è fatta una pompa di calore. Essa realizza un ciclo termodinamico attraverso cambiamenti di fase, di pressione e di temperatura di un opportuno fluido di lavoro (detto *refrigerante*) che percorre un circuito idraulico chiuso (detto intermedio). Possiamo distinguere quattro componenti primari: l'evaporatore, il compressore, il condensatore e la valvola di espansione (Figura 3). L'*evaporatore* è uno scambiatore di calore, grazie al quale il fluido freddo, che circola nel circuito idraulico esterno, cede la propria energia termica al refrigerante. Quest'ultimo prima aumenta la propria temperatura, poi subisce l'ebollizione, ovvero da liquido si trasforma in vapore. Tale processo, che avviene a temperatura e pressione costante, asporta energia con grande efficienza dal circuito esterno. È evidente che il refrigerante deve essere una sostanza (o una miscela di sostanze) alquanto volatile. I refrigeranti più comuni, ammessi dalle normative ambientali, sono denominati R717 (ammoniaca), R1270 (propilene), R744 (anidride carbonica) e R407C (difluorometano + pentafluoroetano).

Il vapore del refrigerante entra poi nel *compressore*, che ne innalza in modo drastico la temperatura e la pressione. Il funzionamento del compressore determina il consumo complessivo d'energia elettrica della pompa di calore. Nel secondo scambiatore di calore (detto *condensatore*) il vapore refrigerante, caldo e compresso, passa di nuovo allo stato liquido cedendo il calore latente al circuito idraulico interno, che alimenta l'impianto di riscaldamento dell'edificio oppure produce l'acqua calda sanitaria. Infine, il refrigerante liquido, ma ancora pressurizzato, attraversa la *valvola di espansione* subendo una drastica riduzione della temperatura e della pressione (Figura 3). Il ciclo

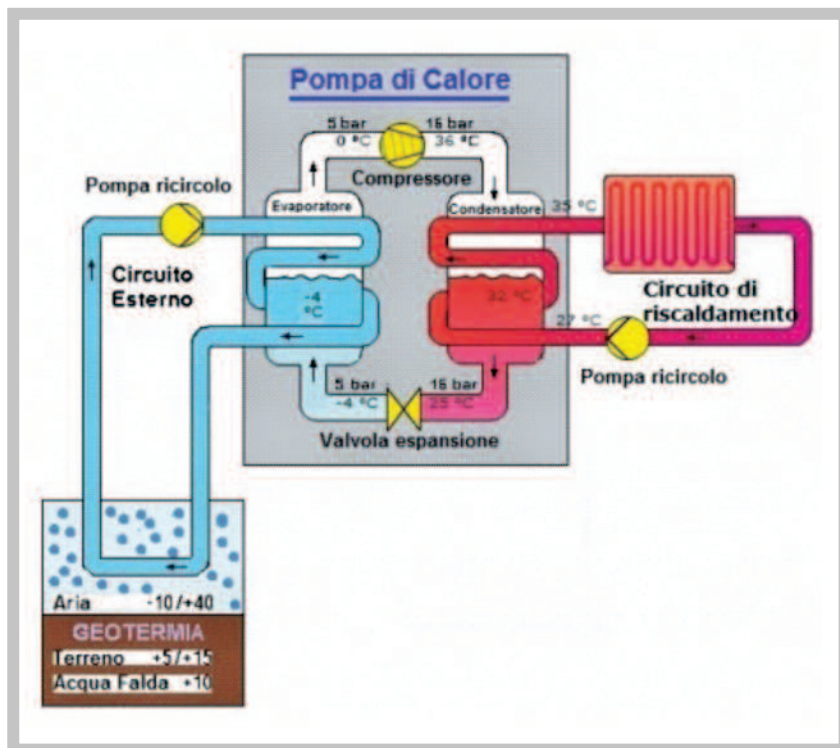
termodinamico è concluso e può ripetersi indefinitamente, a meno di (rari) guasti che provochino la fuoriuscita del refrigerante. Con opportuni accorgimenti tecnici il ciclo può essere invertibile, ovvero funzionare al contrario per spostare calore dall'edificio verso il sottosuolo (raffrescamento estivo, Doninelli e Doninelli, 2010).

Infine, occorre ricordare le pompe di calore ad assorbimento, che sfruttano la differente volatilità dei due componenti di una miscela riscaldata da una caldaia a gas. In tal caso il ciclo termodinamico non richiede il compressore e quindi consuma solo la poca energia elettrica richiesta dalle pompe idrauliche di circolazione. In

questi apparati il fluido intermedio è una miscela di acqua ed ammoniaca, oppure una soluzione acquosa di bromuro di litio. Ulteriori dettagli su tali impianti sono riportati da Frolidi (2013).

## Come estrarre il calore del sottosuolo

La sorgente fredda che alimenta la pompa di calore può corrispondere a differenti sorgenti termiche (Figura 3). Per esempio, il calore può essere prelevato dall'aria che circonda l'edificio. Tale soluzione, relativamente semplice dal punto di vista tecnico, soffre della notevole variabilità della temperatura atmosferica. Ciò riduce in



▲ Figura 3

Schema generale dell'impianto termico a pompa di calore. A sinistra è indicato il circuito idraulico esterno, che preleva il calore dalla sorgente fredda (aria, acqua sotterranea o terreno). Esso è percorso da un fluido termovettore, (una soluzione di acqua e sostanza antigelo), che presso l'evaporatore riscalda e vaporizza il fluido refrigerante che circola nel circuito intermedio. Tale vapore viene compresso e poi inviato al condensatore, ove il calore è trasferito al circuito interno, percorso dall'acqua dell'impianto di riscaldamento domestico. Il refrigerante, di nuovo allo stato liquido, passa dalla valvola di espansione per poi tornare all'evaporatore e ricominciare un nuovo ciclo. Lo schema riporta anche le condizioni di esercizio (pressione e temperatura) tipiche per ogni componente della pompa di calore. Come riferimento, la pressione atmosferica media è circa 1 bar. L'energia elettrica necessaria per il funzionamento dell'apparato è in gran parte consumata dal compressore, mentre solo una piccola quota è necessaria per le pompe di circolazione dei circuiti esterno ed interno.



