

Energia Geotermica

Tra le fonti di energia rinnovabile l'energia geotermica:

1. ha la maggior densità di potenza
2. non ha problemi di intermittenza
3. è economicamente competitiva rispetto alle tradizionali risorse di origine fossile.



Campo geotermico di Larderello (Pi) in Toscana

Generazione per via geotermica in altri paesi (elevata attività vulcanica):

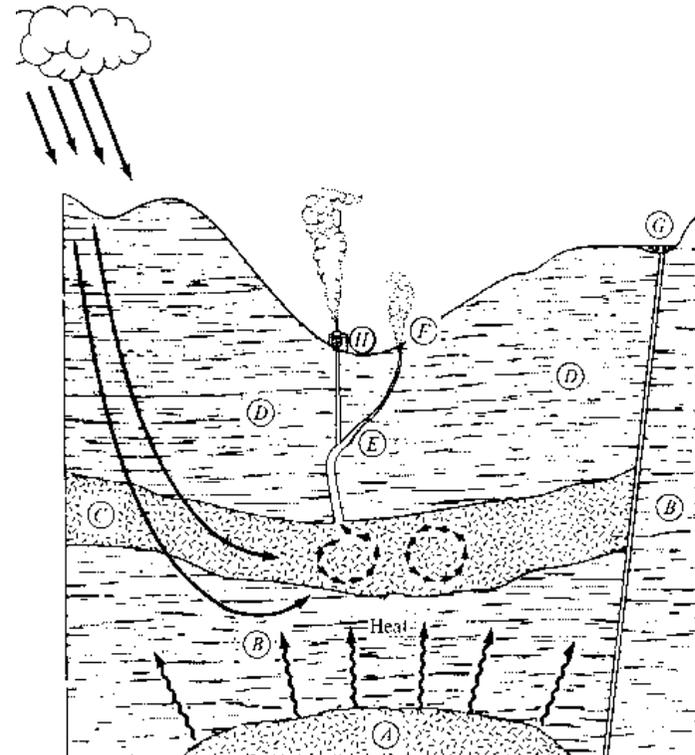
1. Stati Uniti
2. Giappone
3. Filippine
4. Nuova Zelanda
5. Islanda

L'Italia pur avendo aperto la strada ha limitate risorse geotermiche.

TIPOLOGIA DELLE RISORSE GEOTERMICHE

Rappresentazione schematica di un campo geotermico

- A. magma
- B. rocce ignee
- C. strato permeabile e ivi si accumula per la presenza di uno
- D. strato roccioso impermeabile
- E. fessure
- F. fumarole e geysers o
- G. pozze calde
- H. pozzo di risalita del vapore.



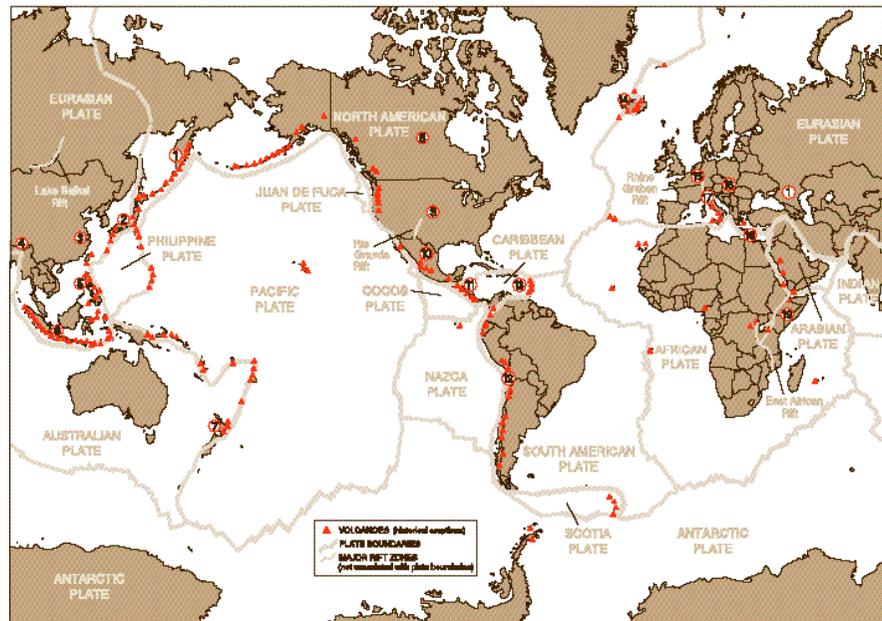
Tipi di sorgenti geotermiche

1) IDROTERMICHE

- le rocce ignee intercettano una vena d' acqua
- attualmente le uniche utilizzate su scala industriale

Si dividono in:

1. sorgenti a vapore dominante
vapore secco a circa 200°C e 8 bar
2. sorgenti ad acqua dominante
acqua in pressione che giunge in superficie come miscela bifasica a circa 175-315°C



Distribuzione delle risorse idrotermiche nel mondo

Tipi di sorgenti geotermiche

2) **GEOPRESSURIZZATE**

- riserve d' acqua sotterranee riscaldate dalla vicinanza delle rocce ignee
- profondità fino a 9000 m e pressioni elevatissime (oltre 1000 bar)
- acqua in genere a temperatura di circa 160°C
- salinità elevata (4-10%) saturata da metano (CH₄)

3) **SORGENTI PETROTERMICHE (HDR Hot Dry Rock)**

- rocce ignee che non intercettano nessuna vena fluida
- si hanno solamente rocce calde a 150-290°C
- modeste profondità
- caratterizzate da bassi coefficienti di scambio termico
- risorse geotermiche più diffuse.

Per poter utilizzare tale calore tramite un fluido di lavoro ad esempio acqua, occorre rendere permeabile la roccia ed aumentarne la superficie di scambio, tali effetti possono essere realizzati fratturando la roccia con iniezione di acqua in pressione o con esplosioni nucleari.

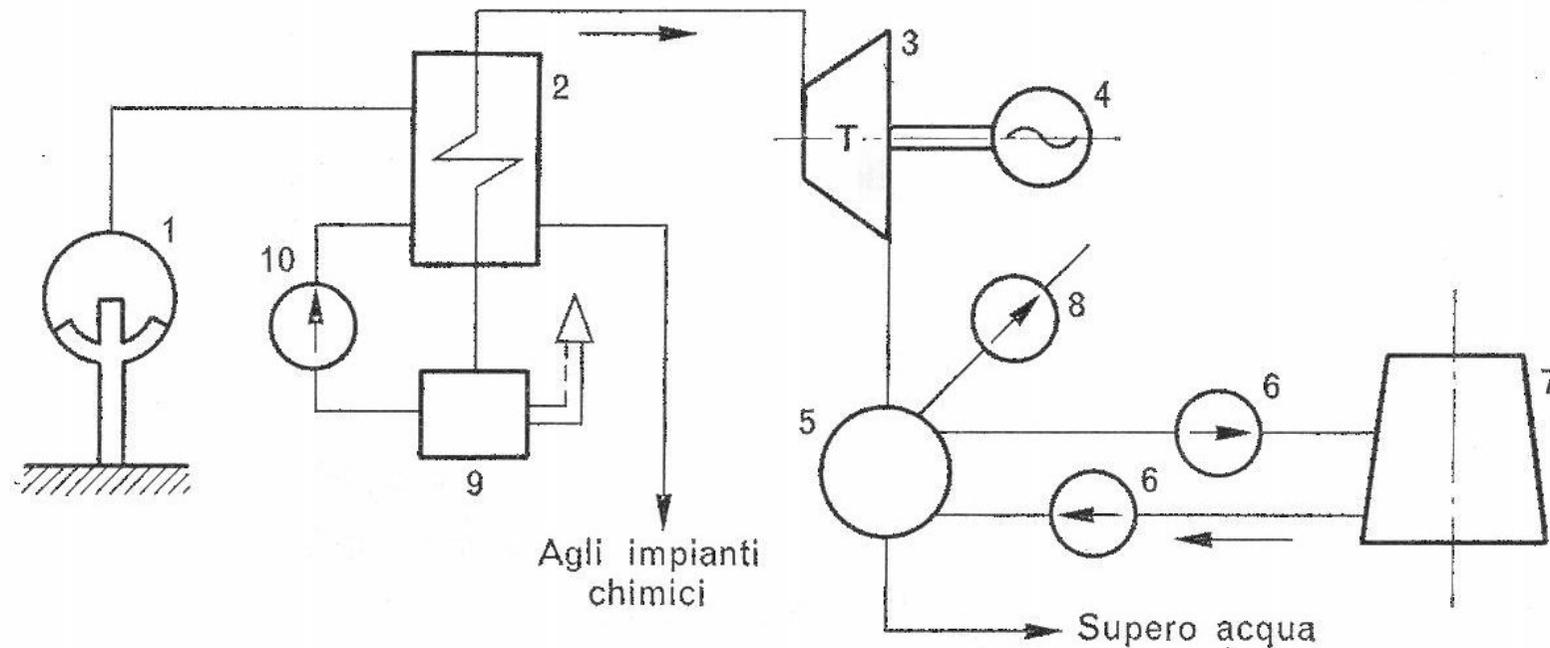
Problemi connessi allo sfruttamento dell' energia geotermica:
presenza nel fluido geotermico di sali, solidi in sospensione e gas incondensabili.

1.vapore	1.92%
1.CO2	1.7,8%
1.H3BO3	1.0,08%
1.HCl	1.0,05%
1.H2S	1.0,04%
1.NH3	1.0,02%
1.Hg	1.0,01%

Composizione media del giacimento del Mt. Amiata (Pi):

1. emissione di gas
2. fenomeni sismici e di subsidenza (reiniezioni del fluido utilizzato)
3. impatto visuale delle tubazioni di adduzione e scarico
4. impatto acustico prodotto dai separatori e dagli scarichi

Sistemi a vapore dominante



1, soffione; 2, scambiatore/generatore di vapore; 3, turbina; 4, alternatore; 5, condensatore; 6, pompa condensato; 7, torre di refrigerazione; 8, pompa d'aria; 9, separatore di gas; 10, pompa.

Schema di impianto a vapore dominante con eiettore di estrazione.

