

Alessandro Baietto Massimo Pochettino Enrica Salvatici

PROGETTAZIONE DI IMPIANTI GEOTERMICI

SONDE VERTICALI E POZZI D'ACQUA



Dario Flaccovio Editore

Alessandro Baietto – Massimo Pochettino – Enrica Salvatici
PROGETTAZIONE DI IMPIANTI GEOTERMICI – SONDE VERTICALI E POZZI D'ACQUA
ISBN 978-88-579-0058-2

© 2010 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686
www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: ottobre 2010

Baietto, Alessandro <1976->

Progettazione di impianti geotermici : sonde verticali e pozzi d'acqua / Alessandro

Baietto, Massimo Pochettino, Enrica Salvatici. - Palermo : D. Flaccovio, 2010.

ISBN 978-88-579-0058-2

I. Edifici - Impianti termici. I. Pochettino, Massimo <1973->

II. Salvatici, Enrica <1975->.

697 CDD-22

SBN Pal0229510

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, ottobre 2010.

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.



SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- possibilità di inserire il proprio commento al libro.

L'indirizzo per accedere ai servizi è: www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF0058

INDICE

Premessapag. VIII

PARTE PRIMA

La teoria

Capitolo 1 – Le pompe di calore geotermiche (GSHP)

| | | |
|---|---|----|
| 1.1. Generalità..... | » | 3 |
| 1.2. Principi di funzionamento | » | 4 |
| 1.3. Classificazione dei sistemi | » | 5 |
| 1.4. Componenti progettuali dei sistemi GSHP | » | 8 |
| 1.5. Il sistema sottosuolo | » | 10 |
| 1.6. Aspetti ambientali | » | 14 |
| 1.7. Vantaggi e svantaggi dei sistemi GSHP..... | » | 15 |
| 1.8. Mercato delle GSHP in Europa e in Italia | » | 16 |

Capitolo 2 – Fabbisogni energetici e pompe di calore

| | | |
|--|---|----|
| 2.1. Generalità..... | » | 19 |
| 2.2. L'involucro edilizio | » | 19 |
| 2.3. Calcolo dei fabbisogni di energia termica e primaria per il riscaldamento e raffrescamento | » | 22 |
| 2.4. Espressione della potenza termica..... | » | 26 |
| 2.5. Principi di funzionamento delle pompe di calore | » | 27 |
| 2.5.1. Pompe di calore a compressione di vapore | » | 27 |
| 2.5.2. Pompe di calore ad assorbimento | » | 32 |
| 2.5.3. Pompa di calore ad assorbimento a bromuro di litio..... | » | 33 |
| 2.5.4. Pompa di calore ad assorbimento ad ammoniacca | » | 36 |
| 2.6. Definizioni di uso corrente e requisiti delle pompe di calore | » | 38 |
| 2.7. Esempi preliminari di dimensionamento di sistemi GSHP | » | 41 |
| 2.8. Impianti con pompe di calore geotermiche ad assorbimento | » | 44 |
| 2.9. Pompa di calore ad assorbimento o a compressione di vapore?..... | » | 46 |
| 2.10. Temperature di dimensionamento sonde geotermiche | » | 48 |
| 2.11. Efficienza sistemi di riscaldamento: confronto GSHP con metodi tradizionali | » | 51 |
| 2.11.1. Sistemi a confronto | » | 52 |

Capitolo 3 – Dimensionamento di sonde verticali e pozzi d'acqua abbinati a pompe di calore

| | | |
|---|---|----|
| 3.1. Generalità..... | » | 55 |
| 3.2. Sistemi a sonde verticali | » | 55 |
| 3.2.1. Caratteristiche generali | » | 55 |
| 3.2.2. Principi di dimensionamento | » | 61 |
| 3.2.3. Metodo di dimensionamento ASHRAE | » | 65 |
| 3.3. Sistemi ad acqua di falda..... | » | 70 |
| 3.3.1. Caratteristiche generali | » | 70 |
| 3.3.2. Principi di dimensionamento | » | 73 |
| 3.3.3. Metodo di dimensionamento delle portate sulla base dei carichi termici | » | 76 |
| 3.3.4. Caratteristiche chimiche dell'acqua di falda | » | 79 |

PARTE SECONDA
GeoHeatCal

Capitolo 4 – GeoHeatCal: software di dimensionamento di sistemi a sonde verticali e acqua di falda

| | | |
|--|---|----|
| 4.1. Presentazione del software | » | 83 |
| 4.2. Requisiti minimi del sistema | » | 85 |
| 4.3. Installazione | » | 85 |
| 4.4. Attivazione del programma | » | 85 |
| 4.4.1. Sistema di protezione | » | 86 |
| 4.4.2. Istruzioni per l'attivazione via Internet | » | 86 |
| 4.5. Attivazione telefonica | » | 86 |
| 4.6. Assistenza tecnica | » | 86 |

Capitolo 5 – Descrizione di GeoHeatCal

| | | |
|---|---|-----|
| 5.1. Descrizione dell'ambiente di lavoro | » | 87 |
| 5.1.1. Menu FILE | » | 87 |
| 5.1.2. Menu TABELLE | » | 89 |
| 5.1.3. Inserimento e lettura dei dati | » | 90 |
| 5.2. Modulo SONDA VERTICALE | » | 91 |
| 5.2.1. Finestra PROGETTO SONDA VERTICALE | » | 92 |
| 5.2.2. Sezione CARICHI TERMICI | » | 93 |
| 5.2.3. Sezione SISTEMI AUSILIARI E POTENZE AGGIUNTIVE | » | 98 |
| 5.2.4. Sezione POMPA DI CALORE | » | 102 |
| 5.2.5. Sezione LATO SORGENTE | » | 103 |
| 5.2.6. Sezione SONDA/TERRENO | » | 104 |
| 5.2.6.1. Scheda TERRENO | » | 105 |
| 5.2.6.2. Scheda CAMPO SONDE | » | 106 |
| 5.2.6.3. Scheda TUBO+FLUIDO | » | 109 |
| 5.2.6.4. Finestra SOLUZIONE E RESISTENZA TERMICA | » | 111 |
| 5.2.7. Comando CALCOLA e finestra RISULTATI | » | 113 |
| 5.2.7.1. Finestra CONSUMI ENERGETICI ED EMISSIONI | » | 116 |
| 5.2.8. Comando CHIUDI | » | 119 |
| 5.3. Modulo ACQUA DI FALDA | » | 120 |
| 5.3.1. Finestra PROGETTO ACQUA DI FALDA | » | 120 |
| 5.3.2. Sezione LATO SORGENTE | » | 122 |
| 5.3.3. Sezione POZZO/IMPIANTO | » | 123 |
| 5.3.4. Comando CALCOLA e finestra RISULTATI | » | 126 |
| 5.3.5. Comando CHIUDI | » | 129 |

Capitolo 6 – Esempi di dimensionamento impianti

| | | |
|---|---|-----|
| 6.1. Generalità | » | 131 |
| 6.2. Impianto a bassa potenza | » | 132 |
| 6.3. Impianto di media/alta potenza | » | 142 |
| 6.4. Impianto ad acqua di falda | » | 152 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Bibliografia | » | 159 |
|--------------------|---|-----|

Premessa

Lo *Stern review*, pubblicato nel 2006, è stato il primo rapporto dedicato a evidenziare gli effetti del riscaldamento globale sull'economia mondiale. Secondo tale documento, il riscaldamento e raffrescamento degli edifici incide per l'8% del totale delle emissioni di gas serra, la stessa percentuale raggiunge il 20% se si considerano le emissioni a monte correlate ai consumi elettrici e a processi di combustione.