modo significativo la prestazione dell'impianto, soprattutto a lungo termine. Pertanto sono preferibili i dispositivi che si affidano al calore contenuto nel sottosuolo, dotato di una notevole stabilità termica. È possibile realizzare vari tipi di impianto in relazione alle caratteristiche del sito ed all'esigenza dell'utenza (Banks, 2008; Tinti, 2008; Doninelli e Doninelli, 2010; Frolidi, 2013; Sarbu e Sebarchievici, 2014). Le tipologie più diffuse prevedono il prelievo di calore dall'acqua di falda oppure dalle rocce che circondano il pozzo termico (Figura 3). In questa nota ci occuperemo della termogeologia a sonde verticali. Tali dispositivi prevedono che la sorgente fredda corrisponda allo spessore di sottosuolo attraversato da un pozzo verticale. Il calore è trasferito dal terreno all'evaporatore mediante un fluido termovettore che percorre il circuito idraulico esterno (Figura 3). Pertanto, gli impianti di questo tipo escludono il prelievo e la re-iniezione di fluidi dal sottosuolo. Ciò riduce in modo drastico l'impatto ambientale dell'impianto termogeologico, sia in superficie che in profondità. L'unico intervento che potremmo definire invasivo riguarda la perforazione dei pozzi che ospiteranno le sonde termiche del circuito esterno. Negli impianti a sonde verticali il circuito esterno è costituito da una o più tubazioni che convogliano il fluido termovettore all'evaporatore della pompa di calore. Tale fluido non è altro che acqua con eventuale aggiunta di una sostanza antigelo, per fronteggiare le basse temperature del sottosuolo in climi freddi e/o con scarso flusso termico proveniente dal basso. Tale situazione è frequente nell'Europa settentrionale e soprattutto nelle aree con terreno perennemente gelato (*permafrost* del Canada e della Siberia). Le sostanze antigelo ammesse dalle normative sono alcoli (metanolo, etanolo, glicole etilenico e glicole propilenico) o sali (cloruro di sodio, cloruro di calcio e acetato di potassio). Per esempio, l'acqua congela a  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  se contiene il 18,8% in peso di cloruro di sodio oppure il 30,5% di glicol etilenico (Banks, 2008). Poiché il fluido termovettore percorre un circuito chiuso, la soluzione antigelo non entra mai in contatto con il sottosuolo, a meno di poco probabili fratture del pozzo termico.

La prima fase della costruzione dell'impianto è la perforazione del pozzo che ospiterà la sonda termica. Si è già detto che la Termogeologia è interessata al sottosuolo come sorgente termica, ma non ricerca una zona con temperatura elevata. Anzi, essa potrebbe ostacolare la re-immissione del calore dall'edificio al terreno durante la stagione estiva. Per questo motivo, la sonda termica non è mai calata in perforazioni profonde (>300 metri), in cui la temperatura risente in modo deciso del flusso termico proveniente dalla crosta terrestre. D'altra parte, la superficie terrestre ed il terreno immediatamente sottostante sono coinvolti nello scambio termico con l'atmosfera. La temperatura al suolo subisce una significativa variazione ciclica, legata al riscaldamento diurno seguito dal raffreddamento notturno. Tale variazione diminuisce rapidamente con la profondità, a causa della modesta diffusività termica del terreno. All'escursione termica giornaliera si sovrappone però l'oscillazione legata al ciclo stagionale. Nella regione italiana, il ciclo stagionale comporta tra Gennaio e Luglio una variazione della temperatura superficiale anche maggiore di  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tale oscillazione si propaga verso il basso con ampiezza decrescente, sino ad annullarsi a circa 20 metri di profondità dove la temperatura è dell'ordine di  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Frolidi, 2013). Tale profondità è il cosiddetto *livello neutro*, sotto il quale la temperatura del sottosuolo è costante nel tempo, mentre aumenta con la profondità secondo il gradiente termico crostale (in media circa  $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ). In definitiva, è necessario che la sonda termica estragga il calore da quella porzione di sottosuolo che si comporta come una sorgente termica, ovvero tende a cambiare di poco la propria temperatura. Per quanto detto sopra, la perforazione dovrà raggiungere una profondità maggiore di 20 metri (per evitare l'oscillazione termica climatica) ed inferiore a 300 metri (per evitare di intercettare formazioni troppo calde). Se entro tale intervallo di profondità le proprietà termiche del sottosuolo risultassero mediocri, si provvederà a realizzare altre perforazioni per installare più sonde termiche affiancate (il cosiddetto *campo sonde*). La perforazione termogeologica si avvale delle tecniche usate in altri

ambiti, come lo scavo dei pozzi per acqua (Gorla, 2010). Dato che la profondità massima non supera i 200-300 metri, sono disponibili vari apparati semoventi basati sulla ben consolidata tecnica della tavola rotante con asta percorsa dal fango di perforazione. Una promettente innovazione è la cosiddetta *perforazione sonica*, in cui l'asta rotante viene sollecitata in senso longitudinale, in modo da generare un treno di onde stazionarie. Tali oscillazioni, di frequenza compresa tra 50 e 160 hertz (onde sonore molto basse), determinano la ciclica dilatazione e contrazione dell'asta, che trasmette il moto al terreno circostante causandone il rapido cedimento. La perforazione sonica permette di aumentare in modo significativo la velocità di avanzamento, soprattutto entro formazioni sedimentarie tenere. Nel foro appena completato viene calata la sonda termica che verrà poi riempita con il fluido termovettore. Si tratta di una doppia tubazione in materiale plastico (polietilene ad alta densità), collegata a fondo pozzo da una giunzione ad U opportunamente zavorrata per mantenere la verticalità del circuito all'interno del pozzo (Figura 4). I tubi in commercio hanno un diametro esterno di 25, 32 o 40 mm ed un'elevata resistenza alla pressione (16-25 bar). Per cautela e per aumentare la superficie di scambio termico, nel pozzo si calano spesso due tubazioni ad U (Figura 4). La rottura o l'ostruzione di entrambe le tubazioni è in effetti un evento assai improbabile. In definitiva, il pozzo perforato dovrà avere un diametro di 100-200 mm per poter ospitare le tubazioni opportunamente distanziate. La fase successiva è la cementazione dello spazio compreso tra le tubazioni e le pareti nude della perforazione. Ciò consente di rendere stabile la sonda e di isolarla dal terreno circostante, eccetto che per lo scambio del calore. Allo scopo si usa una malta composta da acqua, cemento Portland, bentonite sodica e sabbia silicea, con eventuali additivi come le ceneri di fornace ed il naftalene solfonato (Banks, 2008). La composizione ottimale è tuttora oggetto di studio e sperimentazione, in quanto la malta dovrebbe presentare buona resistenza meccanica, durezza alle basse temperature, ottima aderenza alle tubazioni, bassa permeabilità idraulica e – in