Sistemi a vapore dominante

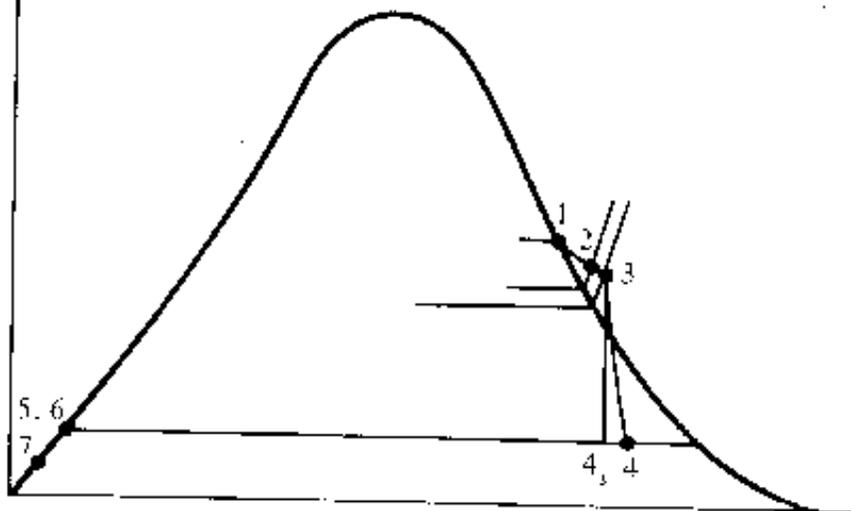
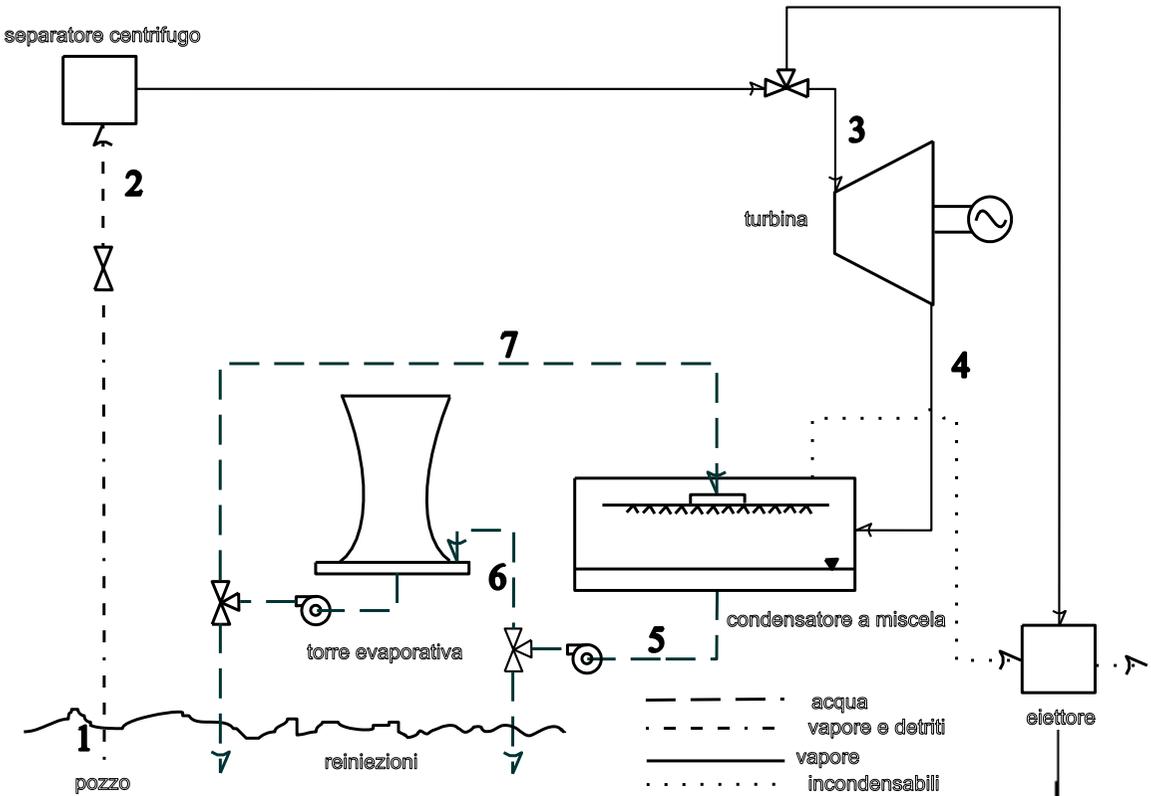
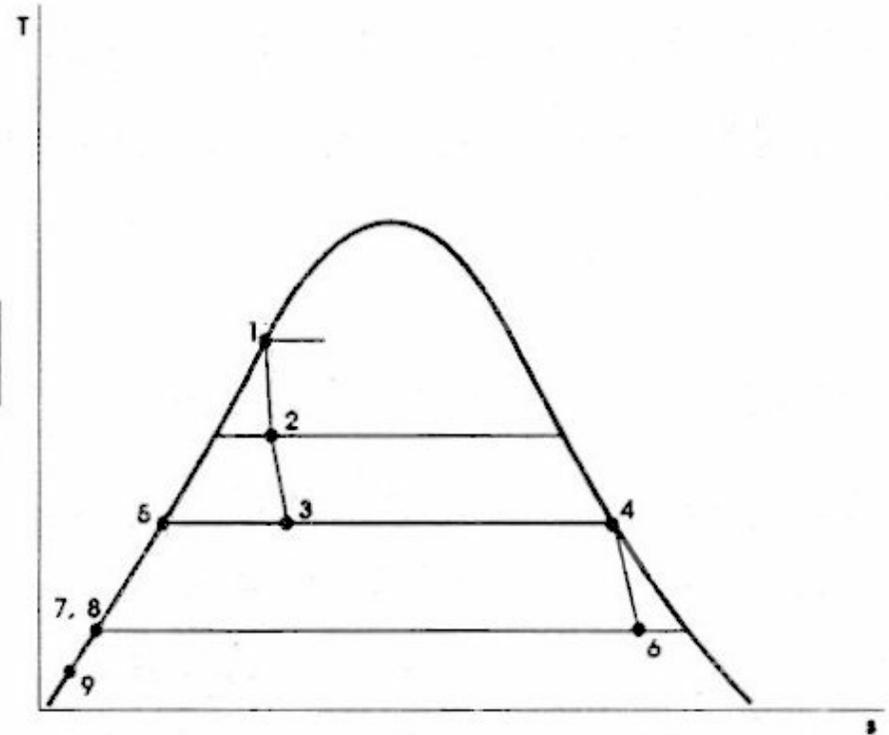
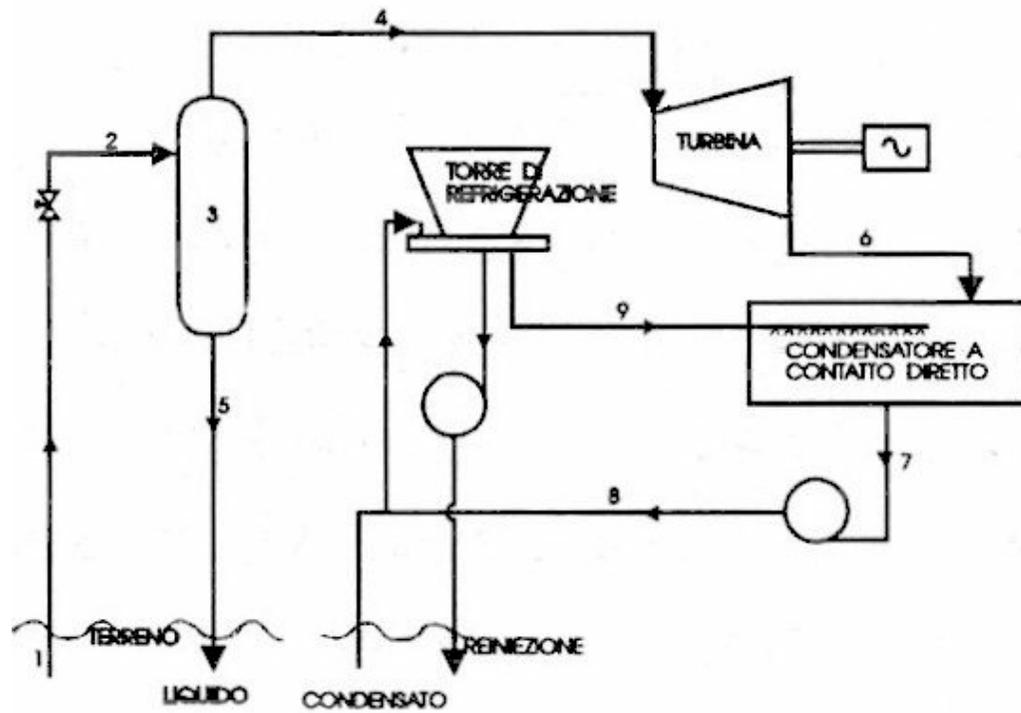
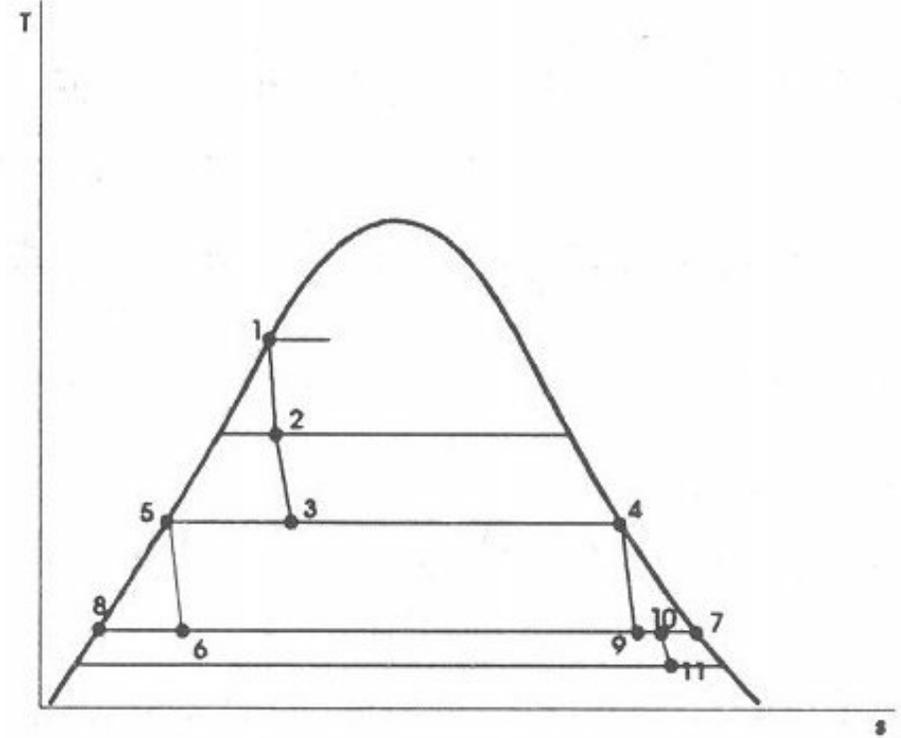
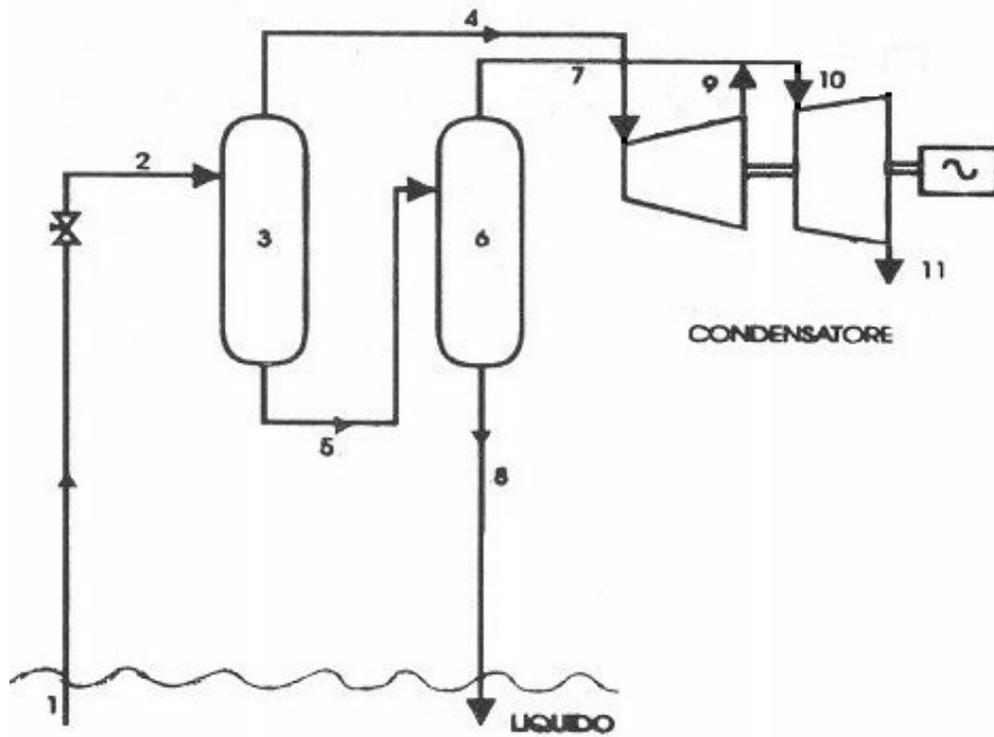