È evidente quindi che in questo settore il ricorso alle energie rinnovabili risulti di importanza strategica, in modo da sostituirsi progressivamente all'utilizzo delle sorgenti di energia fossile.

In questo contesto, le pompe di calore geotermiche sono considerate una delle tecnologie chiave per la riduzione delle emissioni dei gas serra. Ad oggi, la maggior parte degli impianti geotermici abbinati a pompe di calore è rappresentata da sonde verticali inserite nel terreno tramite perforazioni e da pozzi che estraggono l'acqua di falda che eventualmente viene reiniettata nella stessa falda acquifera tramite altri pozzi.

Altre tipologie di scambio geotermico, tramite sonde orizzontali, geostrutture o con corpi idrici superficiali sono meno utilizzate, soprattutto in Italia. Proprio per questo motivo, il libro e il software GeoHeatCal allegato sono stati sviluppati specificatamente per il dimensionamento di sonde verticali e pozzi d'acqua geotermici, in modo da fornire all'utilizzatore uno strumento che permetta di coprire l'area applicativa più importante nel settore delle pompe di calore geotermiche. Nella prima parte del presente libro si fornisce una descrizione delle componenti tecniche e progettuali dei sistemi a pompe di calore geotermiche. Nella seconda parte del libro vengono presentati il software GeoHeatCal ed alcuni esempi di applicazione.

Il software GeoHeatCal permette di dimensionare sistemi di sonde verticali e pozzi d'acqua geotermici abbinati a pompe di calore, per il riscaldamento e/o raffrescamento degli edifici. Il programma è strutturato in un modulo sonde verticali e un modulo pozzi d'acqua. Dati i fabbisogni termico e/o frigorifero di un edificio e le condizioni operative della pompa di calore, GeoHeatCal definisce la lunghezza complessiva delle sonde verticali (modulo SONDE) o la portata d'acqua

di emungimento (modulo ACQUA DI FALDA) affinché tali fabbisogni possano essere soddisfatti. Il modulo sonde verticali è strutturato in maniera flessibile, offrendo all'utente l'opportunità di considerare il locale contesto geologico e la scelta tra varie opzioni progettuali: la tipologia dei materiali, le caratteristiche del terreno, il tipo di fluido termovettore, le proprietà geometriche del pozzo e del campo sonde, il periodo di simulazione. Oltre il dimensionamento vero e proprio, GeoHeatCal impiega una serie di strumenti in grado di calcolare analiticamente ulteriori parametri, quali i parametri termofisici dei fluidi termovettori, la resistenza termica di pozzo, l'aumento o la diminuzione della temperatura media in prossimità del campo sonde. Nel modulo ACQUA DI FALDA vi è la possibilità di effettuare il dimensionamento con o senza scambiatori di calore intermedi. Inoltre, l'utente può scegliere di abbinare ai sistemi geotermici un sistema energetico integrativo, come una caldaia o una torre di raffreddamento, andando ad impostare direttamente i parametri di carico e di consumo all'interno di una finestra del programma. Si aggiunga infine che, per entrambi i moduli, è stata implementata anche una funzione di calcolo dei consumi elettrici, dei costi di gestione e delle emissioni di CO₂ e NO_x.

Gli autori

PARTE PRIMA

La teoria

CAPITOLO 1

LE POMPE DI CALORE GEOTERMICHE (GSHP)

1.1. GENERALITÀ

Le pompe di calore geotermiche costituiscono una tecnologia che utilizza una fonte di energia rinnovabile per la climatizzazione estiva ed invernale degli edifici, la produzione di acqua calda sanitaria e la produzione di *caldo e/o freddo* nei cicli di processo industriale e alimentare.

Negli ultimi anni, il mercato delle pompe di calore geotermiche ha registrato uno straordinario sviluppo in alcuni paesi europei, quali Svezia, Germania e Francia. Tale incremento è giustificato dall'ampio potenziale di riduzione delle emissioni di CO₂ e dai bassi costi di gestione che l'utilizzo di questi dispositivi comporta. Le pompe di calore sono macchine termiche che, compiendo lavoro, trasferiscono calore da un corpo a temperatura più bassa ad uno a temperatura più alta. Il sottosuolo (generalmente a profondità inferiori a 400 m) costituisce una sorgente per l'estrazione del calore e un serbatoio per il suo stoccaggio. L'energia scambiata con il terreno, con le falde e con i corpi idrici superficiali può essere usata sia per il riscaldamento che per il raffrescamento di un edificio tramite la stessa pompa di calore, definita in questo caso *pompa di calore reversibile*. A fronte della rapida crescita del mercato delle pompe di calore geotermiche in Europa, in Italia, soltanto negli ultimi anni ha iniziato a svilupparsi un mercato interno, mentre – a livello legislativo – sono ancora pochi e frammentari gli strumenti normativi che regolamentano lo sfruttamento di questa energia rinnovabile nel rispetto dell'ambiente e delle risorse idriche sotterranee. Affinché il crescente ricorso a questi sistemi per applicazioni residenziali e commerciali abbia un impatto positivo sulla società, è necessario che il settore possa usufruire di standard operativi approvati su scala nazionale e di progettisti adeguatamente formati in grado di proporre soluzioni tecniche efficienti e sostenibili dal punto di vista ambientale ed economico.

Il dimensionamento di un sistema di scambio geotermico è un processo critico e complesso da cui dipende l'efficienza, la durabilità e la sostenibilità economica dell'intero sistema di climatizzazione.

Il software di calcolo GeoHeatCal costituisce uno strumento utile per il dimensionamento di sistemi di sonde verticali e pozzi d'acqua. Tuttavia, va precisato che l'utilizzo di questo strumento deve essere supportato da una solida conoscenza da parte del progettista delle componenti impiantistiche e del contesto geologico di riferimento, oltre che dei parametri tecnici che influiscono sul dimensionamento stesso degli scambiatori geotermici. Nei seguenti capitoli si riporta un

accenno ai principali fattori di progettazione, indirizzando il lettore a testi specialistici per gli approfondimenti tecnici e metodologici inerenti la progettazione di sistemi a pompe di calore geotermiche.

1.2. PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

Le pompe di calore geotermiche (in anglosassone, GSHP) sono dispositivi che combinano il funzionamento di una pompa di calore connessa con uno scambiatore a circuito chiuso (come le sonde verticali) o aperto (come acqua di falda estratta da un pozzo). In modalità riscaldamento, questi dispositivi utilizzano il sottosuolo come una sorgente di calore, mentre in modalità raffrescamento, il sottosuolo viene utilizzato per la dispersione di calore. Va specificato che le GSHP abbinata a sonde verticali sono in grado di fornire il riscaldamento e/o raffrescamento di un edificio virtualmente per qualunque sito d'installazione. Invece, il funzionamento di GSHP abbinata all'estrazione di acqua di falda è vincolato all'esistenza di adeguate caratteristiche idrogeologiche del sito interessato dall'installazione.

Comunemente, ogni chilowatt (kW) di potenza elettrica utilizzata per l'esercizio di un sistema GSHP permette di estrarre più di 3 kW di potenza termica dal terreno. Le pompe di calore disponibili sul mercato garantiscono potenze termiche e frigorifere variabili tra i 3.5 e 35 kW, ove una singola unità è normalmente sufficiente per fornire il fabbisogno di un'abitazione singola o di un piccolo edificio commerciale, mentre, per edifici commerciali più grandi o per edifici istituzionali, è generalmente necessario usufruire di più unità di pompe di calore.