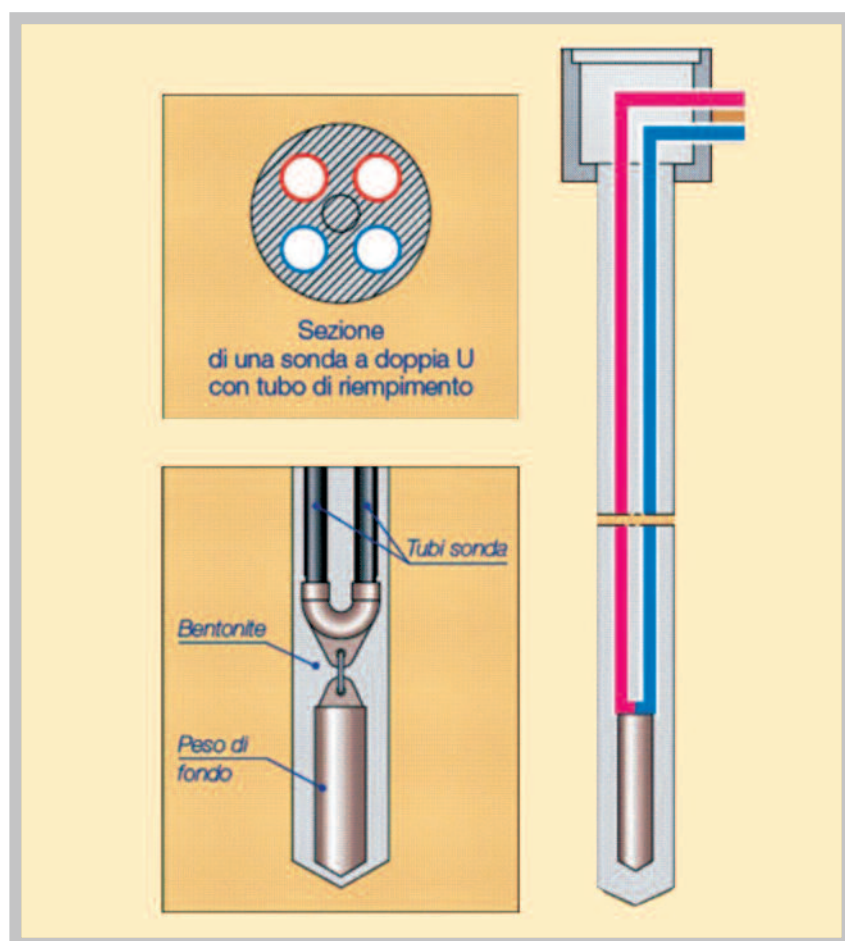
particolare – notevole conducibilità termica. La sabbia silicea facilita in modo cospicuo la conduzione del calore in ragione dell'elevata conducibilità del quarzo (Tabella 1). Dopo l'allaccio delle tubazioni alla pompa di calore, è necessario effettuare accurate prove di tenuta idraulica del circuito esterno. Inoltre, alla bocca del pozzo del pozzo termico è necessario effettuare frequenti misurazioni dei parametri del fluido termovettore. Occorre conoscere sia la portata ( $m$  in  $kg/s$ ) che la temperatura del fluido nei rami ascendente e discendente (rispettivamente  $T_{in}$  e  $T_{out}$ ). Da esse si ricava la temperatura media del termovettore,  $T_m = (T_{in} + T_{out})/2$  e la sua variazione di

temperatura  $\Delta T = |T_{in} - T_{out}|$ . Conoscendo  $m$  e  $\Delta T$ , la formula (1) fornisce la stima della potenza termica trasferita dal circuito esterno all'evaporatore della pompa di calore, ovvero il termine  $Q_2$  della definizione del  $COP$  (formula 6). Una volta allacciato alla pompa di calore anche il circuito interno (Figura 3), l'impianto è pronto per l'esercizio. I dettagli sui componenti elettrici, idraulici e meccanici del dispositivo termogeologico a sonde verticali sono reperibili nella letteratura tecnica (Doninelli e Doninelli, 2007, 2010; Tinti, 2008; Baietto *et alii*, 2010; Tornaghi, 2010; Delmastro e Noce, 2011; Frolidi, 2013).

## Il ruolo del geologo

Il Geologo professionista ha un ruolo fondamentale nella progettazione e nella costruzione dell'impianto termogeologico. La prima cosa da considerare è il sito che ospiterà l'apparato. Lo scopo essendo la climatizzazione di un edificio (villa, condominio, esercizio commerciale, ufficio pubblico o altro), la tipologia dell'impianto dovrà tener conto dell'ubicazione del manufatto e delle richieste dell'utenza. Le sonde verticali occupano in superficie uno spazio limitato, per cui sono adatte per gli ambienti urbani dove i vincoli territoriali pubblici e privati possono essere molto stringenti. Un modesto parcheggio o giardino condominiale spesso è sufficiente per l'installazione del campo sonde.

Nella geotermia classica si ricerca l'anomalia termica ed il serbatoio di geofluido, avvalendosi delle più avanzate tecniche di indagine geofisica, geochemica ed idrogeologica. In relazione alla struttura del campo geotermico, i pozzi d'estrazione del geofluido, le tubazioni che lo convogliano e le centrali elettriche che lo sfruttano possono essere distribuite in modo ottimale sul territorio (DiPippo, 2015). Nella Termogeologia avviene l'opposto: l'impianto deve essere realizzato per forza in prossimità dell'edificio da climatizzare. Pertanto, la fase preliminare prevede la raccolta e l'analisi accurata di tutte le informazioni disponibili sulle caratteristiche del sottosuolo soggiacente al manufatto. Anzitutto ci si avvale della cartografia esistente, sia per quanto riguarda le carte geologiche che le carte tematiche (geomorfologiche, idrogeologiche, sondaggi sismici e geolettrici). Tali informazioni sono reperibili nelle biblioteche universitarie, presso gli uffici pubblici che controllano il territorio e presso gli studi geologici professionali. Ovviamente hanno la massima importanza i dati relativi alle perforazioni effettuate in precedenza presso il sito considerato (pozzi per acqua, sondaggi geotecnici ed altro). Le informazioni raccolte dovrebbero permettere di stabilire una stratigrafia approssimativa del sito sino ad almeno 200-300 metri di profondità. Si tratta di definire la successione delle litologie principali, di valutarne lo spessore ed indicare la presenza o



