

# Sistemi a circuito aperto/circuito chiuso: un confronto

Matteo Cultrera

Transmark Renewables - NL  
m.cultrera@transmark-renewables.com

## Introduzione

Relativamente ai sistemi di geoscambio – geotermia a bassa entalpia – usualmente la scelta ricade tra i sistemi a circuito chiuso (BHE, borehole heat exchange) e quelli a circuito aperto (open loop).

Per entrambi i sistemi di geoscambio è prevista la presenza di una pompa di calore (PdC) la cui funzione principale è il trasferimento del calore da una sorgente a bassa temperatura ad un sistema energetico a più alta temperatura. Il percorso inverso è sempre ammesso e meno dispendioso in termini energetici.

## Sistemi a circuito chiuso

Nei sistemi BHE il calore viene ceduto dal sottosuolo all'ambiente da climatizzare mediante un fluidovettore circolante all'interno di sonde verticali in polietilene o altro materiale. Tali sonde sono infisse verticalmente nel terreno a profondità variabili (generalmente tra i 50 ed i 100 m di profondità). Ovviamente esistono infinite varietà di sonde, in base ai seguenti aspetti:

- il materiale adottato (dall'acciaio inox, al pvc);
- geometria: doppio tubo, tubo singolo, coassiale, etc;
- fluido vettore: acqua, acqua + propilene/etc.

Sono plausibili diverse geometrie per poter ottenere il geoscambio tra gli edifici da condizionare e le risorse (geo)termiche da sfruttare:

- sonde in bacini chiusi (laghi) - sonde in bacini aperti mare);
- sonde verticali - sonde orizzontali, ecc..

## Sistemi a circuito aperto

I sistemi a circuito aperto prevedono il prelievo delle acque sotterranee da una falda per restituirle in un sistema aperto ad una temperatura differente. La restituzione avviene generalmente nel medesimo acquifero, ma possono essere considerati anche i sistemi idrografici superficiali, la restituzione in acquiferi differenti, in bacini (aperti o chiusi). Il prelievo/scambio può realizzarsi anche in altri contesti come bacini, cave, lagune, etc.

## Trasporto del calore nel sottosuolo

la trasmissione del calore si realizza attraverso diversi processi fisici nei quali l'energia termica viene trasferita da un sistema energetico ad un altro a causa di una differenza di temperatura tra i due sistemi. Tale migrazione del calore viene descritto dal primo principio della termodinamica (conservazione dell'energia), nel quale si afferma che l'energia termica ceduta da un

sistema deve corrispondere a quella ricevuta dall'altro.

Il trasferimento del calore nel sottosuolo è regolato dalla sommatoria di tre principi fisici fondamentali:

Convezione - Conduzione - Radiazione.

## Convezione

Il trasporto convettivo del calore è dovuto al movimento di fluidi; il termine "convettivo" va adottato nel caso in cui tale trasferimento sia indotto dal solo gradiente di temperatura; Il flusso termico specifico ( $q'$ , flusso attraverso una superficie unitaria) in tal caso può essere descritto secondo la formula di Newton:

$$q' = h * (T_s - T_\infty) \quad [W/m^2]$$

dove,  $h$  rappresenta il coefficiente di scambio convettivo

$[W/m^2 K]$  e  $T$  è la temperatura (in superficie e del mezzo di scambio).

Nel caso in cui il flusso dei fluidi è indotto da una sorgente esterna, si preferisce adottare il termine *advezione*. Nel caso specifico, il movimento del fluido considerato è quello delle acque sotterranee; tale movimento è indotto dal gradiente idraulico – in forza di un diverso potenziale gravitazionale. Il movimento dei fluidi è descritto dalle note equazioni del flusso delle acque sotterranee e può essere modificato da agenti esterni (pompaggio, drenaggio, trincee, etc).

## Conduzione

La conduzione è il principio fisico per cui il calore viene propagato da ambienti più caldi verso ambienti più freddi grazie ai processi di interazione molecolare. In sostanza, le molecole vibrano in funzione del calore e trasferiscono parte del movimento alle molecole adiacenti. Tale processo è descritto dalla nota legge di Fourier ed è legato principalmente alla conducibilità termica dei materiali. Tale legge, in condizioni monodimensionali può essere esplicitata nella seguente equazione (monodirezionale):

$$q' = \lambda * (dT/dx)$$

dove  $\lambda$  rappresenta la conducibilità termica del materiale,

espressa in  $[W/mK]$

## Radiazione

Qualsiasi corpo irradia energia verso l'esterno attraverso le radiazioni elettromagnetiche. Quanto più è elevata la tem-



peratura di un corpo, tanto più tali radiazioni aumentano, secondo il principio enunciato da Boltzmann.

### Scambio di calore con il sottosuolo nei sistemi BHE

Relativamente ai sistemi geotermici a bassa entalpia, il contributo fornito dal trasferimento di calore mediante il processo di radiazione è trascurabile.

In linea generale, il contributo dovuto al trasferimento del calore per convezione risulta di maggior impatto nel computo complessivo dei singoli contributi. In termini analitici, si ricorre al numero di Peclet, il quale è funzione del rapporto tra il contributo advettivo e quello conduttivo. Per valori bassi del numero di Peclet ( $Pe \ll 1$ ) prevale il trasporto conduttivo; viceversa per valori elevati del numero di Peclet ( $Pe \gg 1$ ) predomina il processo advettivo.

Per meglio comprendere il trasporto di calore nei sistemi BHE, si prenda in considerazione la figura 1, nella quale viene rappresentato con un elemento lineare verticale una sonda a circuito chiuso.