Diagramma T-s relativo ad un impianto a vapore dominante

Sistemi ad acqua dominante: Impianti a singolo flash



Sistemi ad acqua dominante: Impianti a doppio flash

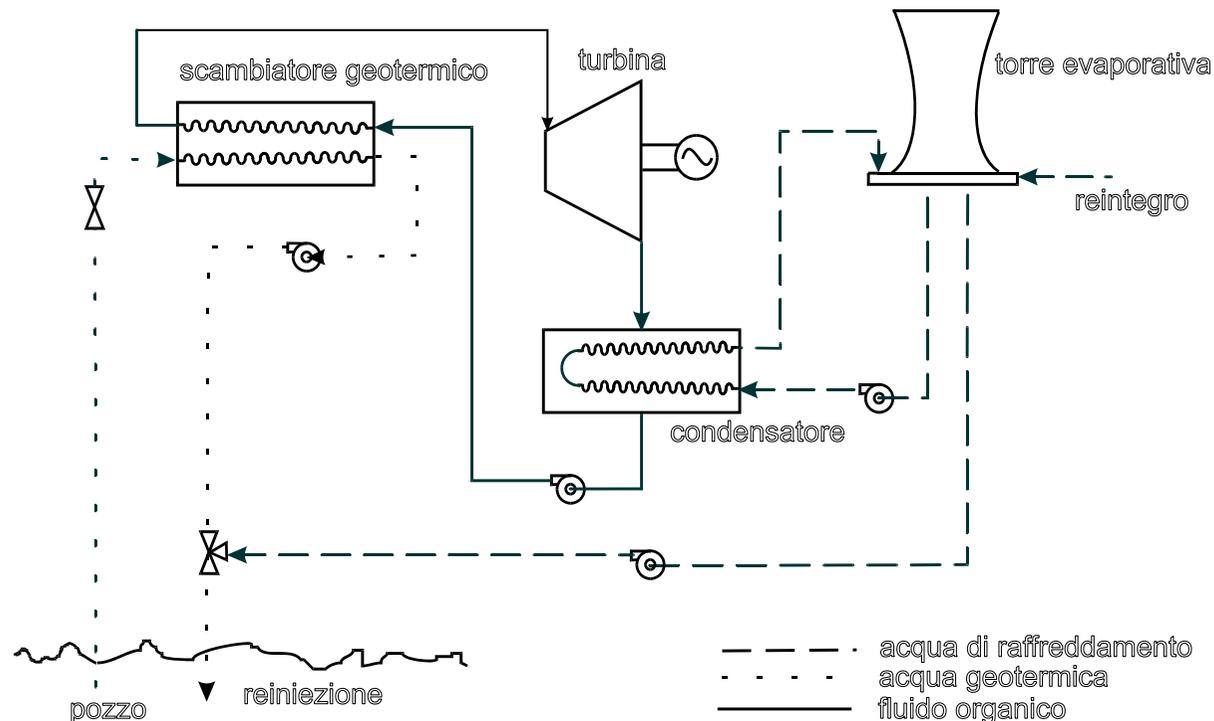


Impianti a ciclo binario

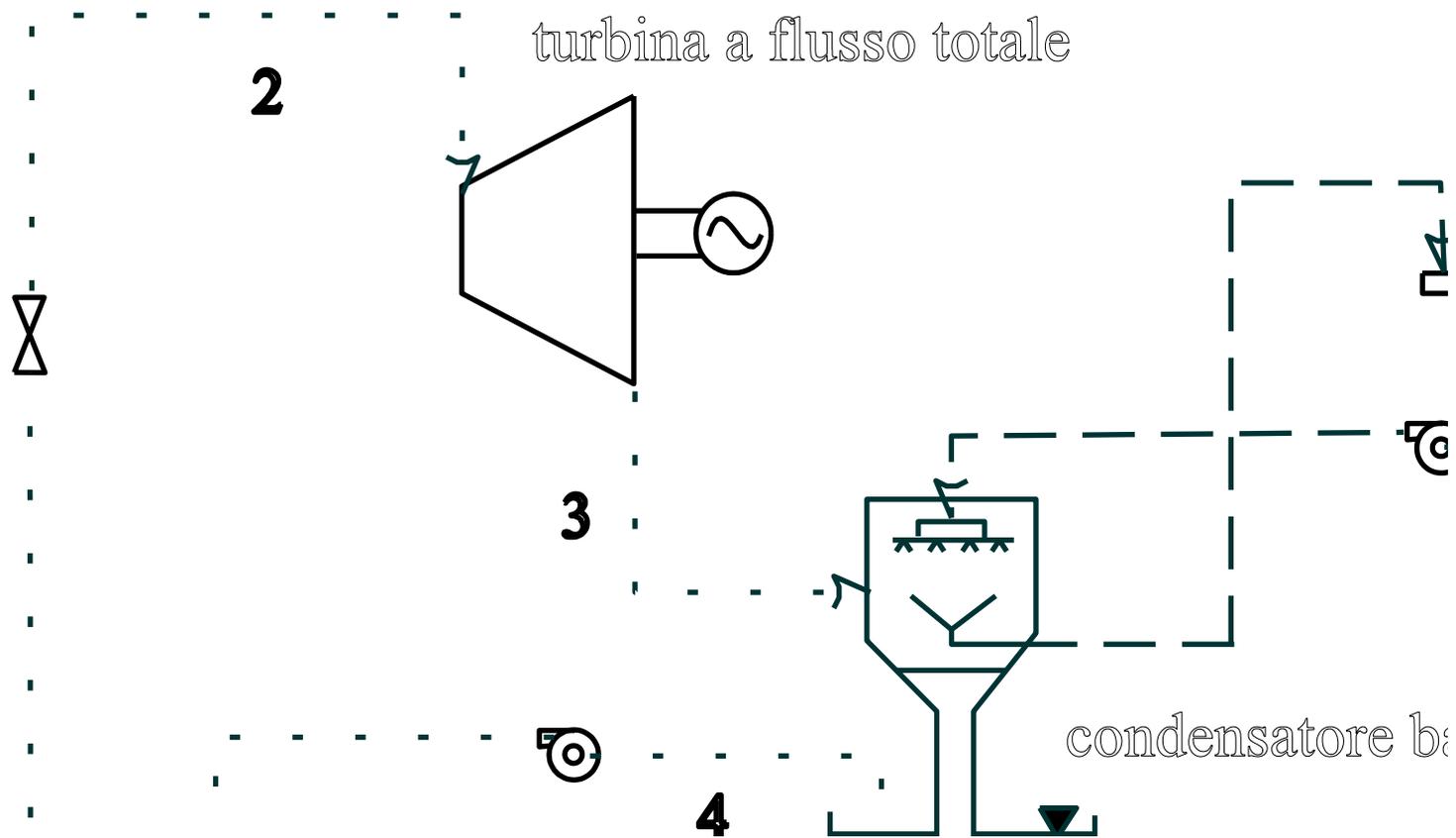
Circa il 50% delle risorse idrotermiche è costituito da acqua ad una temperatura compresa fra i 150°C ed i 200°C.

Con un tale range di temperatura, i processi di laminazione risultano in volumi specifici molto elevati ed in bassi rendimenti di ciclo.

Utilizzando invece il fluido geotermico solo come sorgente di calore, ed utilizzando un fluido bassobollente in un ciclo chiuso, è possibile ottenere rendimenti più elevati e limitare i problemi di corrosione al solo scambiatore di calore.