▲ Figura 4

Doppia tubazione ad U cementata nel pozzo termico. Le dimensioni e le caratteristiche tecniche delle tubazioni sono descritte nel testo. Nei rami indicati in rosso il fluido termovettore sale verso l'evaporatore della pompa di calore. Nei rami blu il termovettore ritorna a fondo pozzo dopo aver ceduto il proprio calore al refrigerante della pompa di calore, come mostrato in Figura 3. Pertanto durante l'esercizio il fluido discendente è più freddo di quello ascendente. Il contrario avviene durante la prova di risposta termica descritta nel testo.



meno di una o più falde idriche sovrapposte. Sebbene la sonda verticale sia isolata dal terreno circostante, l'eventuale flusso dell'acqua sotterranea cede calore per convezione, aumentando in modo significativo lo scambio termico tra il terreno ed il pozzo termico. Pertanto intercettare una falda idrica rappresenta un indubbio vantaggio al fine dell'efficienza dell'impianto. La possibilità di estrarre calore dal sottosuolo è assai influenzata dalla conducibilità delle litologie intercettate dal pozzo termico. Il dimensionamento delle sonde richiede la stima della cosiddetta resa termica, ovvero della potenza termica media che può essere estratta dall'unità di lunghezza del pozzo ( $p$  in W/m). Tale valutazione deve tener conto del fatto che la sonda termica spesso attraversa una stratigrafia composita, con formazioni dotate di conducibilità e spessore differente. Ciò mette in evidenza l'importanza di un'accurata analisi delle informazioni stratigrafiche e petrofisiche disponibili, che solo il Geologo professionista può portare avanti con sicurezza. Una valutazione speditiva della resa termica – seppur del tutto

preliminare – è basata su dati di riferimento, come quelli riportati nella Tabella 2. L'apprezzabile riduzione della resa con l'allungamento del tempo di esercizio dell'impianto è dovuta al fatto che la trasmissione del calore verso la sonda termica non è un processo stazionario. Infatti, la differenza di temperatura tra il terreno ed il fluido termovettore progressivamente diminuisce: il terreno circostante il pozzo termico si raffredda, mentre il fluido nelle tubazioni si riscalda. In base alla formula (2), la progressiva riduzione del salto termico  $\Delta T$  tra terreno e sonda causa il calo della potenza trasmessa al fluido termovettore. Consideriamo per esempio una sonda verticale che attraversi una litologia uniforme con resa termica stimata di 60 W/m. Se l'edificio da climatizzare richiede una potenza termica di 9 kW per il riscaldamento, il raffrescamento e l'acqua calda sanitaria, la lunghezza totale della sonda termica dovrà essere almeno  $9000/60=150$  metri. Ovviamente la stessa potenza può essere fornita da due pozzi termici di 75 metri, oppure da tre pozzi di 50 metri ciascuno. La valutazione dell'opzione più conveniente deve considerare molti fattori, come il costo

delle perforazioni, la disponibilità di spazio per posizionare più pozzi termici opportunamente distanziati, la possibilità di intercettare una falda idrica ed altro ancora. Anche in questo caso il giudizio esperto del Geologo è necessario per evitare errori difficilmente rimediabili nelle successive fasi di costruzione dell'impianto.

La stima preliminare della resa termica deve essere verificata mediante opportune prove effettuate nella perforazione. A tal fine è prioritario determinare la conducibilità termica delle formazioni attraversate. Ciò può avvenire in laboratorio, attraverso varie tecniche di misura della conducibilità di campioni estratti durante la perforazione. La descrizione di tali esami è riportata nelle pubblicazioni specifiche, tra le quali ricordiamo Luo *et alii* (2016). Ancora più importanti sono le prove *in situ*, che permettono di valutare la conducibilità delle formazioni nel loro stato indisturbato, in modo da salvaguardare proprietà come la porosità e la saturazione, che possono subire alterazioni significative durante l'estrazione del campione. L'esperienza che permette di valutare le caratteristiche termofisiche complessive della sonda verticale è la cosiddetta *prova di risposta termica* (Banks, 2008; Tinti, 2008; Luo *et alii*, 2016). Essa determina la temperatura iniziale, la conducibilità termica e la diffusività del terreno e la resistenza termica del pozzo.

La prova consiste nel far circolare dell'acqua calda nella tubazione ad U già calata in pozzo e cementata, registrando come varia nel tempo la temperatura del fluido in entrata ed in uscita dalla sonda verticale. L'apparato per la prova (Figura 5) è costituito da un serbatoio di volume sufficiente da riempire la tubazione ad U. Il serbatoio contiene uno scambiatore a resistenza elettrica che eroga una potenza costante all'acqua in circolo. La pompa garantisce una portata di 0,5-1 l/s nella tubazione ad U. Tra gli strumenti ricordiamo il manometro per la pressione, il flussometro per la portata ed i due termometri a termocoppia per misurare la temperatura dell'acqua in entrata ed in uscita dalla sonda (con accuratezza di  $\pm 0,2$  °C). Un sistema automatico di lettura e registrazione

#### ▼ Tabella 2

**Resa termica presunta di differenti litologie (k indica la conducibilità termica). I dati riportati derivano dalle informazioni raccolte a scala globale durante la costruzione e l'esercizio di impianti termogeologici a sonde verticali. Pertanto essi debbono essere considerati come una prima indicazione sulla potenzialità termica del sottosuolo, da verificare mediante l'esecuzione delle prove in laboratorio ed in situ ricordate nel testo. La resa cala con l'allungamento della stagione termica, a causa dai processi non stazionari di trasmissione del calore dal terreno al fluido termovettore.**