Non creando direttamente alcun prodotto di combustione ed estraendo (o immettendo) energia dal (nel) terreno, un sistema GSHP può fornire molta più energia termica di quella elettrica che esso effettivamente consuma: un sistema basato sulle sonde verticali può operare con efficienze variabili tra il 300 e il 500% in una stagione, mentre uno basato su pozzi d'acqua può avere efficienze dell'ordine del 400-650%. Uno dei pregi legati all'utilizzo di risorse geotermiche non è tanto quello di poter usufruire di elevate temperature del sistema geotermico (in genere < 20 °C), quanto quello di poter utilizzare un sistema sorgente/serbatoio a temperatura costante durante tutto l'anno, indipendentemente dalle fluttuazioni climatiche stagionali. Per questo motivo, i sistemi GSHP sono più efficienti delle tradizionali pompe di calore ad aria e anche delle più efficienti tecnologie utilizzate per la climatizzazione, oltre ad avere, rispetto a queste ultime, costi di gestione più bassi. Se confrontate, infatti, con i sistemi convenzionali di climatizzazione ad aria, le pompe di calore geotermiche offrono una riduzione dei consumi energetici del 30-70% in riscaldamento e del 20-50% in raffrescamento. Il risparmio energetico è persino più alto se si considerano i sistemi di riscaldamento a combustione o a resistenza elettrica.

In sintesi, l'utilizzo di pompe di calore accoppiate a sistemi di scambio geoter-

mico permette di combinare una massima efficienza (e minori consumi) con un ridotto impatto ambientale, dovuto alle minori emissioni di CO₂. È da specificare che un impatto ambientale potenzialmente elevato si può verificare qualora vengano eseguite una progettazione e/o un'installazione non adeguate al locale contesto geologico e idrogeologico, con una compromissione dell'integrità qualitativa delle risorse idriche sotterranee. Attualmente, nel mondo, le pompe di calore geotermiche costituiscono l'uso più diffuso del calore geotermico (circa il 60% degli usi diretti nel 2006), grazie alla loro predisposizione all'utilizzo in pressoché qualunque contesto geologico-ambientale. In Europa, la potenza termica stimata alla fine del 2008 imputabile alle pompe di calore geotermiche è stata di 8920 MWt (quasi 800.000 unità installate) e registra un andamento in continua crescita.

1.3. CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI

Le pompe di calore geotermiche costituiscono una forma di uso diretto dell'energia geotermica, applicata nell'ambito delle cosiddette *risorse geotermiche a bassa entalpia* (< 90 °C). Per identificare la varietà di sistemi a pompe di calore geotermiche che utilizzano il terreno o l'acqua (di falda o di superficie) come sorgenti di energia termica o serbatoi in cui stoccare l'energia sottratta ad altro ambiente, sono utilizzate diverse terminologie. L'ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), l'ente americano dei sistemi di climatizzazione, ha stabilito una classificazione standard che costituisce, ad oggi, il riferimento a livello mondiale. Lo standard ASHRAE definisce la famiglia delle *Ground-Source Heat Pumps* (GSHP) per identificare in maniera generale le pompe di calore geotermiche.

Le GSHP sono pompe di calore (a compressione di calore o ad assorbimento) che trasferiscono in estate il calore prelevato dagli edifici (così come da processi di raffreddamento più vari) verso la sorgente calda (terreno o acqua di falda) e fanno l'opposto in inverno, quando il calore necessario ad abbattere le dispersioni viene sottratto al terreno o all'acqua (sorgente fredda) e riversato nell'ambiente o messo a disposizione per altri processi (sorgente calda). Secondo la nomenclatura ASHRAE, si distinguono tre categorie principali di sistemi GSHP, a seconda delle caratteristiche del fluido termovettore (figura 1.1):

- GWHP, *Groundwater Heat Pumps*: il fluido termovettore è costituito da acqua di falda che viene catturata e rilasciata una volta terminato il ciclo di scambio termico;
- GCHP, *Ground-Coupled Heat Pumps*: il fluido termovettore scorre in un circuito chiuso a contatto con il terreno;
- SWHP, *Surface Water Heat Pumps*: il fluido termovettore è costituito da acqua di superficie che, anche in questo caso, viene catturata e rilasciata una volta terminato il ciclo di scambio termico.

Tabella 1.1. Schema riassuntivo sulla classificazione dei sistemi GSHP

| GWHP/Circuiti aperti | GCHP/Circuiti chiusi | SWHP | UTES/Stoccaggio termico |
|--|--|---|--|
| Sistemi ad acqua di falda: – reiniezione in falda – recapito in superficie | Sonde verticali Sonde orizzontali Geostrutture | Sistemi ad acqua di superficie: – scambio diretto – scambio indiretto | BTES/Circuiti chiusi ATES/Circuiti aperti |

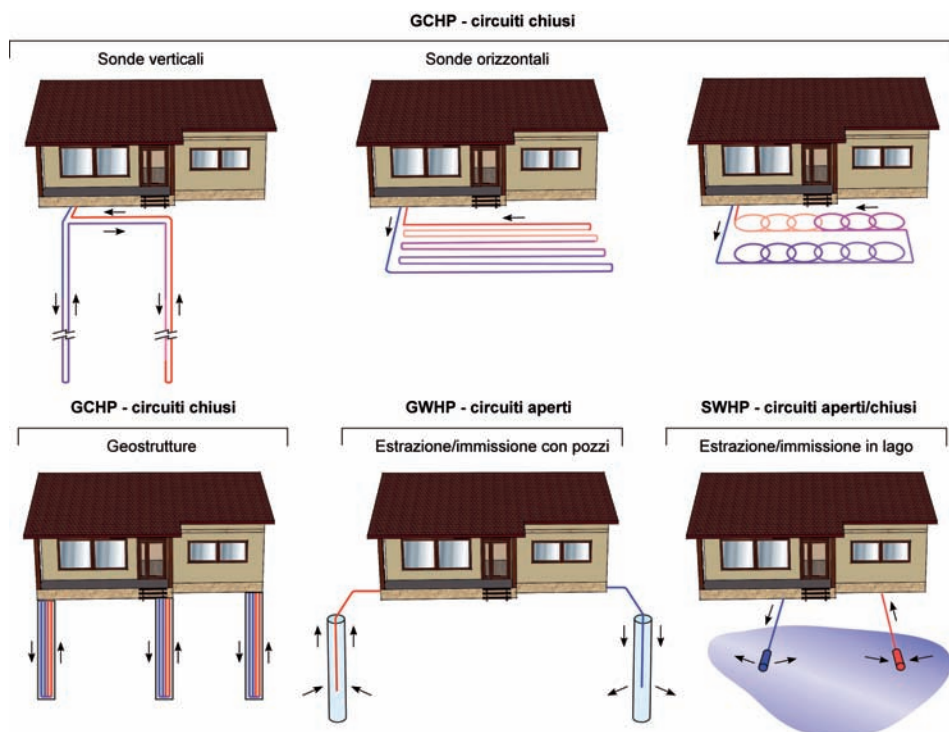


Figura 1.1

Schema delle principali tipologie di sistemi GSHP (Ground Source Heat Pumps, secondo la definizione ASHRAE)

In Italia, è diffusa un'altra terminologia che distingue i GSHP in *circuiti aperti* e in *circuiti chiusi*. I circuiti aperti, corrispondenti ai GWHP, sono costituiti dai sistemi che sfruttano direttamente l'acqua sotterranea o di superficie per lo scambio termico con la pompa di calore. I circuiti chiusi, corrispondenti ai GCHP, sfruttano, invece, indirettamente il calore contenuto nel terreno o nei corpi idrici tramite uno scambio con un fluido termovettore circolante in tubi (o sonde). I sistemi SWHP possono essere considerati come circuiti chiusi o aperti, a seconda del tipo di scambio (per esempio indiretto o diretto) che avviene con il corpo idrico superficiale. Questi sistemi sono stati inclusi nei GSHP per analogia di applicazione, sebbene le caratteristiche dei corpi idrici superficiali siano abbastanza diverse rispetto a quelli sotterranei.