Nel caso a sinistra siamo in presenza di terreni omogenei dal punto di vista delle proprietà termiche, mentre nella schematizzazione a destra si osserva la presenza di un acquifero superficiale dotato di modesto spessore e velocità nella parte alta, mentre al di sotto del BHE è localizzabile un acquifero più potente (Diersch, Feflow conference 2009).

Nonostante il BHE non intercetti la falda principale, posta al di sotto di quest'ultimo, risulta evidente dalla simulazione numerica proposta che il trasferimento di calore avviene prevalentemente grazie ai processi advettivi rispetto a quelli conduttivi.

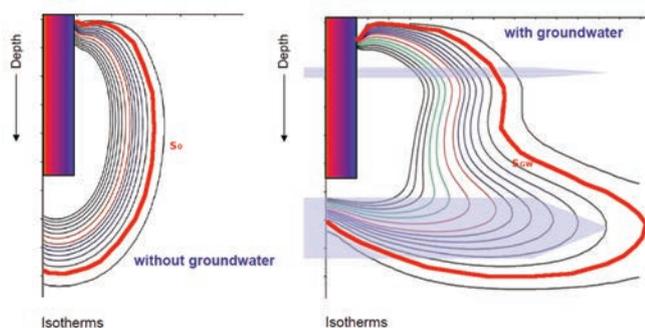


Fig.1: modello numerico di un sistema a circuito chiuso (BHE) in assenza di falda (a sinistra) o in presenza di falda (a destra) (modificato da Diersch, II Feflow conference, Berlino 2009).

Il trasporto convettivo presenta un altro aspetto interessante; se si considera l'isoterma indicata in rosso, risulta evidente come la superficie specifica sia maggiore in presenza di falda, ovvero  $S_{gw} > S_0$ . Ne deriva che la superficie di contatto tra corpo freddo/corpo caldo aumenta e pertanto il trasferimento di calore dovuto al contributo conduttivo ne risente positivamente; ovvero, lo scambio di calore risulta più efficace nei sistemi in cui predomina il contributo advettivo. In altre parole, il trasporto del calore realizzato attraverso il flusso delle acque sotterranee (acquiferi) risulta molto più efficace se com-

parato al solo trasporto di tipo conduttivo.

Per quanto concerne i sistemi *open loop* è evidente che il trasporto calore è sostanzialmente di tipo advettivo; la componente del trasporto dovuto al contributo di tipo conduttivo è secondario se non addirittura trascurabile.

### Discussione

Noti in linea generale i meccanismi fisici che regolano il trasferimento del calore nel sottosuolo, risulta utile proporre qualche riflessione.

La figura 2 sintetizza alcuni elementi a favore e contro ciascuna tecnologia. Una generalizzazione in questa sede è necessaria, in quanto sono molteplici le possibili opzioni identificabili a seconda della destinazione d'uso del fabbricato da condizionare, delle condizioni idrogeologiche e geotermiche, dell'ambito amministrativo, della località, etc.

Nella scelta della tipologia dell'impianto i fattori che più dovrebbero essere considerati (ma non i soli, ovviamente) sono rappresentati da: (I) convenienza economica, (II) logistica degli ambienti a disposizione, (III) condizioni al contorno di tipo geotermico ed idrogeologico. Come rappresentato nell'esempio di fig.1, la presenza nel sistema geotermico di un acquifero modifica profondamente il rendimento energetico di un sistema a circuito chiuso. Risulta, pertanto, un passaggio necessario nella direzione di una progettazione ottimale dell'impianto individuare in via preventiva la successione idrostratigrafica attesa. Il ricorso a prove di tipo Ground Response Test, seppur necessarie per il dimensionamento delle singole sonde verticali, non fornisce eventuali ulteriori informazioni di tipo stratigrafico. In altre parole si può presentare il caso in cui incrementando di poco la profondità delle sonde per intercettare un acquifero è possibile ridurne il loro numero; oppure è possibile limitarne la profondità nel caso gli strati più profondi presentino una ridotta conduttività termica.

Tra i fattori che incidono nella scelta della soluzione tecnologica da adottare, infine, va menzionato il ruolo della pubblica amministrazione. Infatti, alcune amministrazioni propendono per una tecnologia rispetto ad un'altra; inoltre i tempi necessari per ottenere la concessione/permesso possono variare da pochi mesi a diversi anni ...

IMPIANTO	PRO	CONTRO
<b>CIRCUITO CHIUSO</b>	TECNOLOGIA IN CRESCITA ASSENZA DI SCAMBIO DI FLUIDI CON IL SOTTOSUOLO E' RICHIESTA UNA MANUTENZIONE DEGLI IMPIANTI MOLTO LIMITATA	PERFORAZIONI MULTIPLE NECESSITA' DI AMPIE SUPERFICI LIBERE RICERCA SCIENTIFICA RELATIVAMENTE LACUNOSA
<b>CIRCUITO APERTO</b>	MAGGIORE RENDIMENTO ENERGETICO MAGGIOR CONTROLLO SUI MANUFATTI PAYBACK IN TEMPI RIDOTTI	ITER AMMINISTRATIVO LUNGO E COMPLESSO NECESSITA' DI INTERCETTARE ACQUIFERI SUFFICIENTEMENTE POTENTI MANUTENZIONE ORDINARIA E STRAORDINARIA

Fig.2: schematizzazione di alcune analisi utili in fase di valutazione della tecnologia da adottare per realizzare lo scambio termico. Trattandosi di una generalizzazione alcuni aspetti vanno presi caso per caso (e.g. *payback*, numero di perforazioni, iter amministrativo, etc.).