Litologia	Resa termica con esercizio di 1800 ore per anno (W/m)	Resa termica con esercizio di 2400 ore per anno (W/m)
Sedimenti secchi con $k < 1,5$ W/mK	25	20
Sedimenti saturi con $1,5 < k < 3,0$ W/mK	60	50
Rocce con $k > 3,0$ W/mK	84	70
Ghiaie e sabbie secche	< 25	< 20
Ghiaie e sabbie sature	65-80	55-65
Ghiaie e sabbie con flusso idrico	80-100	80-100
Argille e limi umidi	35-50	30-40
Calcari	55-70	45-60
Arenarie	65-80	55-65
Graniti	65-85	55-70
Basalti	40-65	35-55
Gneiss	70-85	60-70

dei dati completa la strumentazione. Prima di eseguire la prova è necessario attendere la presa della malta cementizia, che termina dopo 2-3 settimane dopo la posa. L'esecuzione della prova segue il protocollo codificato dall'Associazione degli ingegneri termotecnici statunitensi (ASHRAE). La prima fase consiste nella determinazione della temperatura iniziale del terreno. L'acqua a temperatura ambiente viene pompata nella sonda, mentre ad intervalli regolari si registra la temperatura del fluido in ingresso ed in uscita dalla tubazione ad U. Poiché l'acqua che circola tende all'equilibrio termico con il terreno, le due temperature si avvicinano progressivamente sino a coincidere o quasi. A quel punto, la temperatura media dell'acqua rimane costante nel tempo e corrisponde anche alla temperatura iniziale del terreno (Figura 6a).

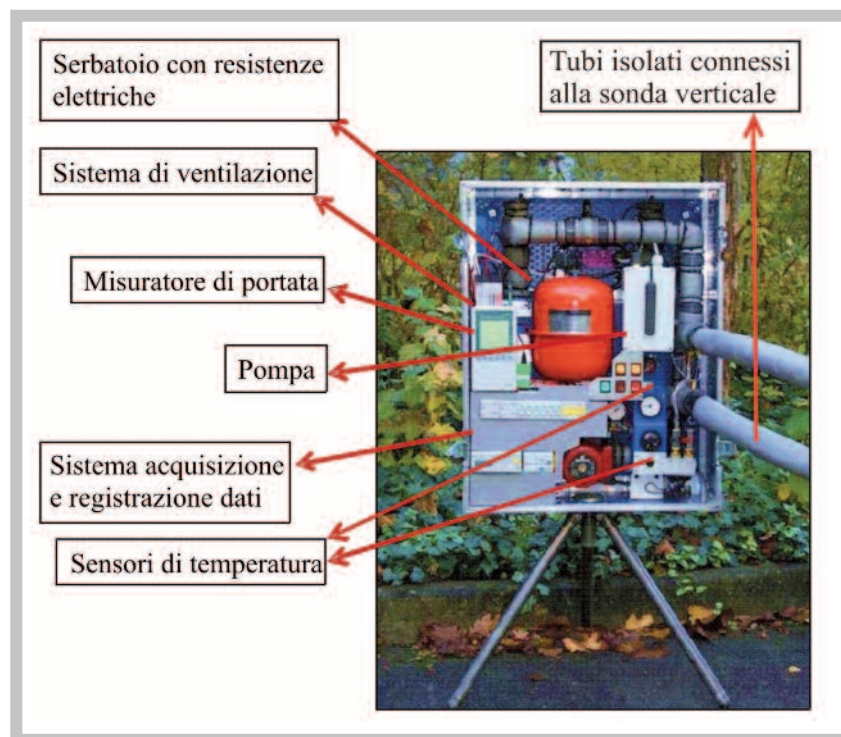
La seconda fase della prova avviene pompando nella sonda l'acqua riscaldata dallo scambiatore elettrico. L'acqua calda che scende nella tubazione trasferisce calore al terreno e torna in superficie più fredda. Ad intervalli regolari si registra la temperatura dell'acqua in ingresso ed in uscita dalla sonda, assieme alla portata del fluido ed alla potenza elettrica erogata (che deve rimanere costante). Da notare che tale fase è piuttosto lunga, richiedendo da 72 a più di 130 ore. Infatti, le prime 15 ore di misura vengono escluse dalla successiva analisi dei risultati, in quanto corrispondono allo scambio termico in regime transitorio tra la sonda ed il terreno circostante. Il risultato principale della prova è la curva  $T_m(\tau)$ , ossia il grafico dell'andamento nel tempo della temperatura media dell'acqua che circola nella tubazione ad U (Figura 6b). L'interpretazione della curva sperimentale è basata sull'impiego di modelli analitici della conduzione termica. In particolare, ricordiamo il modello della sorgente termica lineare e quello della sorgente termica cilindrica. Data la complessità delle rispettive formulazioni, rimandiamo alla letteratura tecnica per la descrizione di tali approcci (Banks, 2008; Tinti, 2008; Luo *et alii*, 2016). Ricordiamo invece che i modelli suddetti permettono di calcolare la conducibilità termica media del terreno attraversato dalla sonda in

base alla sua temperatura iniziale (determinata nella prima fase della prova) ed all'andamento temporale della temperatura media dell'acqua circolante (determinato nella seconda fase). Entrano in gioco anche parametri noti come la potenza trasferita all'acqua dallo scambiatore elettrico ed il raggio del pozzo termico. Per illustrare come la stima della conducibilità permetta di valutare la resa termica, consideriamo l'approccio di Ramey (Grant e Bixley, 2011), secondo il quale la resa termica  $p$  è data da:

$$p = 2\pi k \Delta T \ln 2D / \Delta \tau r - 0,29 \quad (7)$$

ove  $k$  è la conducibilità termica media del terreno che circonda il pozzo,  $\Delta T$  è la differenza tra la temperatura iniziale del terreno e la temperatura media del fluido termovettore,  $D$  è la diffusività termica del terreno, definita dalla formula (3),  $r$  è il raggio del pozzo termico e  $\Delta \tau$  è l'intervallo di tempo per il quale si valuta la resa (deve essere maggiore di una settimana). Applichiamo tale formulazione ad una

sonda verticale che attraversi una litologia arenacea con densità e calore specifico rispettivamente pari a  $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$  e  $c_{sp} = 1000 \text{ J/kg K}$ . Sia  $k = 2,9 \text{ W/m K}$  la conducibilità media determinata con la prova di risposta termica. Dalla formula (4) si ottiene la diffusività  $D = 1,32 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Siano inoltre  $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  ed  $r = 0,1 \text{ m}$ . Per  $\Delta \tau = 1800$  ore d'esercizio, la formula (7) prevede  $p \approx 48 \text{ W/m}$ ; per  $\Delta \tau = 2400$  ore la resa termica è invece  $p \approx 46 \text{ W/m}$ . Come discusso in precedenza, la piccola differenza è imputabile alla diffusione della temperatura, con la conseguente progressiva riduzione del salto termico iniziale  $\Delta T$ . La prova di risposta termica sopra descritta permette di stimare le proprietà termiche medie del pozzo verticale. Tuttavia, la moderna tecnologia consente di valutare come tali proprietà variano con la profondità. Per esempio, l'analisi della diffusione Raman che avviene all'interno di una fibra ottica calata nel pozzo termico permette di ricostruire l'andamento verticale della conducibilità termica, mettendo in luce il ruolo della stratigrafia e, in



▲ Figura 5

Moderno apparato per l'esecuzione della prova di risposta termica di una sonda verticale. I tubi visibili sulla destra (accuratamente coibentati per evitare lo scambio termico con l'aria) sono connessi ai rami discendente ed ascendente della tubazione ad U cementata nel pozzo termico.