I principali sistemi a circuito chiuso sono costituiti da sonde verticali, sonde orizzontali e geostrutture.

Un'altra categoria di sistemi geotermici impiegati per la climatizzazione utilizza lo stoccaggio di calore in profondità; nella nomenclatura anglosassone essi vengono definiti UTES (*Underground Thermal Energy Storage*). Questi sistemi utilizzano lo stoccaggio stagionale di caldo o freddo per il loro sfruttamento nelle stagioni successive. La climatizzazione degli edifici con i sistemi UTES può avvenire tramite pompa di calore oppure, se i livelli termici lo permettono, anche in sua assenza. Per gli UTES in cui il fluido termovettore è costituito da acqua sotterranea estratta/immessa tramite pozzi, si parla di *stoccaggio in acquifero* (ATES, *Aquifer Thermal Energy System*), mentre se il trasporto avviene indirettamente tramite sonde verticali, si parla di *stoccaggio in pozzo* (BTES, *Borehole Thermal Energy System*).

Le componenti dello scambio termico possono variare da sistema a sistema e le principali tipologie sono rappresentate in figura 1.2.

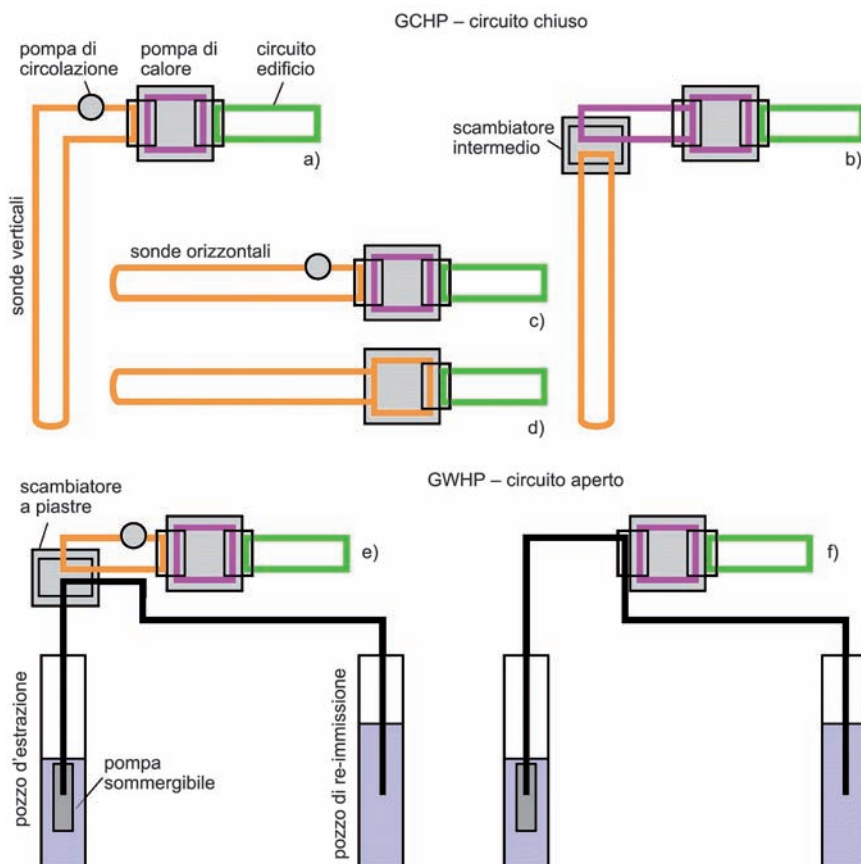


Figura 1.2

Tipologie e componenti di scambio tra i diversi circuiti dei sistemi GSHP: a) tre circuiti con pompa di circolazione lato sonde, b) fluido propano (o CO₂) circolante ad evaporazione nel sottosuolo senza pompa di circolazione lato sonde, c) tre circuiti con pompa di circolazione lato sonde, d) ad espansione diretta, e) a scambio indiretto (con scambiatore a piastre), f) a scambio diretto (senza scambiatore a piastre)

I sistemi GCHP utilizzano normalmente tre circuiti:

- il circuito sonda;
- il circuito pompa di calore;
- il circuito lato edificio.

Nel caso delle sonde verticali, vi sono applicazioni recenti in cui nei tubi vengono fatti circolare fluidi come propano (o CO_2), i quali permettono un'evaporazione diretta a contatto con il sottosuolo e una condensazione sullo scambiatore di calore intermedio. Si precisa che questa tipologia è ancora in fase di perfezionamento e comunque consente al sistema di funzionare unicamente in regime di riscaldamento.

Le sonde orizzontali funzionano normalmente con un circuito sonda separato dal circuito pompa di calore. Esistono anche applicazioni denominate *ad espansione diretta* (DEX), in cui il fluido circolante nelle sonde è il fluido di lavoro della pompa di calore. In pratica, la circolazione del fluido viene imposta dal compressore della pompa di calore e questo spesso richiede elevati consumi elettrici. Nei sistemi GWHP, lo scambio termico può essere indiretto – tramite uno scambiatore a piastre interposto tra l'acqua proveniente dalla falda e la pompa di calore – oppure diretto, senza scambiatore interposto.

1.4. COMPONENTI PROGETTUALI DEI SISTEMI GSHP

Nella realizzazione di un progetto d'impianto GSHP intervengono numerosi aspetti tecnici e normativi che richiedono una gestione da parte di professionisti in possesso di diverse competenze.

Sinteticamente, le fasi progettuali interessano l'analisi delle seguenti componenti principali (si veda figura 1.3):

- l'edificio e il suo impianto di climatizzazione;
- la pompa di calore;
- il sistema geologico e geotermico.

Preliminarmente alla progettazione vera e propria di una sistema GSHP, è necessario effettuare uno studio di fattibilità e un'analisi delle esigenze dell'utenza finale in termini energetici, impiantistici e di tipologia di utilizzo (per esempio climatizzazione, acqua sanitaria, uso per cicli produttivi/alimentari).

Un elemento essenziale di questa analisi è il calcolo delle dispersioni e dei carichi termici di un edificio, del suo profilo di consumo energetico annuale e dalla stima degli eventuali fabbisogni di acqua calda sanitaria. Oltre a questo, prima di affrontare la progettazione di un sistema GSHP, vanno considerati i seguenti aspetti generali:

- il tipo di impianto termico di distribuzione e l'entità dei lavori da svolgere.

- Nuove edificazioni o ristrutturazioni edilizie consentono di ridurre i costi in quanto si possono combinare i lavori di manodopera;
- lo spazio a disposizione e l'accessibilità dei macchinari;
 - il tipo di impianto termico che viene sostituito. Se si tratta di impianti elettrici, a gasolio o altri impianti tradizionali a combustione, il periodo di ammortamento sarà più favorevole;
 - la possibilità di utilizzare un sistema GSHP sia per il riscaldamento invernale sia per il raffrescamento estivo;
 - l'integrazione di sistemi ausiliari di riscaldamento o raffrescamento;
 - il ricorso ad un sistema rinnovabile al 100%. È possibile realizzarlo, nel caso di pompe di calore a compressione di vapore, installando pannelli fotovoltaici o altri generatori elettrici ad energia rinnovabile per il loro funzionamento e per quello delle pompe di distribuzione.