Impianti a flusso totale



Impianti a flusso totale

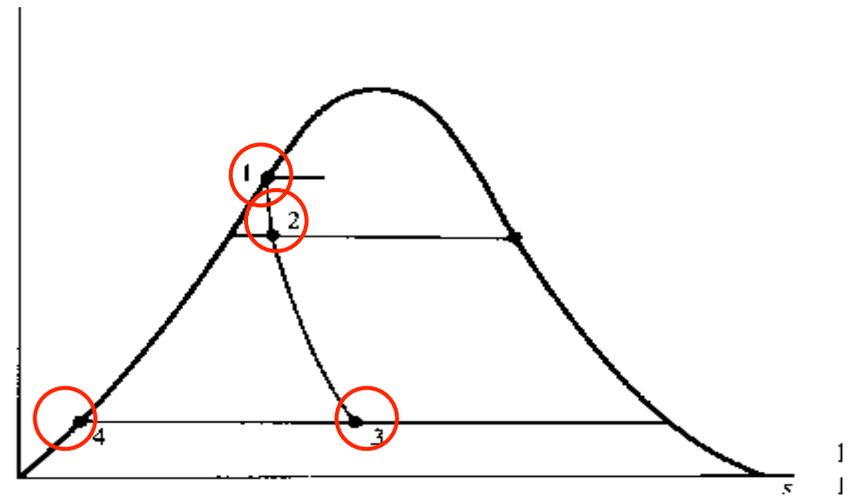
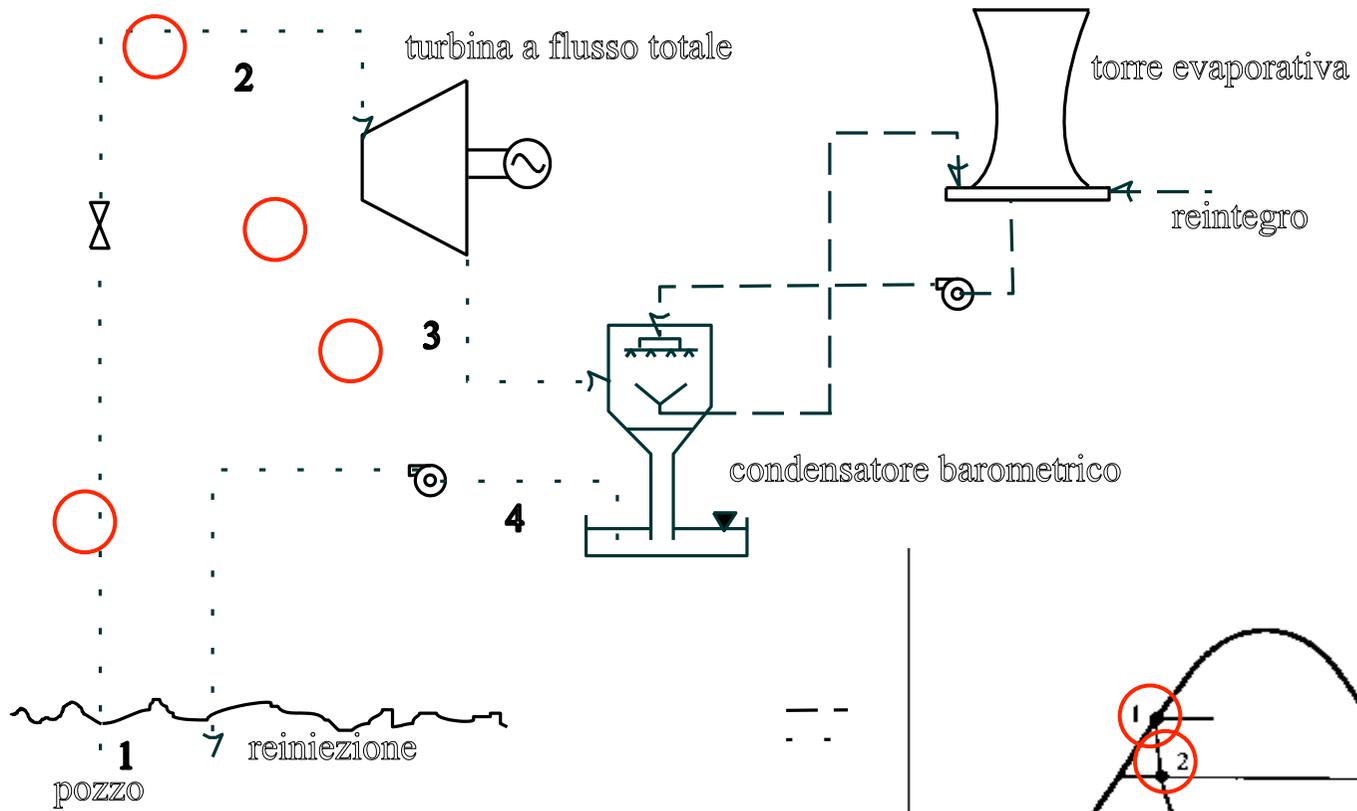
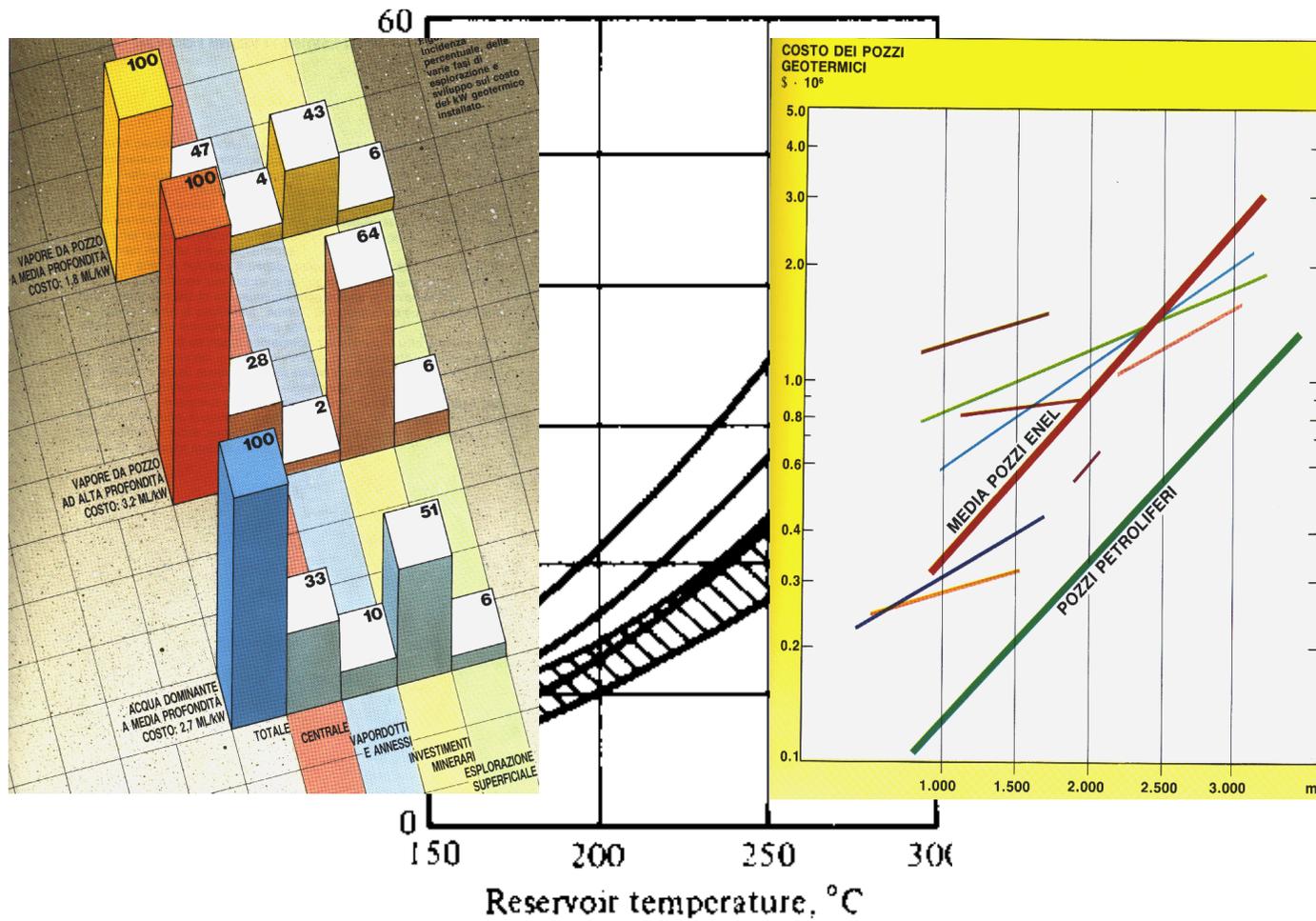


Diagramma T-s relativo ad un impianto a flusso totale

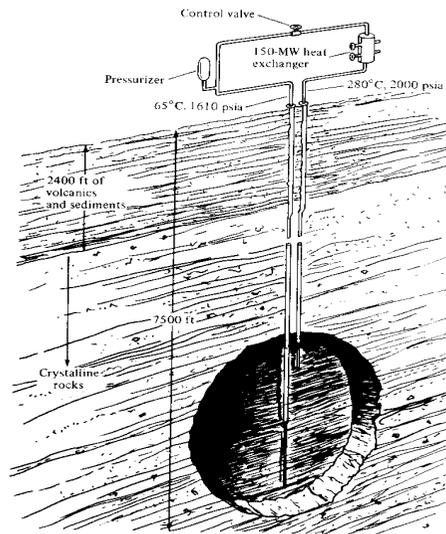


Potenza specifica all' unità di massa in funzione della temperatura della sorgente geotermica per i vari sistemi impiantistici ad acqua dominante.

Sistemi Petrotermici

1. Costi di messa in opera notevoli
in particolare per la trivellazione (due pozzi)
2. Rocce più dure ed ad una maggiore profondità
3. A tali spese si sommano quelle necessarie a fratturare la roccia.