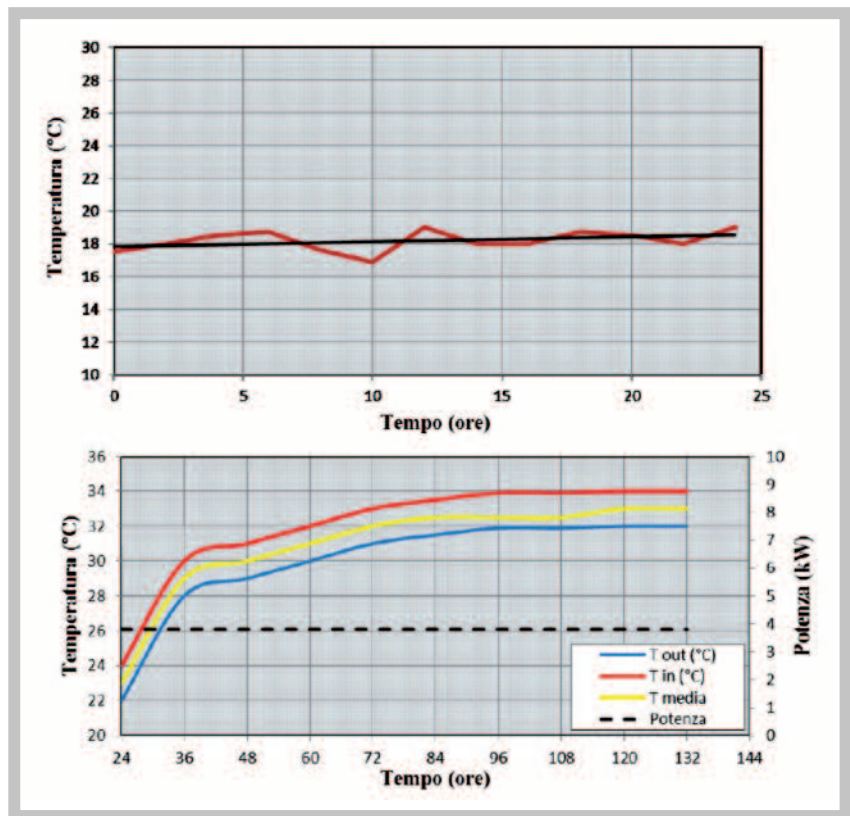
particolare, i livelli dotati di maggiore resa termica (Luo *et alii*, 2016). Sebbene tali sistemi siano ancora poco diffusi a causa del costo elevato, è prevedibile che nel prossimo futuro essi consentiranno al Geologo professionista di ottenere informazioni molto accurate per il dimensionamento dell'impianto geotermico.

## L'impatto sull'ambiente e La normativa

La termogeologia a ciclo chiuso (che include gli impianti a sonde verticali) evita i problemi legati all'estrazione ed alla re-iniezione del geofluido o dell'acqua di falda. Inoltre, non v'è alcuna emissione di gas o polveri nell'atmosfera. Infine, tali sistemi non hanno un significativo impatto visivo, in quanto le tubazioni sono interrate. Un esempio concreto di impianto termogeologico moderno ed efficiente, realizzato in ambiente urbano, è illustrato dalla Figura 6. Durante la fase di perforazione, sussiste un modesto rischio di contaminazione dell'acqua sotterranea per l'uso del fango e per la possibile connessione idraulica tra acquiferi sovrapposti. La rottura accidentale delle sonde geotermiche è invece un evento raro, causato da operazioni di cantiere successive alla costruzione dell'impianto, da cedimenti indotti dalla compattazione differenziale del terreno, oppure da eventi sismici. In ogni caso, tale incidente ha un impatto limitato dato il modesto volume e la natura del fluido termovettore, costituito da una miscela di acqua e sostanza antigelo; spesso si usa il glicol propilenico che non è tossico. Più in generale, è opportuno adottare tubazioni prive di saldature e dimensionare l'impianto affinché le condizioni di pressione e temperatura del fluido termovettore circolante siano ben tollerate dal materiale plastico delle tubazioni. Il Geologo professionista gioca un ruolo cruciale anche nella gestione dei lavori e nella prevenzione degli incidenti. Occorre sempre valutare con attenzione il contesto geologico in cui si intende costruire l'impianto termogeologico. La perforazione dei pozzi termici deve essere condotta a regola d'arte seguendo procedure codificate e materiale certificato. Lo stesso vale per la successiva fase di

cementazione delle sonde. Se l'impianto è ubicato presso pozzi d'acqua è necessario che le perforazioni rispettino una distanza di sicurezza, onde evitare la contaminazione della falda per eventuale fuoriuscita dei fanghi o del fluido termovettore. Durante l'esercizio è importante pareggiare il bilancio termico annuale, in modo tale che il calore prelevato dal sottosuolo durante la stagione invernale venga in buona parte restituito durante la stagione estiva. Ciò affinché il volume di sottosuolo che scambia calore con le sonde geotermiche non subisca un lento ma

inesorabile raffreddamento, che potrebbe depauperare la sorgente termica peggiorando le prestazioni dell'impianto e - nei casi più estremi - compromettere la copertura vegetale. Peraltro non desta preoccupazione la leggera diminuzione di temperatura del sottosuolo (<5 °C) che si verifica nella prima fase della stagione termica invernale. In definitiva, è lecito affermare che i moderni impianti termogeologici a ciclo chiuso sono convenienti dal punto vista economico e del tutto ecosostenibili, purché progettati in modo adeguato seguendo prescrizioni tecniche ormai consolidate.