In una seconda fase, è necessario effettuare una scelta del più idoneo tipo di sistema GSHP, valutando sia i vincoli normativi e ambientali esistenti sia il locale contesto geologico-idrogeologico. Infatti, i vincoli normativi e ambientali e le dispo-

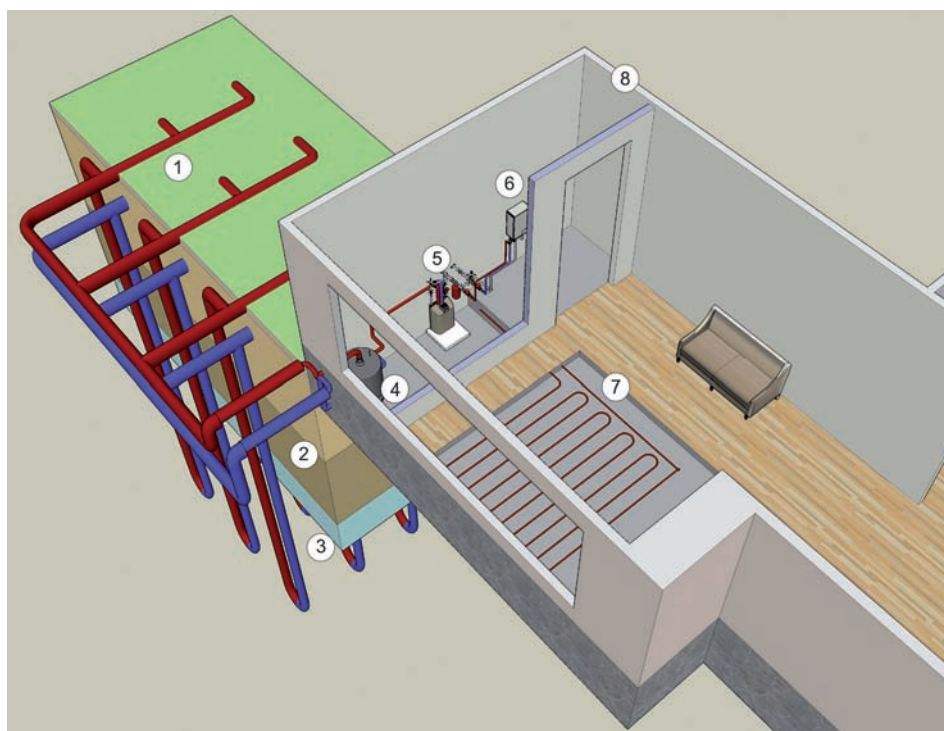


Figura 1.3

Componenti tecniche e geologiche di un sistema GSHP a sonde verticali; 1) campo sonde con circuitazione in parallelo, 2) strati del sottosuolo con diverse proprietà termofisiche, 3) falda acquifera, 4) accumulatore acqua calda sanitaria, 5) pompa di calore di tipo *salamoia-acqua*, 6) boiler in integrazione, 8) involucro edilizio, 7) pannelli radianti a pavimento

sizioni in merito alla tutela delle acque superficiali e sotterranee possono di fatto precludere la scelta di specifiche tipologie di impianto geotermico.

Chiariti tali aspetti, è necessario svolgere un'indagine geologica-idrogeologica del sito d'interesse, il cui livello di dettaglio sarà funzione anche della taglia del progetto geotermico.

Per impianti di piccola taglia (< 30 kW), la progettazione può essere effettuata sulla base di assunzioni e stime (fatto salvo per prescrizioni autorizzative particolari).

Per impianti di taglia superiore diventa necessario realizzare degli studi di dettaglio e indagini *ad hoc* (per esempio, TRT per sonde verticali). In ogni caso, è buona pratica consultare preliminarmente una cartografia geologica di riferimento a scala (almeno) 1 : 25 000 reperibile presso gli enti preposti.

Infine, definita la tipologia del sistema di scambio GSHP che si intende utilizzare, si passa alle fasi di progettazione geologica e ingegneristica.

In linea di principio, il geologo deve effettuare il dimensionamento dello scambiatore geotermico (per esempio, numero, profondità e disposizione di sonde verticali) sulla base delle caratteristiche geologiche-idrogeologiche determinate per il sito in esame. L'ingegnere, sulla base delle caratteristiche dello scambiatore geotermico e di quanto definito precedentemente dall'analisi termotecnica, deve effettuare un dimensionamento dell'impianto di distribuzione e delle pompe di calore.

Di fatto, la progettazione geologica e ingegneristica vanno realizzate di pari passo, combinando le varie componenti analitiche all'interno di un approccio olistico, che permetta di definire le varie opzioni tecniche e di scegliere le migliori soluzioni progettuali.

1.5. IL SISTEMA SOTTOSUOLO

L'acquisizione di informazioni a carattere geologico, idrogeologico e termico consente di progettare sistemi in grado di fornire energia termica e frigorigena all'edificio senza dover effettuare cautelativamente sovradimensionamenti dispendiosi. Per la progettazione di sistemi GSHP i fattori da quantificare sono la temperatura del sottosuolo (nelle prime centinaia di metri), le conducibilità e le diffusività termiche degli strati di terreno e roccia, il livello dell'acqua di falda, le caratteristiche dell'acquifero e di flusso sotterraneo. Inoltre, è utile considerare le caratteristiche di resistenza meccanica dei terreni e delle rocce in modo da stabilire i metodi di perforazione più adeguati e i costi associati. Questo insieme di fattori va combinato all'interno di un *modello concettuale* delle caratteristiche locali del sottosuolo (geologiche, idrogeologiche, ecc.). Il grado di approfondimento a cui vanno spinte le indagini di carattere geologico sono funzione della taglia del progetto e della complessità geologica e idrogeologica intrinseca del settore in cui ci si trova ad operare.

La consultazione di dati stratigrafici di pozzi e sondaggi, di carte e profili geologici va effettuata ai fini di una corretta ricostruzione dei parametri termofisici del sottosuolo. In particolare, i parametri di riferimento da considerare sono:

- la conducibilità termica;
- la diffusività termica;
- la capacità termica.

La *conducibilità termica* (W/(m K)) esprime il rapporto tra un flusso di calore e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio di calore. La *diffusività termica* (m²/s) esprime il rapporto tra la conducibilità termica e la capacità termica; questo parametro misura l'attitudine di un corpo di trasmettere una variazione di temperatura. La *capacità termica* (J/K) di un corpo è il rapporto fra il calore fornitogli e l'aumento di temperatura che ne è derivato; corrisponde al prodotto della massa unitaria (kg) per il calore specifico (J/(kg K)). Il valore del calore specifico dell'acqua è piuttosto elevato ($c = 4186$ (J/(kg K))), per questo motivo l'acqua è considerato un ottimo stabilizzatore termico: i terreni saturi di acqua, i mari o i laghi si riscaldano molto di meno rispetto ai terreni aridi o ai deserti. Da un punto di vista legato allo sfruttamento della risorsa geotermica, maggiore è la capacità termica specifica dei materiali interessati dallo sfruttamento, maggiore sarà la quantità di calore che questi sono in grado di immagazzinare e successivamente restituire.