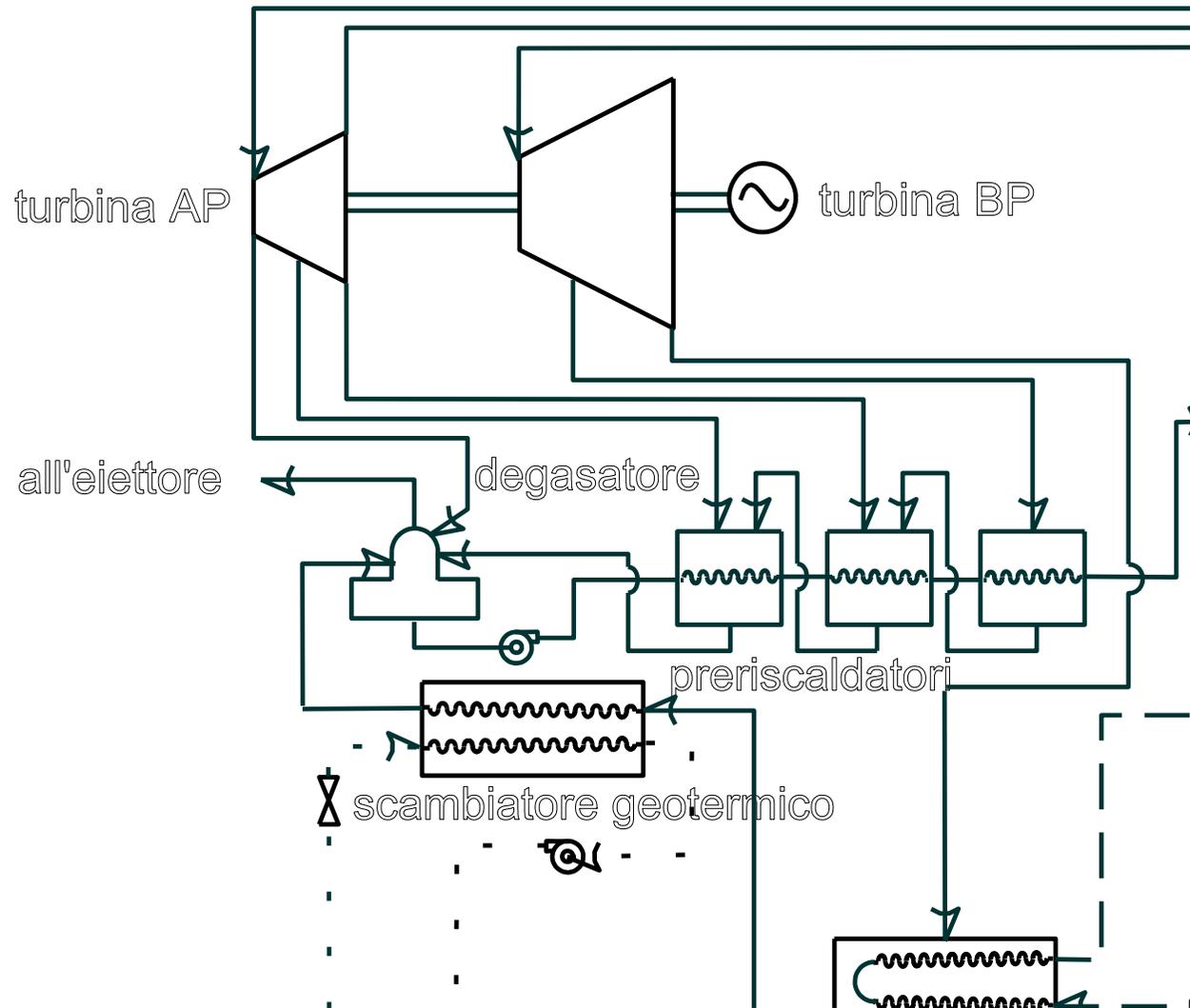
La fratturazione dovrebbe comunque procedere naturalmente mano a mano che la sorgente termica viene sfruttata; i gradienti termici creati artificialmente con la fratturazione, producono tensioni nelle rocce sane che dovrebbero essere sufficienti a propagare la frattura, creando così percorsi nuovi per l'acqua iniettata.



Schema di principio di una centrale petrotermica

Sistemi ibridi geotermico-fossile

Sistemi ibridi a preriscaldamento geotermico



Sistemi ibridi geotermico-fossile

Sistemi ibridi a surriscaldamento fossile

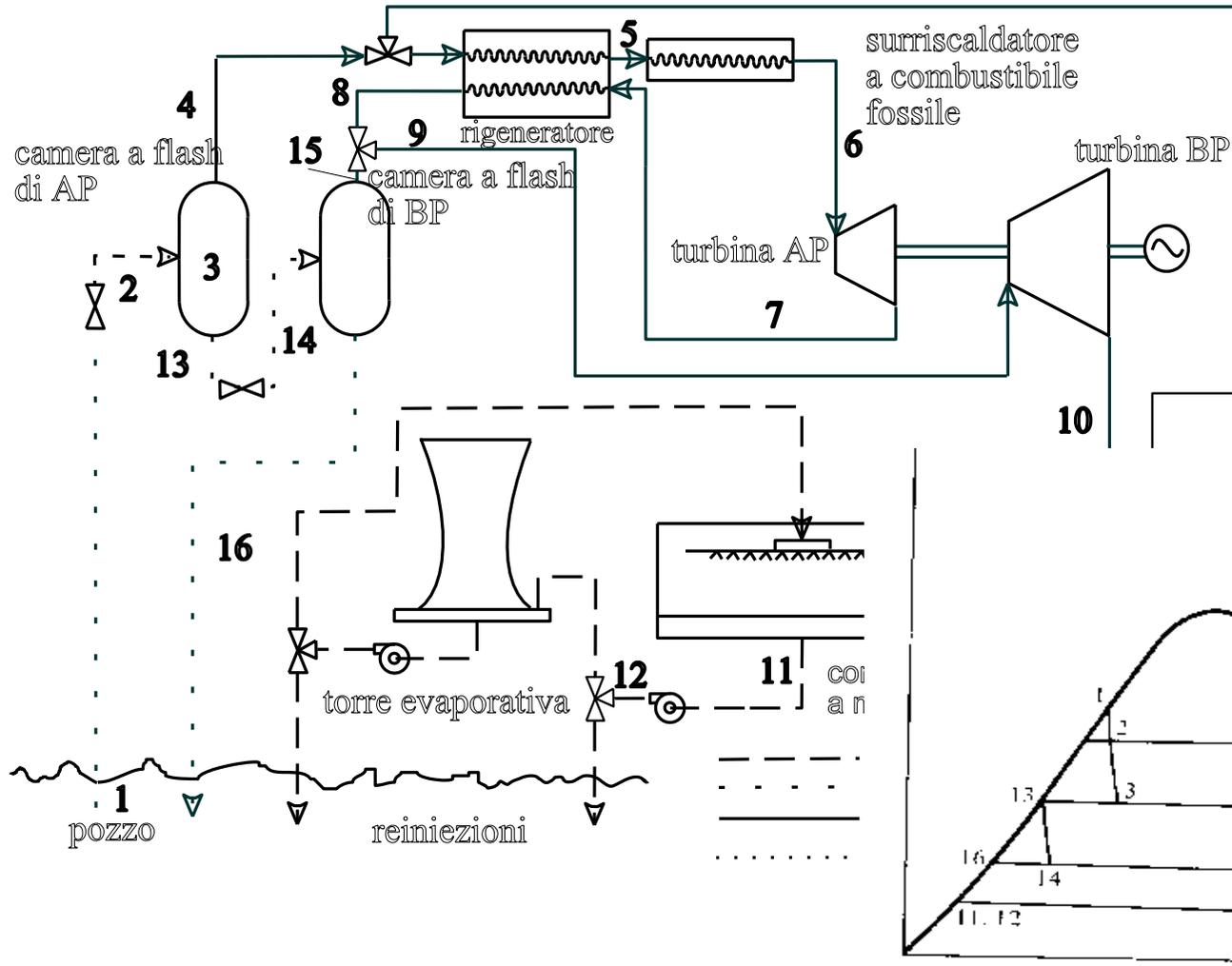
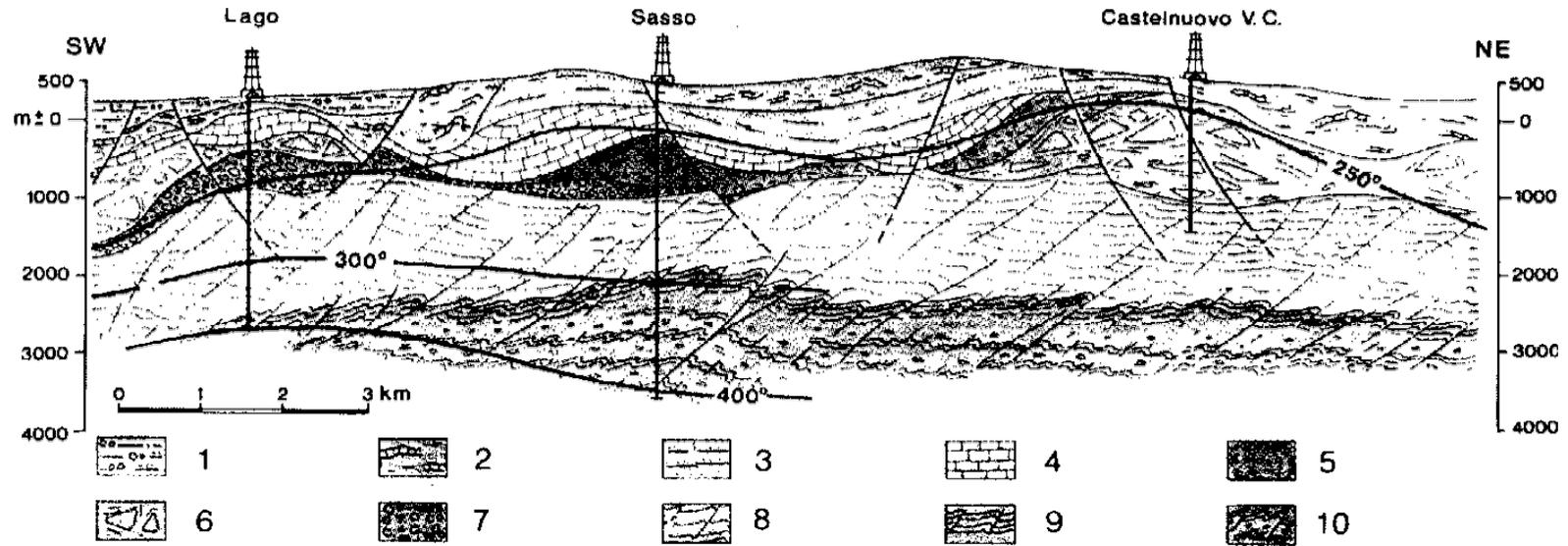
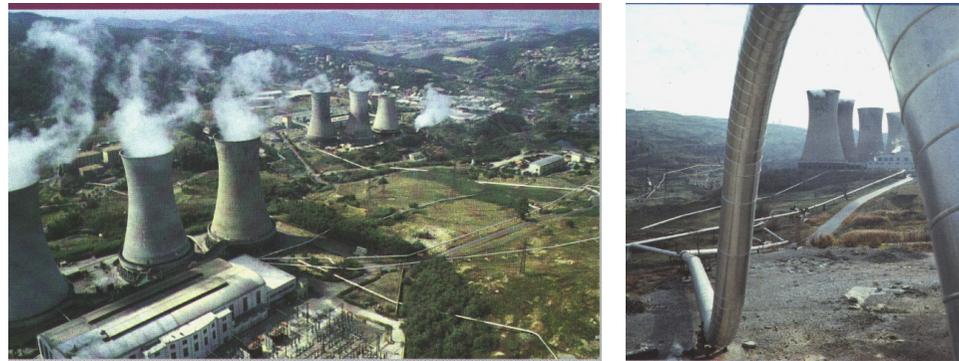