▲ Figura 6

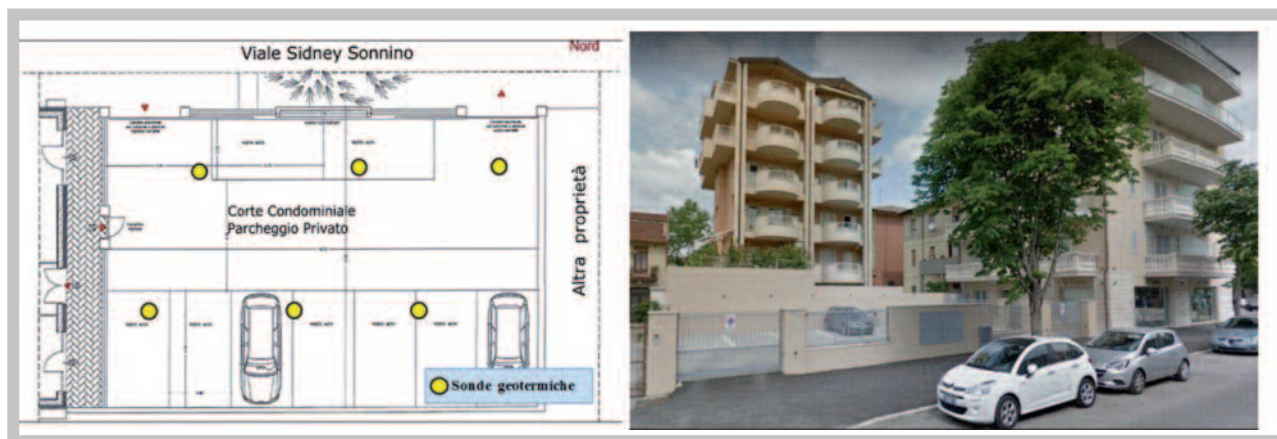
Esempio di risultati della prova di risposta termica. (a) Andamento nel tempo della temperatura media dell'acqua che circola nella sonda nella prima fase della prova. Il grafico rosso descrive i valori sperimentali, mentre in nero è indicata la retta che interpola le misure. Il leggero incremento della temperatura media (circa 18 °C) è causato dal calore trasferito all'acqua dalla pompa di circolazione. La temperatura media indicata corrisponde anche alla temperatura iniziale del terreno attraversato dalla sonda. (b) Andamento nel tempo della temperatura dell'acqua che circola nella sonda nella seconda fase della prova. Le curve rossa e blu indicano la temperatura dell'acqua che entra ed esce dalla sonda (rispettivamente  $T_{in}$  e  $T_{out}$ ). La curva gialla indica la temperatura media dell'acqua,  $T_m = (T_{in} + T_{out})/2$ . La linea tratteggiata orizzontale indica la potenza termica costante trasferita dallo scambiatore elettrico all'acqua (in questo 4 kW). La prova termina quando la trasmissione del calore verso il terreno diventa stazionaria, per cui la temperatura media tende a rimanere costante nel tempo.

La normativa generale in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche è contenuta nel Decreto Legislativo 22/2010, che distingue tra usi di interesse nazionale, di interesse locale e piccole utilizzazioni. Gli impianti termogeologici rientrano in quest'ultima categoria, per cui la loro autorizzazione è delegata alle Regioni competenti (Spalvieri e Vinci, 2012). Possiamo affermare che la normativa vigente in Toscana è tra le più avanzate (Franci e Pancani, 2011). Con la Legge Regionale 39/2005, la Regione Toscana ha disciplinato in modo specifico gli impianti termogeologici. Ancora più importante è la successiva Legge Regionale 71/2009 per la quale: *L'installazione di impianti di produzione di calore da risorsa geotermica, senza prelievo di fluido geotermico, destinati al riscaldamento e alla climatizzazione di edifici è soggetta al regime autorizzativo della dichiarazione di inizio di attività.* Ciò costituisce una fondamentale semplificazione

amministrativa per la realizzazione degli impianti termogeologici a ciclo chiuso. Per gli impianti a ciclo aperto (che usano acqua di falda come fluido termovettore) è invece indispensabile una apposita concessione di derivazione di acque sotterranee, erogata dalla Provincia competente dal punto di vista territoriale. La realizzazione di un impianto termogeologico deve seguire le specifiche normative tecniche. La Norma UNI 11466 definisce i criteri di progettazione e le procedure di calcolo per la determinazione delle prestazioni di progetto degli impianti termogeologici. La Norma UNI 11467 disciplina le tecniche di perforazione dei pozzi termici, le proprietà del fluido termovettore e le caratteristiche delle malte cementizie. Infine, La Norma UNI 11468 stabilisce la procedura di valutazione del livello di compatibilità ambientale degli impianti a servizio di apparati edifici civili, commerciali e industriali.

## Conclusioni

La climatizzazione degli edifici determina una parte importante del consumo globale di energia. La Termogeologia offre la possibilità di usare il sottosuolo come un serbatoio energetico, riducendo al minimo l'interazione con le acque sotterranee e l'atmosfera. Usare il calore terrestre significa diminuire l'uso dei combustibili fossili, attenuando al contempo i relativi problemi ambientali. Inoltre, la potenza elettrica richiesta dall'impianto termogeologico può essere ottenuta da altre fonti rinnovabili, come i pannelli solari e le turbine eoliche, in modo da raggiungere l'indipendenza energetica dell'edificio. L'impiego delle pompe di calore per il condizionamento degli edifici è cominciato verso la fine del secolo scorso, come effetto delle ricorrenti crisi petrolifere. Tuttavia, il costo elevato e la modesta efficienza dei