La conducibilità e la diffusività termica (tabella 1.2) sono funzione di numerosi fattori, variabili nei terreni e nelle rocce. Nei terreni, i fattori influenzanti sono la porosità, l'umidità e la densità: a parità di porosità, un suolo asciutto è molto meno conduttivo di uno saturo. Nel dimensionamento di sistemi geotermici a cir-

Tabella 1.2. Dati di riferimento delle proprietà termofisiche di terreni e rocce (fonte: Turcotte e Schubert, 2002; L.R. Ingersoll et al., 1954; S. Kavanaugh e K. Rafferty, 1997)

| Tipo di terreno/roccia | Conducibilità termica (W/m K) | Calore specifico (J/kg*K) | Densità (kg/m ³) | Diffusività termica (m ² /giorno) |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|--|
| Ghiaie e sabbie secche | 0.3-0.9 | 800 | 1890 | 0.045 |
| Ghiaie e sabbie umide | 1.3-1.8 | 840 | 2010 | 0.056 |
| Ghiaie e sabbie sature | 1.8-2.4 | 960 | 2100 | 0.078 |
| Argille e limi asciutti | 0.2-1.0 | 840 | 1440 | 0.024 |
| Argille e limi umidi | 1.2-2.3 | 1050 | 2100 | 0.045 |
| Marne umide (senza Qz) | 1.0-1.6 | 879 | 2080-2640 | 0.047-0.056 |
| Marne umide (con Qz) | 1.7-3.1 | 879 | 2080-2640 | 0.084-0.11 |
| Arenarie | 1.5-4.2 | 1005 | 1900-2500 | 0.065-0.11 |
| Calcari | 2.4-3.4 | 920 | 1600-2700 | 0.093-0.13 |
| Dolomiti | 3.2-5 | 879 | 2700-2850 | 0.10-0.21 |
| Gneiss | 2.1-4.2 | 920 | 2600-2850 | 0.084-0.11 |
| Marmi | 2.5-3 | 920 | 2670-2750 | 0.074-0.11 |
| Basalti | 1.3-2.9 | 796 | 2950 | 0.065-0.084 |
| Graniti | 2.4-3.8 | 879 | 2650 | 0.093-0.13 |
| Gabbri | 1.9-4.0 | 753 | 2950 | 0.079-0.14 |
| Dioriti | 2.8-3.6 | 920 | 2800 | 0.065-0.093 |
| Granodioriti | 2.0-3.5 | 879 | 2700 | 0.074-0.12 |

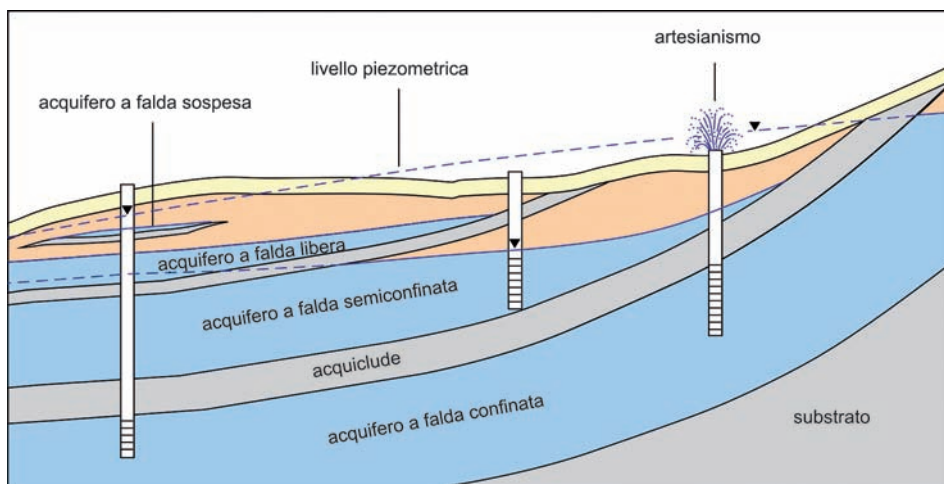


Figura 1.4

Schema concettuale di un acquifero multifalda, costituito da acquiferi a falda confinata, a falda semiconfinata, a falda libera (o freatica) e a falda sospesa. Ogni falda è rappresentata dal proprio livello piezometrico

cuito chiuso, terreni caratterizzati da conducibilità termiche molto basse rendono necessarie lunghezze sensibilmente elevate degli scambiatori, tanto da sconsigliarne un loro utilizzo.

Nelle rocce, i fattori che condizionano i valori di conducibilità termica sono invece la densità e la composizione mineralogica: la conducibilità aumenta all'aumentare della densità e dell'abbondanza del quarzo.

Le proprietà idrauliche e idrodinamiche degli acquiferi sotterranei sono determinanti per stabilire la possibilità di poter usufruire dell'acqua di falda in combinazione con pompe di calore (sistemi GWHP). Inoltre, esse influiscono sull'entità di impatto termico sull'acquifero e sulle interferenze (idrauliche e termiche) che si possono creare durante l'esercizio di campi di sonde verticali e pozzi d'acqua. I parametri idraulici degli acquiferi sono: la porosità, la permeabilità, la conducibilità idraulica, la trasmissività e il coefficiente d'immagazzinamento. I parametri idrodinamici sono: il gradiente idraulico, il regime di flusso (flusso semplice e di Darcy). In generale, nei sistemi a circuito chiuso, la presenza di un flusso di falda acquifera permette un rinnovo dello stock termico attorno agli scambiatori, consentendo un incremento dell'efficienza del sistema complessivo. Nei sistemi a circuito aperto, la possibilità di estrarre acqua da un acquifero va valutata attraverso uno specifico studio idrogeologico che evidenzi le caratteristiche idrogeologiche degli acquiferi presenti in profondità (per esempio, a falda libera, a falda confinata, ecc.) e la profondità degli *acquicludi* (formazioni impermeabili che non permettono il passaggio dell'acqua) e del substrato (si veda figura 1.4). Nella progettazione di sistemi GSHP vanno valutate le caratteristiche geomorfologiche e idrodinamiche degli acquiferi in cui vengono installati. Questi aspetti

hanno delle ricadute pratiche in quanto, per le sonde verticali, ad esempio, va valutata la possibilità che vengano intercettati degli acquiferi in pressione o artesiani che possono determinare delle complicazioni in fase di completamento e grouting. In tal caso, vanno previsti materiali e tecniche di riempimento idonee, oltre a misure atte ad evitare la comunicazione idraulica tra falde acquifere diverse. Di norma, invece, l'utilizzo dell'acqua di falda è limitato agli acquiferi non sfruttati per scopi idropotabili. Le informazioni da reperire sono la soggiacenza, la conducibilità idraulica, il gradiente idraulico e la profondità del tetto e letto degli acquiferi. Tali dati possono essere ricostruiti attraverso la consultazione di stratigrafie di pozzi, sondaggi e di elaborati cartografici (carte piezometriche e di soggiacenza) consultabili presso gli enti quali province, regioni, ARPA.