Diagramma T-s per un impianto binario a surriscaldamento fossile

Il nucleo geotermoelettrico di Larderello



Sezione geologica del giacimento di Larderello

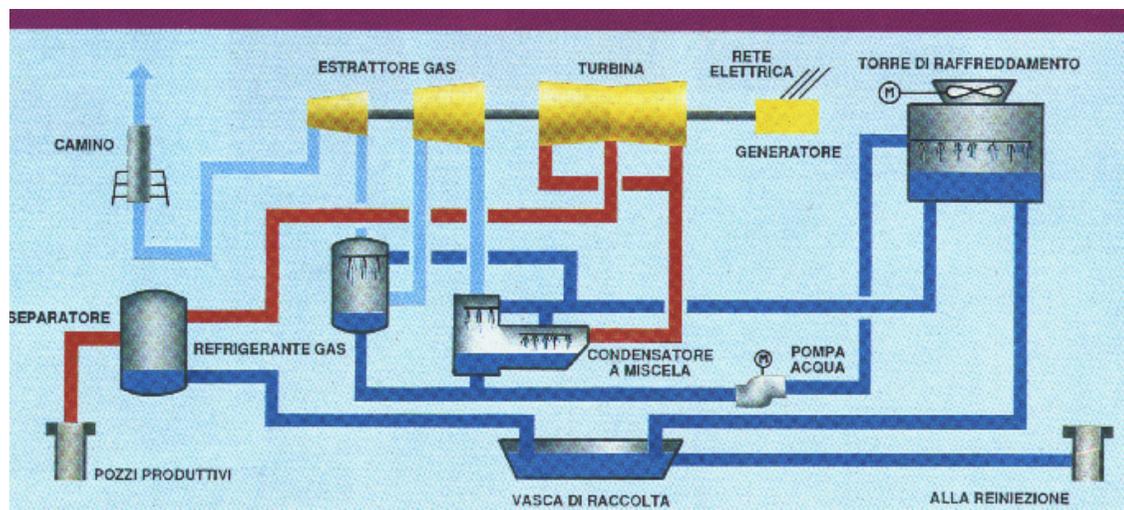


Particolare del vaporedotto di adduzione alla centrale di Larderello e vista aerea della centrale di Larderello

Centrale di Vallesecolo



Vista della centrale di Vallesecolo



Schema della centrale di Vallesecolo

Pompe di calore geotermiche

Diffusione degli impianti a pompa di calore geotermica

I sistemi a pompa di calore geotermica hanno origini storiche in due zone ben precise e nascono con funzioni distinte:

1. zona meridionale degli Stati Uniti (in particolare in Texas) dove venivano impiegati quasi esclusivamente per la climatizzazione estiva. Si usava come fluido termovettore acqua semplice;
2. Canada e zona settentrionale degli Stati Uniti ove l'impiego era limitato al riscaldamento invernale. Si utilizzava come fluido termovettore acqua e glicole etilenico;
3. in Europa la situazione si differenzia da paese a paese e dipende fortemente dalle politiche locali, dalle situazioni energetiche, dalle varietà climatiche, dalla cultura più o meno ambientalista.

Maggiore diffusione si è avuta in Svizzera, Austria, Germania, Svezia, mentre in Italia i pochi impianti presenti sono concentrati a ridosso della zona alpina e sono ad utilizzo prevalentemente invernale.

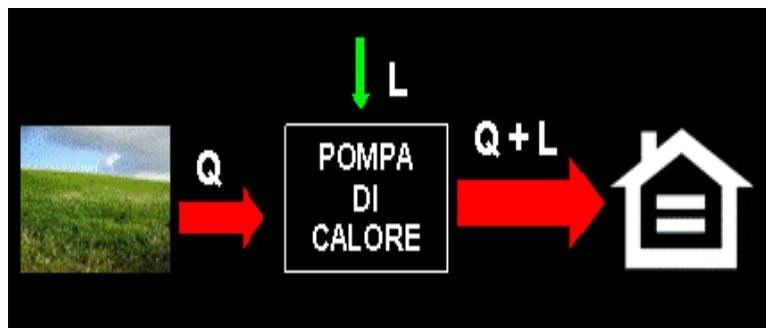
Pompe di calore geotermiche

Paese	Numero di sistemi	Incremento annuo	Potenzialità [MW_{termici}]
Austria 1996	13'000	1'600	-
Germania 1995	14'000 – 22'000	2'000	240 - 450
Paesi bassi 1997	900	-	-
Svezia 1998	55'000	-	330
Svizzera 1998	> 20'000	-	300
TOTALE EUROPA (dati alla fine del 1998)	100'000 – 120'000	-	1'300

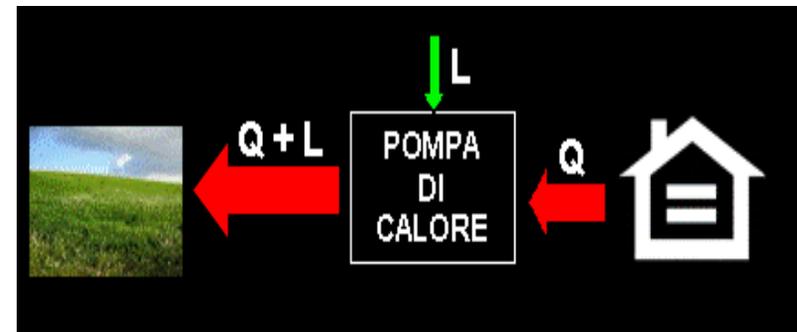
Diffusione di impianti geotermici.

Pompe di calore geotermiche

- Funzionamento invernale



- Funzionamento estivo



Nel caso di pompe di calore geotermiche
AMBIENTE = TERRENO

$$T_{\text{terreno}} > T_{\text{ambiente}} \text{ (inverno)}$$

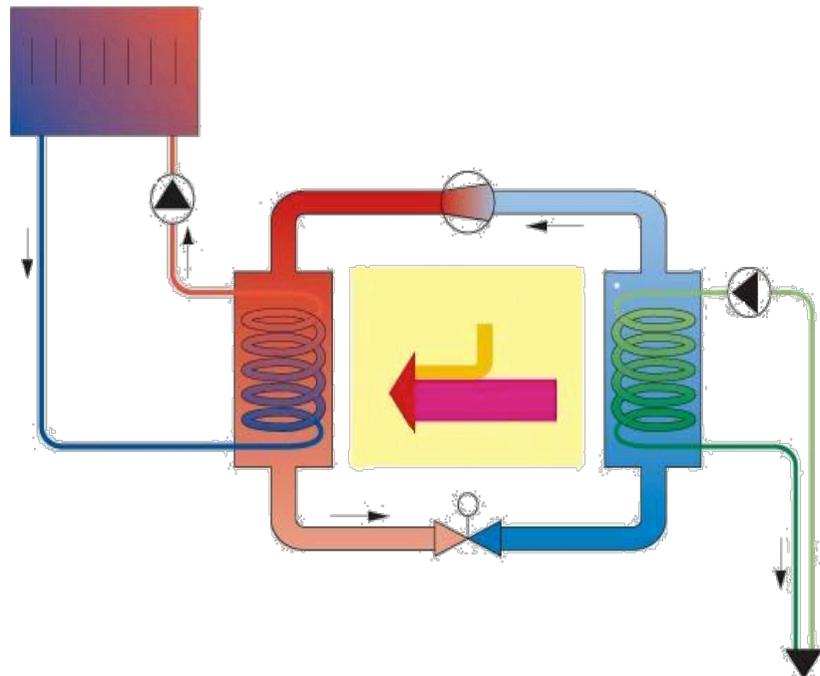
$$T_{\text{terreno}} < T_{\text{ambiente}} \text{ (estate)}$$

- COP > 2,5 - 3 (pompa di calore convenzionale);
COP > 4 - 5 (pompa di calore geotermica);

Principio di funzionamento

Date due sorgenti di calore A e B rispettivamente a temperatura T_A e T_B , con $T_A > T_B$; una pompa di calore rende possibile il passaggio di calore da B ad A. Poiché si tratta di un processo innaturale, si rende necessario un fenomeno di compenso che consiste nella degradazione di una fonte energetica esterna. Il funzionamento di una pompa di calore è comunemente associato alla trasformazione di lavoro in calore, o alla cessione di calore ad alta temperatura ad una sorgente a temperatura minore.

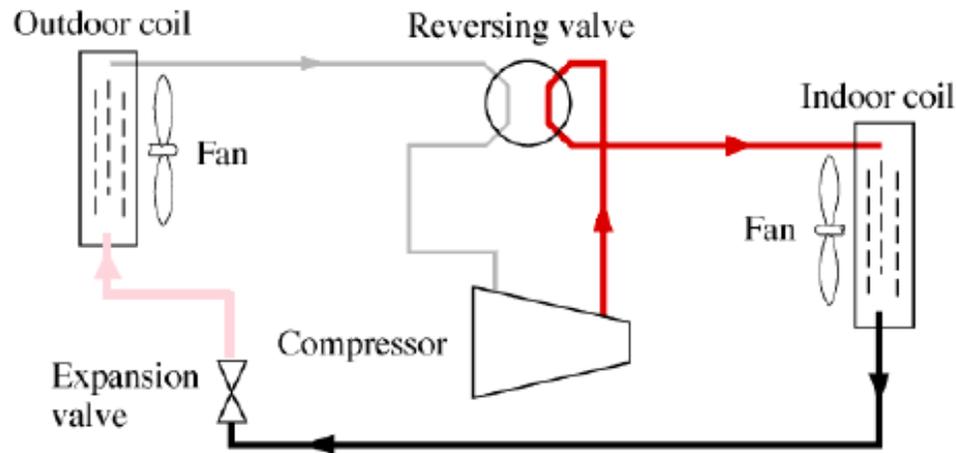
1. Nel primo caso si parla di **pompe di calore a compressione**.
2. Nel secondo caso si parla di **pompe di calore ad assorbimento**.