▲ Figura 7

Condominio ubicato nel centro storico di Grosseto. L'edificio di 5 piani (fotografia a destra) ospita 9 appartamenti per una superficie totale di 800 m<sup>2</sup>. Ciascun appartamento richiede una potenza termica massima di 3,6 kW, per cui il fabbisogno termico totale è di 32,4 kW. Esso è soddisfatto dall'impianto geotermico a sonde verticali, che preleva dal sottosuolo una potenza termica di 25,2 kW. La differenza (7,7 kW) è fornita dai 2 compressori della pompa di calore. Pertanto il COP della pompa di calore vale  $32,4/7,7=4,2$ . Inoltre, l'energia elettrica fornita ai compressori proviene interamente dai pannelli solari fotovoltaici posti sul tetto dell'edificio. Il campo sonde è collocato sotto l'adiacente parcheggio condominiale (pianta a sinistra). Si tratta di 6 sonde verticali a doppia U in polietilene ad alta densità, con diametro esterno di 32 mm. Le sonde sono opportunamente distanziate sia dall'immobile che tra di loro, per evitare interferenze reciproche durante lo scambio di calore con il sottosuolo. Ciascuna sonda, profonda 125 metri, estrae dal terreno una potenza termica di 4,2 kW. La resa termica media è quindi di 33,6 W/m. Dall'alto verso il basso, le sonde intercettano le seguenti litologie: argilla (spessore 20 m), ghiaia umida (10 m), limo (4 m), ghiaia secca (24 m), limo (8 m) ed ancora argilla (59 m). Il fluido termovettore è convogliato ad un collettore posto nell'apposito locale a piano terra, che ospita anche la pompa di calore ed il serbatoio dell'acqua calda sanitaria. Ogni appartamento è dotato di pavimento radiante, deumidificatore con igrostatato regolabile e termostati per la regolazione della temperatura sia nel ciclo di riscaldamento invernale che nel ciclo di raffrescamento estivo (dettagli gentilmente forniti dallo Studio Ecogeo di Grosseto).

sistemi allora disponibili ne ha impedito una diffusione globale. Il nuovo secolo ha visto un rinnovato interesse per la Termogeologia, indotto dalla consapevolezza che l'uso indiscriminato dei combustibili fossili determina il loro progressivo esaurimento e può contribuire a preoccupanti mutamenti ambientali, come il riscaldamento globale. A tal fine l'Unione Europea incentiva la sostituzione delle fonti fossili con energie rinnovabili e di basso impatto

ambientale, come la geotermia. La costruzione di impianti termogeologici, prevalentemente a ciclo chiuso, è in aumento nel continente europeo. Per quanto riguarda il numero di pompe di calore installate primeggia la Svezia con oltre 500000 unità, seguita da Germania, Francia, Austria, Finlandia e Svizzera. A distanza seguono Danimarca, Norvegia, Olanda, Polonia, Belgio, Regno Unito, Repubblica Ceca, Irlanda, Italia, Estonia, Slovenia,

Lituania, Ungheria, Bulgaria, Slovacchia, Grecia e Spagna (dati relativi al 2015). Pertanto, nel nostro Paese il settore della termogeologia ha un margine di sviluppo molto ampio. D'altra parte, questa pur breve esposizione ha messo in evidenza la fondamentale importanza delle competenze del Geologo professionista, sia per la corretta progettazione dell'impianto che per la previsione dei suoi effetti sull'ambiente.

## Bibliografia

- Baietto A., Pochettino M, Salvatici E. (2010) - *Progettazione di impianti geotermici. Sonde verticali e pozzi d'acqua*. Dario Flaccovio Editore s.r.l., Palermo, ISBN 978-88-579-0058-2.
- Banks D. (2008) - *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling*. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK, ISBN-13: 978-1-4051-7061-1.
- Casasso A., Sethi R. (2013) - *Tecnologia e potenzialità dei sistemi geotermici a bassa entalpia*. Geoingegneria Ambientale e Mineraria, 1: 13-22.
- Delmastro R., Noce G. (2011) - *Manuale di geotermia a sonde verticali*. Hoepli Editore, Milano, ISBN 9788820345396.
- DiPippo R. (2015) - *Geothermal power plants: Evolution and performance assessments*. Geothermics, 53: 291-307, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.005>.
- Doninelli M., Doninelli M. (2007) - *Le pompe di calore*. Idraulica Caleffi, 33: 1-43 ([www.caleffi.it](http://www.caleffi.it)).
- Doninelli M., Doninelli M. (2010) - *Impianti a pompe di calore geotermiche*. Idraulica Caleffi, 38: 1-44 ([www.caleffi.it](http://www.caleffi.it)).
- Franci T., Pancani M. (2011) - *Pompe di calore geotermiche in Toscana. La situazione attuale e le prospettive per il 2020*. Unione Geotermica Italiana, Quaderno n. 1 ([www.unionegeotermica.it](http://www.unionegeotermica.it)).
- Froldi P. (2013) - *Impianti geotermici. Progettazione, realizzazione e controllo*. Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, Rimini, ISBN: 978-88-387 7709-8.
- Gorla M. (2010) - *Pozzi per acqua*. Dario Flaccovio Editore, Palermo, ISBN 978-88-579-0044-5.
- Grant M.A., Bixley P.F. (2011) - *Geothermal Reservoir Engineering, Second Edition*. Academic Press-Elsevier Inc., Burlington, San Diego, USA, Oxford, UK, ISBN 978-0-12-383880-3.
- Luo J., Rohn J., Xiang W., Bertermann D., Blum P., (2016) - *A review of ground investigations for ground source heat pump (GSHP) systems*. Energy and Buildings, 117: 160-175, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.038>.
- Sarbu I., Sebarchievici C. (2014) - *General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings*. Energy and Buildings, 70: 441-454, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>.
- Spalvieri R., Vinci M. (2012) - *Quadro normativo per la Geotermia a Bassa Entalpia*. Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater, ASr03022, 81-82, doi:10.7343/AS-022-12-0031.
- Tornaghi M. (2010) - *Geotermia. Manuale tecnico pratico per la realizzazione di un impianto geotermico*. Sistemi Editoriali, Pozzuoli, Napoli, ISBN 9788851306649.
- Tinti F. (2008) - *Geotermia per la climatizzazione: applicazioni, tecnologia, analisi costi benefici*. Dario Flaccovio Editore, Palermo, ISBN 978-88-7758-830-2.
- Viti M. (2019) - *Geotermia in Toscana: nuove conoscenze ed innovazioni tecnologiche*. Il Geologo, 108: 8-23 ([www.geologitoscana.it](http://www.geologitoscana.it)).
- Viti M. (2020) - *L'impatto ambientale della geotermia in Toscana*. Il Geologo, 110: 12-21 ([www.geologitoscana.it](http://www.geologitoscana.it)).



Geognostica e  
consolidamento terreni

[www.mappogeognostica.it](http://www.mappogeognostica.it)

Mappo Geognostica srl

Loc. Biagioni 60 • 55010 Spianate LU • Tel. 0583 20799 • Fax 0572 930069

email: [mappogeognostica@virgilio.it](mailto:mappogeognostica@virgilio.it)