Infine, altro parametro determinante per il dimensionamento di sistemi GSHP è la temperatura del sottosuolo. In generale, non è possibile fissare una temperatura di riferimento del sottosuolo ad una determinata profondità, essendo questa variabile da luogo a luogo, in funzione delle locali caratteristiche geologiche, idrogeologiche e geotermiche. Inoltre, si consideri che l'Italia è un territorio in cui persiste un'attività geodinamica intensa che provoca una distribuzione piuttosto eterogenea delle anomalie di calore, il che rende ancora più improbabile fissare una temperatura di riferimento. In Pianura Padana, alle profondità medie in cui si installano le sonde geotermiche (80-150 m) le temperature medie di riferimento sono di 12-15 °C (escluse locali anomalie). Ad esempio, alle stesse profondità nella Piana di Pisa, le temperature sono di 18-23 °C per effetto di flussi di calore più elevati. Inoltre, si consideri che, oltre alle locali condizioni geologiche e geodinamiche, il valore della temperatura del sottosuolo nei primi 10 metri è condizionato anche dalle locali condizioni climatiche e dalle oscillazioni di temperatura annuali. In superficie, la temperatura è principalmente determinata dalla radiazione solare, la cui energia prevale nettamente rispetto a quella deri-

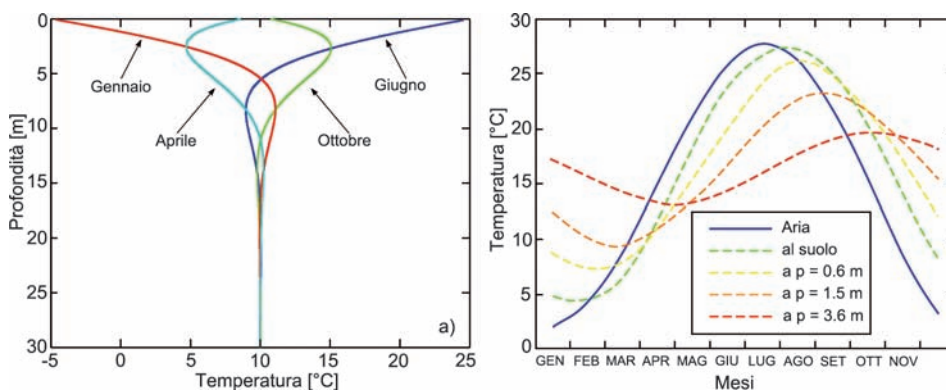


Figura 1.5

Distribuzione della temperatura con la profondità durante quattro mesi dell'anno (a), fluttuazione della temperatura nell'arco di un anno al variare della profondità (b)

vata dal flusso di calore terrestre (1000 W/m^2 della radiazione solare a cielo sereno contro circa 60 mW/m^2 del calore geotermico). Le oscillazioni di temperatura stagionali si ripercuotono attraverso i primi 10-15 m di profondità (figura 1.5), anche se, a circa 4 m da piano campagna, risultano considerevolmente attenuate. Per profondità superiori ai 15 m, la temperatura diviene sostanzialmente stabile per effetto del flusso di calore geotermico. Il vantaggio di un sistema GSHP rispetto alle pompe di calore ad aria risiede proprio nella disponibilità per il primo di una sorgente/serbatoio caratterizzata/o da una temperatura pressoché costante nel tempo. Invece, le oscillazioni termiche stagionali dell'aria comportano prestazioni energetiche medie peggiori per le pompe di calore ad aria rispetto ai sistemi GSHP.

1.6. ASPETTI AMBIENTALI

Pur offrendo indubbi vantaggi dal punto di vista energetico, se installati senza le dovute cautele, i sistemi GSHP possono potenzialmente danneggiare l'integrità qualitativa delle falde idriche sotterranee, sia nella fase di messa in opera che in quella di esercizio (figura 1.6).

I rischi specifici connessi all'installazione di sonde verticali sono:

- corto-circuitazione tra falde sovrapposte durante la terebrazione e l'esercizio, con rischio di contaminazione di una falda da parte dell'altra;
- rilascio del fluido anticongelante che circola nella sonda, in caso di rottura accidentale;
- effetto barriera sul deflusso naturale delle acque del sottosuolo nel caso dei campi sonde più grandi.

I rischi diretti di contaminazione del sottosuolo ad opera di fluidi anticongelanti sono connessi alla presenza di zone di instabilità, al rigonfiamento del terreno o

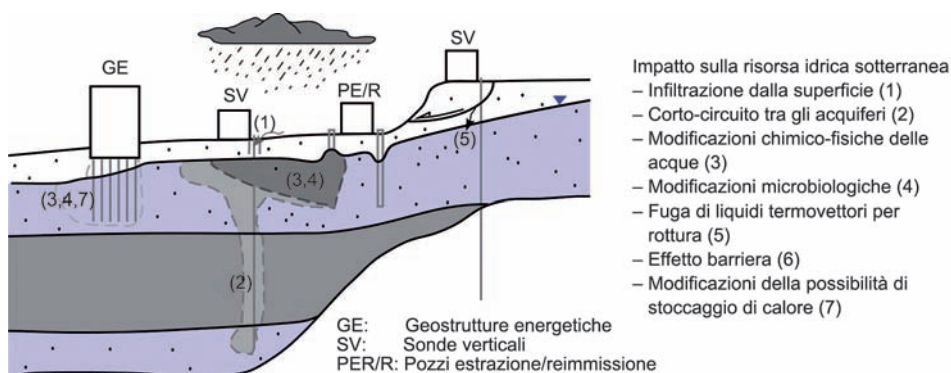


Figura 1.6

Schema descrittivo delle possibili cause di inquinamento degli acquiferi sotterranei

alla rottura accidentale di una sonda. In linea generale, è sconsigliabile procedere all'installazione di sonde verticali in siti contaminati, in cui la possibile perforazione di barriere impermeabili espone comunque alla possibilità di contaminazione di altri livelli acquiferi. Il fluido termovettore nei sistemi a circuito chiuso è costituito da acqua pura solo nei casi in cui la temperatura del fluido stesso si mantiene al di sopra di 0 °C (anche durante il picco di freddo invernale). Tuttavia, spesso è più conveniente dimensionare un sistema in modo tale che la temperatura in uscita dalla pompa di calore sia di pochi gradi inferiori allo 0 °C. Per questo motivo, per evitare fenomeni di congelamento e rigonfiamento nella porzione circostante il pozzo, è necessario utilizzare soluzioni anticongelanti. Tra quelle correntemente utilizzate vi sono il glicole etilenico, il glicole propilenico, il cloruro di potassio e il cloruro di calcio. Mentre il glicole etilenico ha comunque un certo grado di tossicità, il glicole propilenico invece non è tossico (viene utilizzato anche nell'industria alimentare) e non presenta altre criticità. Le soluzioni saline sono non tossiche e non infiammabili, sebbene presentino dei problemi legati alla corrosione. L'organismo internazionale di riferimento per i sistemi a pompe di calore geotermiche (IGSHPA) raccomanda l'utilizzo unicamente di acqua potabile, soluzioni di acqua e acetato di potassio o glicole propilenico. Gli enti federali svizzeri (BUWAL e BEW) e il regolamento tedesco relativo alle sostanze pericolose per la qualità dell'acqua (VwVwS, 1999) designano invece come idonei per l'utilizzo nei sistemi di scambio geotermico i seguenti anticongelanti: il glicole etilenico, il glicole propilenico, il cloruro di calcio e l'alcool etilico.

Per i sistemi ad acqua di falda, i rischi sono particolarmente riferiti al caso in cui si proceda alla reimmissione in falda dell'acqua prelevata:

- corto-circuitazione tra falde sovrapposte se non si è proceduto ad adeguata cementazione dei tratti di pozzo in corrispondenza dei livelli meno permeabili;
- variazioni significative nell'attività biologica e microbiologica delle acque sotterranee indotte dalla variazione di temperatura dell'acqua di reimmissione;
- variazioni quali/quantitative delle specie chimiche disciolte determinata dalla variazione termica;
- alterazioni nella dinamiche delle falde, specie a fronte di prelievi non accompagnati da reimmissione nella stessa falda acquifera;
- subsidenza del sottosuolo dovuta al prelievo di acqua in falda e eventuale risalita a piano campagna dell'acqua di reimmissione.