Schema di funzionamento di una pompa di calore a compressione.

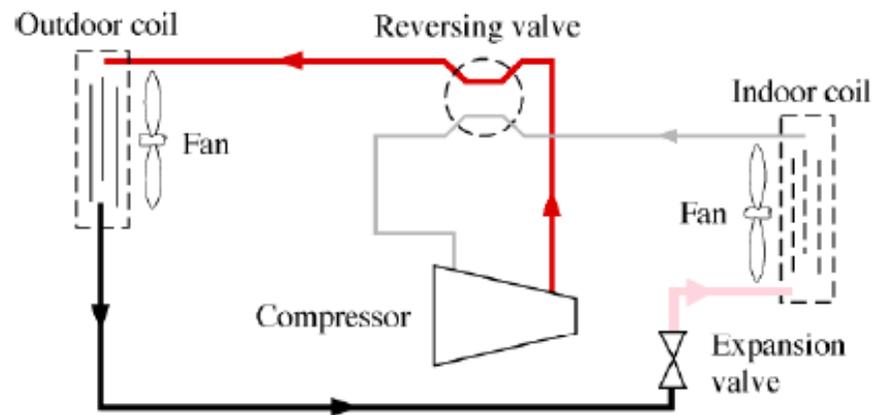
Pompa di calore estate/inverno

HEAT PUMP OPERATION – HEATING MODE

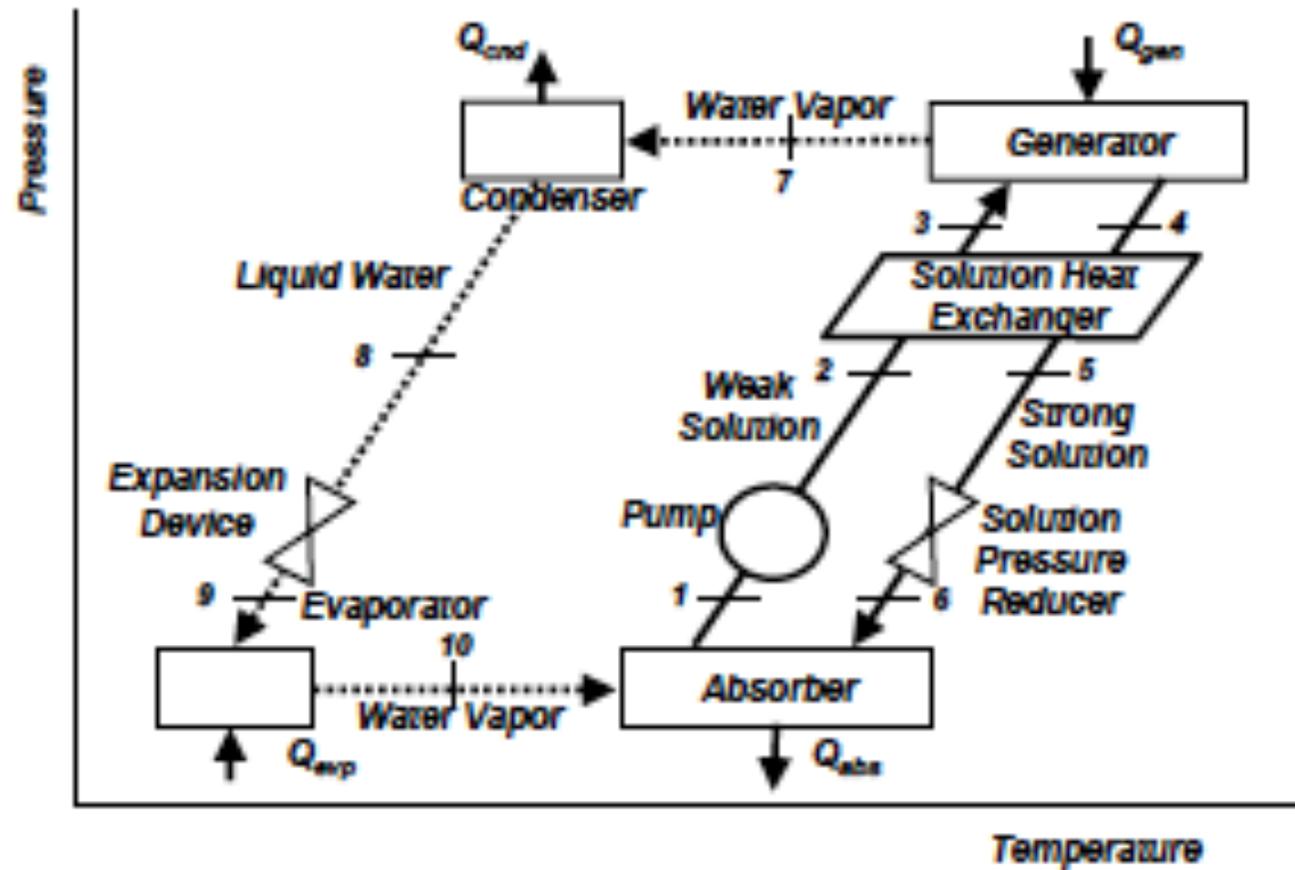


- High-pressure liquid
- Low-pressure liquid-vapor
- Low-pressure vapor
- High-pressure vapor

HEAT PUMP OPERATION – COOLING MODE



Pompe di calore geotermiche



Schema di funzionamento di una pompa di calore ad assorbimento

Le applicazioni geotermiche delle pompe di calore utilizzano il terreno come sorgente o pozzo termico. Il sottosuolo può svolgere le seguenti funzioni:

1. In inverno, può essere sfruttato come sorgente a bassa temperatura dalla quale è sottratto il calore da inviare alle utenze;
2. In estate, può essere sfruttato come pozzo di calore ad alta temperatura al quale è ceduto il calore sottratto alle utenze;
3. Qualora sia presente contemporaneamente una richiesta di calore e una necessità di raffrescamento, il sottosuolo può assorbire o fornire il calore in eccesso o in difetto;

Efficienza termodinamica

L'efficienza di una pompa di calore è una misura del calore fornito o sottratto alla fonte di interesse mediante la degradazione dell'energia necessaria al funzionamento della macchina.

$$\text{COP}_{\text{riscaldam.}} = \frac{Q_{\text{caldo}}}{L}$$

$$\text{COP}_{\text{raffreddam.}} = \frac{Q_{\text{freddo}}}{L}$$

Q_{caldo} = calore fornito alla sorgente ad alta temperatura;

Q_{freddo} = calore sottratto alla sorgente a bassa temperatura;

L = energia pregiata degradata a cui viene sommata l'energia spesa dagli organi ausiliari

Efficienza termodinamica

Tale definizione non è d'immediato utilizzo nel caso delle pompe di calore ad assorbimento ove è il calore ad alta temperatura che rigenera in maniera continua il processo di trasferimento di energia termica. Non si ha impiego d'energia meccanica se non negli organi ausiliari al funzionamento.

$$GUE_{Raffreddamento} = \frac{Q_{freddo}}{E}$$

$$GUE_{Riscaldamento} = \frac{Q_{caldo}}{E}$$

Q_{caldo} = calore fornito alla sorgente ad alta temperatura;

Q_{freddo} = calore sottratto alla sorgente a bassa temperatura;

L = energia consumata dal bruciatore

Condizioni climatiche di funzionamento

Le pompe di calore aumentano in efficienza quando si trovano a lavorare fra due sorgenti a temperatura non eccessivamente diversa. Per questo motivo, le macchine a compressione condensate ad aria non sono adeguate ad installazioni in climi rigidi, nei quali la temperatura dell'aria esterna può scendere abbondantemente sotto lo zero.

Le pompe di calore associate a fonti geotermiche non sono particolarmente soggette a tali restrizioni grazie alle proprietà termiche del terreno. Le installazioni con sonde geotermiche verticali sono le più adatte a condizioni climatiche avverse, poiché a profondità superiori ai 20m, la temperatura del sottosuolo non risente delle oscillazioni termiche superficiali

Il terreno come fonte di calore

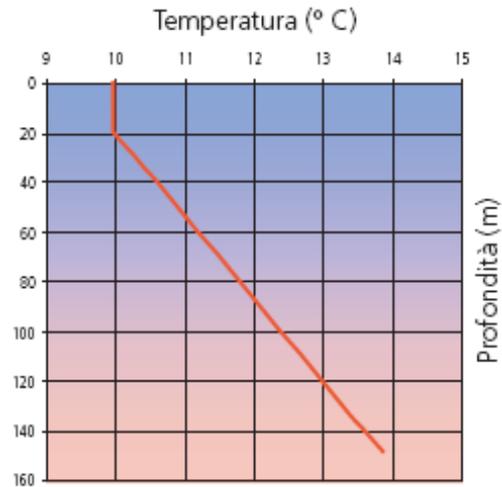
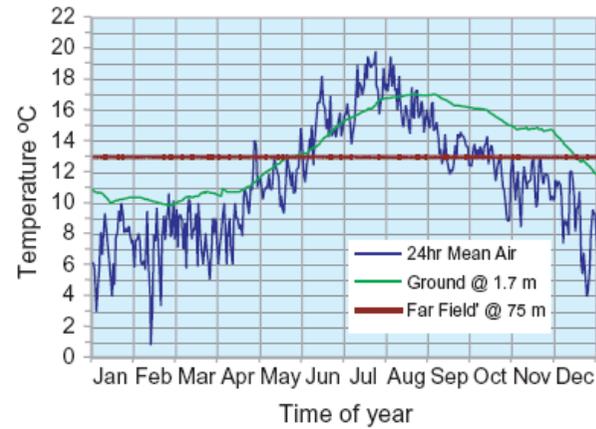
Le prestazioni di una pompa di calore variano sensibilmente in funzione delle temperature della sorgente e del pozzo di calore. Minore è la differenza fra le due temperature, maggiori sono la potenza fornita e l'efficienza della macchina. Il terreno è una fonte di calore che soddisfa questa esigenza per i seguenti motivi:

- 1. alta inerzia termica;**
- 2. buona conducibilità termica;**
- 3. alta capacità di accumulo;**
- 4. aumento progressivo della temperatura all'aumentare della profondità;**

Occorre aggiungere che tali caratteristiche variano in base al tipo di suolo presente nella zona d'installazione dell'impianto. Per questo si valutano le proprietà del terreno in relazione alla sua costituzione.