1.7. VANTAGGI E SVANTAGGI DEI SISTEMI GSHP

I principali vantaggi derivanti dell'utilizzo di sistemi GSHP sono così riassumibili:

- sicurezza. Non è previsto l'utilizzo di combustibili o altro materiale infiammabile;

- semplicità. L'impianto geotermico può essere progettato sia per il riscaldamento che per il raffrescamento con l'utilizzo di una sola macchina;
- basso impatto ambientale. I sistemi GSHP sono tra i più *environmentally friendly* tra gli impianti di climatizzazione;
- bassi costi di esercizio. La maggiore efficienza dei sistemi geotermici rispetto ai sistemi tradizionali consente di ridurre notevolmente i costi di gestione;
- elevata efficienza. Particolarmente elevata e stabile per i sistemi ad acqua di falda, mediamente elevata e meno stabile per i sistemi a sonde verticali;
- acqua sanitaria. Possibilità di coprire gratuitamente, parzialmente o totalmente, il fabbisogno di acqua sanitaria;
- durata impianto. Più elevata (circa 20 anni la pompa di calore) rispetto ai sistemi di climatizzazione tradizionali;
- impatto estetico. Minore rispetto ad altri sistemi vista l'assenza di un apparato da posizionare all'esterno.

Gli svantaggi derivanti dall'utilizzo di questi sistemi sono:

- costo impianto. I costi di installazione sono maggiori rispetto agli impianti tradizionali, particolarmente nel caso dei sistemi a sonde verticali;
- ostacoli burocratici. La normativa e gli iter procedurali richiesti per l'autorizzazione all'installazione degli impianti GSHP impongono dei limiti concreti alla crescita di questo settore;
- impianti di distribuzione. L'efficienza elevata dei sistemi GSHP è garantita solo nel caso di utilizzo di impianti di distribuzione *a bassa temperatura* quali pannelli radianti (35-40 °C) o fancoils idronici (50 °C);
- superficie a disposizione. La superficie a disposizione deve essere tale da consentire l'installazione di sonde verticali spaziate tra loro di almeno 8 m e di pozzi d'acqua di prelievo (e in tali casi anche di restituzione in falda).

1.8. MERCATO DELLE GSHP IN EUROPA E IN ITALIA

Negli ultimi anni, le pompe di calore geotermiche hanno gradualmente consolidato la loro credibilità come una tecnologia confortevole, conveniente e sostenibile dal punto di vista ambientale. Esse offrono una prospettiva concreta e accessibile per un abbattimento delle emissioni di gas serra in tempi medio-brevi.

La *Swedish Heat Pump Association* (2008), considerando un modello degli edifici presenti nei paesi dell'Unione Europea a 25 e definendo per il 2020 un obiettivo di riduzione delle emissioni del 20% rispetto a quelle del 1990, stima che l'introduzione di pompe di calore nel 20% degli edifici contribuirebbe da sola a un raggiungimento dell'8% dell'obiettivo di riduzione.

Uno studio di EurObserv'ER (2009) stima che il mercato europeo dei sistemi GSHP sia in forte crescita, con 100000 unità di pompe di calore geotermiche

installate negli ultimi tre anni. Va comunque precisato che in Europa centrale i sistemi GSHP sono principalmente utilizzati a scopo di riscaldamento. Tradizionalmente, il mercato più consolidato delle pompe di calore geotermiche è quello svedese, con quasi 321000 unità installate (circa il 40% delle installazioni di tutta Europa). Altri mercati molto sviluppati sono quello della Germania, Inghilterra, Finlandia e Olanda. La Francia e l’Austria registrano invece solo un lento incremento. La Svizzera è tra i paesi con la densità di sonde geotermiche maggiore in Europa, con oltre 40000 unità installate. Alla fine del 2008, la stima del numero di unità totali installate in Europa è di 782461, per una potenza termica complessiva di 8920 MWt (figura 1.7).

In Italia, nel 2008 il numero stimato di installazioni di sistemi GSHP è di 7500 unità, per una potenza complessiva di 150 MWt (EurObserv’ER, 2009). Si riscontra un interesse crescente del mercato italiano in questo ambito d’applica-

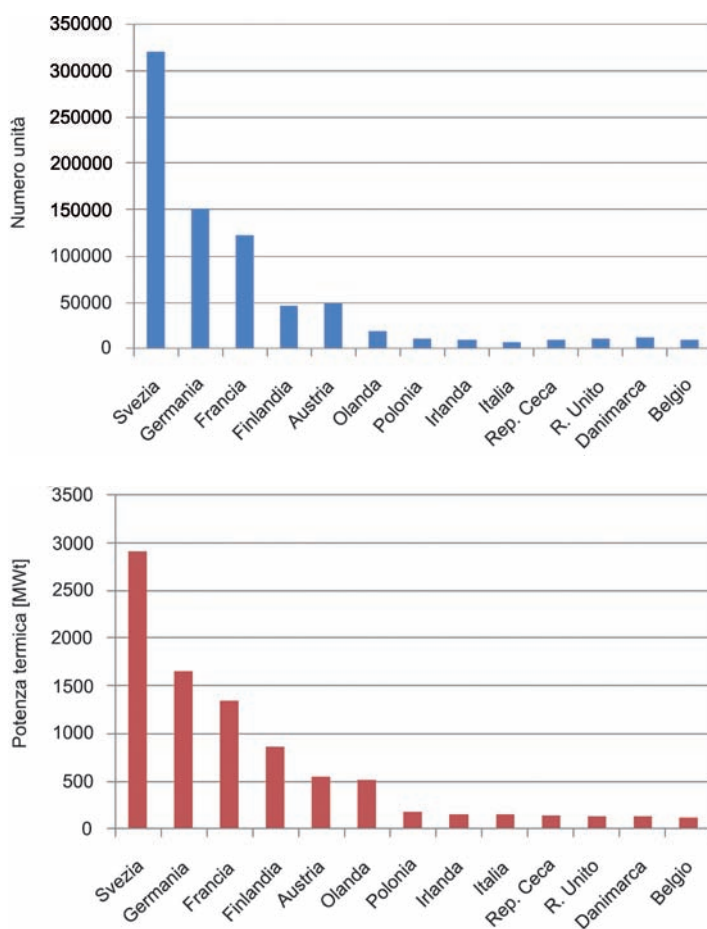


Figura 1.7
Stime relative al numero di installazioni (alto) e alla potenza installata complessiva (MWt) (basso) delle pompe di calore geotermiche al 2008 (fonte: EurObserv’ER, 2009)

zione, sebbene le pompe di calore ad aria costituiscano ancora l'opzione preferita. Secondo uno studio dell'EHPA (*European Heat Pump Association*), nel 2007 la percentuale di pompe di calore vendute in Italia è stata di circa 14% per quelle geotermiche contro circa 86% di quelle ad aria; se si confrontano questi dati, in Germania la percentuale maggiore è stata di pompe di calore geotermiche. Va ribadito che, in Italia, un freno significativo alla crescita del mercato GSHP è rappresentato dall'assenza sia di una normativa nazionale specifica per questi sistemi sia di schemi d'incentivazione adeguati.