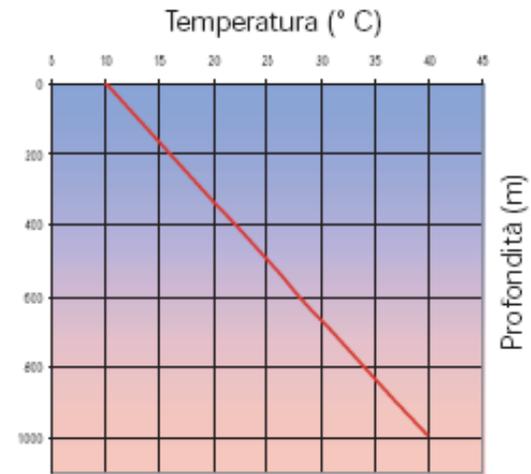
Tipo si sottosuolo	Conducibilità termica [W/(mK)]	Potenza specifica assorbita (sonda Ø 130 mm) [W/m]
Terreno asciutto	< 1,5	20
Roccia o terreno umido	1,5 – 3,0	50
Roccia con alta conducibilità	3,0	70
Ghiaia, sabbia asciutta	0,4	< 20
Ghiaia, sabbia umide o acquifere	1,8 – 2,4	55 – 65
Argilla, limo, umido	1,7	30 - 40
Roccia calcarea	2,8	45 – 60
Molassa	2,3	55 - 65
Granito	3,4	55 – 70
Basalto	1,7	35 - 55
Gneiss	2,9	60 - 70

Andamento della temperatura nel sottosuolo



Temperatura media del sottosuolo

Andamento medio della temperatura del terreno fino a 150 m di profondità.



Temperatura media in profondità

Andamento medio della temperatura del terreno fino a 1000 m di profondità.

Opere geotermiche

Le pompe di calore geotermiche scambiano calore con il terreno. Si ha un assorbimento o una cessione di energia termica a seconda che la macchina funzioni in riscaldamento o in raffrescamento.

Per svolgere le suddette funzioni occorre predisporre degli scambiatori di calore nel terreno in grado di fornire il fabbisogno termico necessario al funzionamento dell' impianto.

Sono diverse le configurazioni possibili:

- 1. Scambiatori orizzontali;**
- 2. Scambiatori verticali;**

Scambiatori Orizzontali ad espansione diretta

Sono costituiti da serpentine di **rame** annegate nel terreno nelle quali fluisce direttamente il fluido refrigerante.

Sono contraddistinti dai seguenti aspetti positivi:

FLUIDO TERMOMETTORE	E' lo stesso fluido refrigerante che si espande nello scambiatore;
CIRCOLAZIONE DEL FLUIDO	Non sono necessari organi di spinta aggiuntivi;
MESSA IN OPERA	I lavori di messa in opera dello scambiatore sono poco gravosi date le ridotte dimensioni delle condotte;
SCAMBIO TERMICO	Molto efficiente a causa dell'assenza di scambiatori di calore intermedi fra fluido refrigerante e terreno. Inoltre le condotte dello scambiatore sono realizzate in materiale ad alta conducibilità termica quale il rame;

Scambiatori Orizzontali ad espansione diretta

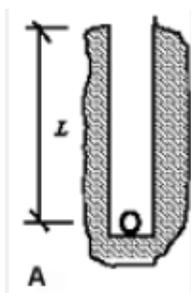
Sono contraddistinti dai seguenti aspetti negativi:

FLUIDO TERMOVETTORE	Occorrono grandi quantità di fluido refrigerante da impiegare in quanto è lo stesso fluido refrigerante a scambiare calore con il terreno;
POTENZIALITA'	Le piccole potenzialità di impianto sono le più adatte a tale configurazione in quanto elevati flussi termici concentrati in ristrette porzioni di terreno possono essere dannose al fine di un corretto funzionamento;
AMBIENTE	Si corre il pericolo di fughe di refrigerante nel terreno in caso di rottura delle condotte dello scambiatore;

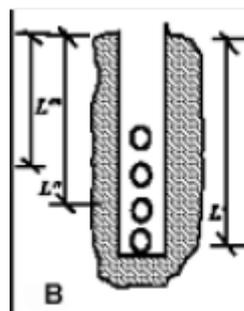
Scambiatori Orizzontali ad Espansione Indiretta

Sono costituiti da una serie di tubazioni in **polietilene** o **polibutilene** ad estensione orizzontale che si diramano nel terreno. Sono possibili diverse disposizioni:

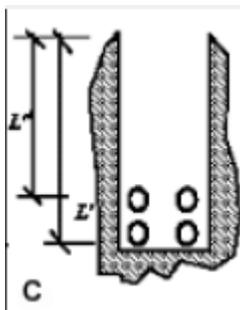
Singolo tubo



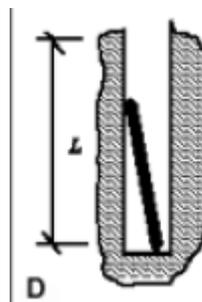
Coppie di tubi sovrapposte



Coppie di tubi affiancate

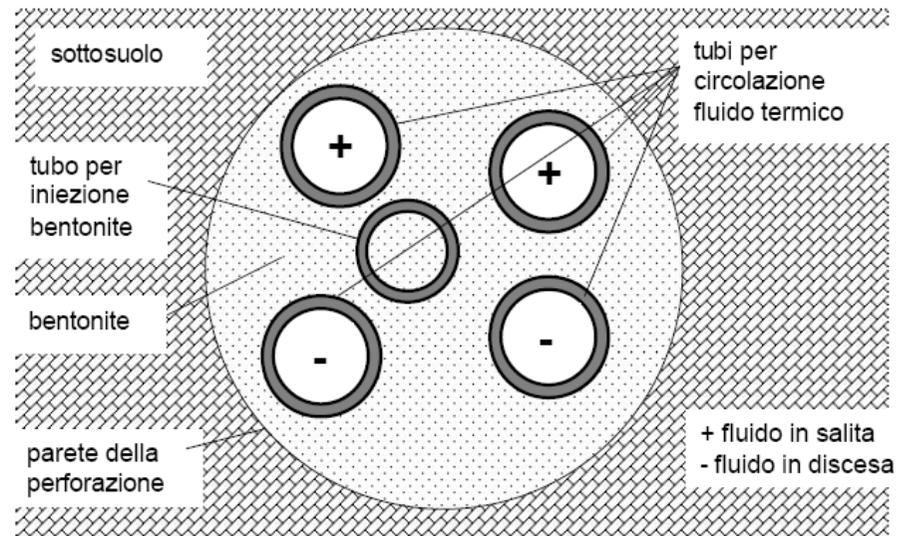


Tubazioni a spirale



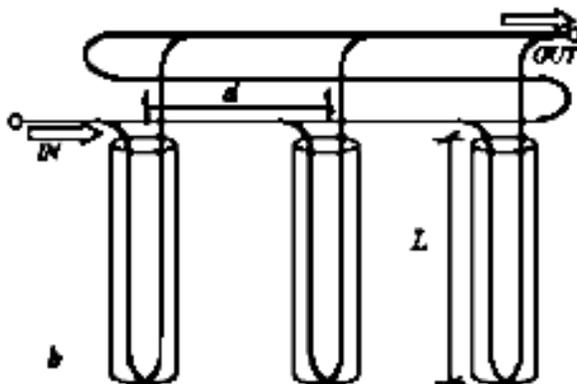
Scambiatori verticali a ciclo chiuso

Sono costituiti da tubi ad U realizzati in **polietilene** ed inseriti in perforazioni del terreno. Lo spazio vuoto tra i tubi e la parete della perforazione è riempito con una miscela di bentonite e cemento per assicurare un buon contatto termico.



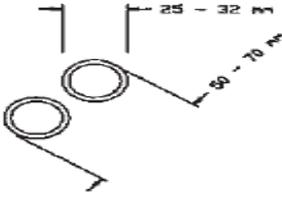
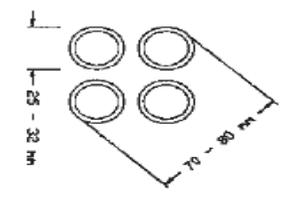
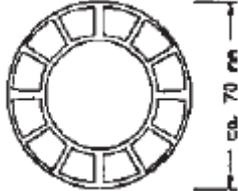
Scambiatori verticali a ciclo chiuso

moduli geotermici disposti in parallelo. Il fluido termovettore attraversa contemporaneamente tutte le sonde geotermiche presenti nell'impianto. Segue che tutte le sonde lavorano alla stessa temperatura di mandata del fluido. A parità di dimensioni smaltiscono tutto lo stesso fabbisogno termico. Di contro si deve effettuare un attento bilanciamento idraulico in maniera tale da garantire la stessa portata di fluido in tutti gli scambiatori a terreno.



Vantaggi	Svantaggi
Minori costi di installazione;	Difficile spurgo dell'aria;
Minore quantitativo di liquido antigelo;	Tubazioni di differente diametro;
Maggiore estensione di tubazioni di minore diametro;	Difficoltà di bilanciamento e necessità di ritorno inverso, lunghezze eguali delle derivazioni entro il 10%;

Configurazione delle sonde verticali a ciclo chiuso

<p>1) singolo tubo a U</p>	<p>All'interno della perforazione vengono inseriti un tubo di mandata ed uno di ritorno collegati sul fondo. Si esegue poi il getto di riempimento;</p>	
<p>2) doppio tubo a U</p>	<p>All'interno della perforazione vengono inseriti quattro tubi collegati sul fondo a due a due;</p>	
<p>3) tubi coassiali</p>	<p>Il tubo di ritorno è interno a quello di mandata, che occupa tutta la sezione della perforazione. Segue che in genere non è necessario il getto di riempimento;</p>	
<p>4) tubi coassiali complessi</p>	<p>Sono sonde coassiali che tra tubo interno ed esterno prevedono delle alette di collegamento che assicurano un migliore scambio termico. Durante la fase di ritorno, il fluido può essere fatto circolare in alcuni dei canali periferici in maniera tale che possa scambiare calore con il terreno in entrambe i sensi di percorrenza;</p>	

Principali parametri di realizzazione e di funzionamento

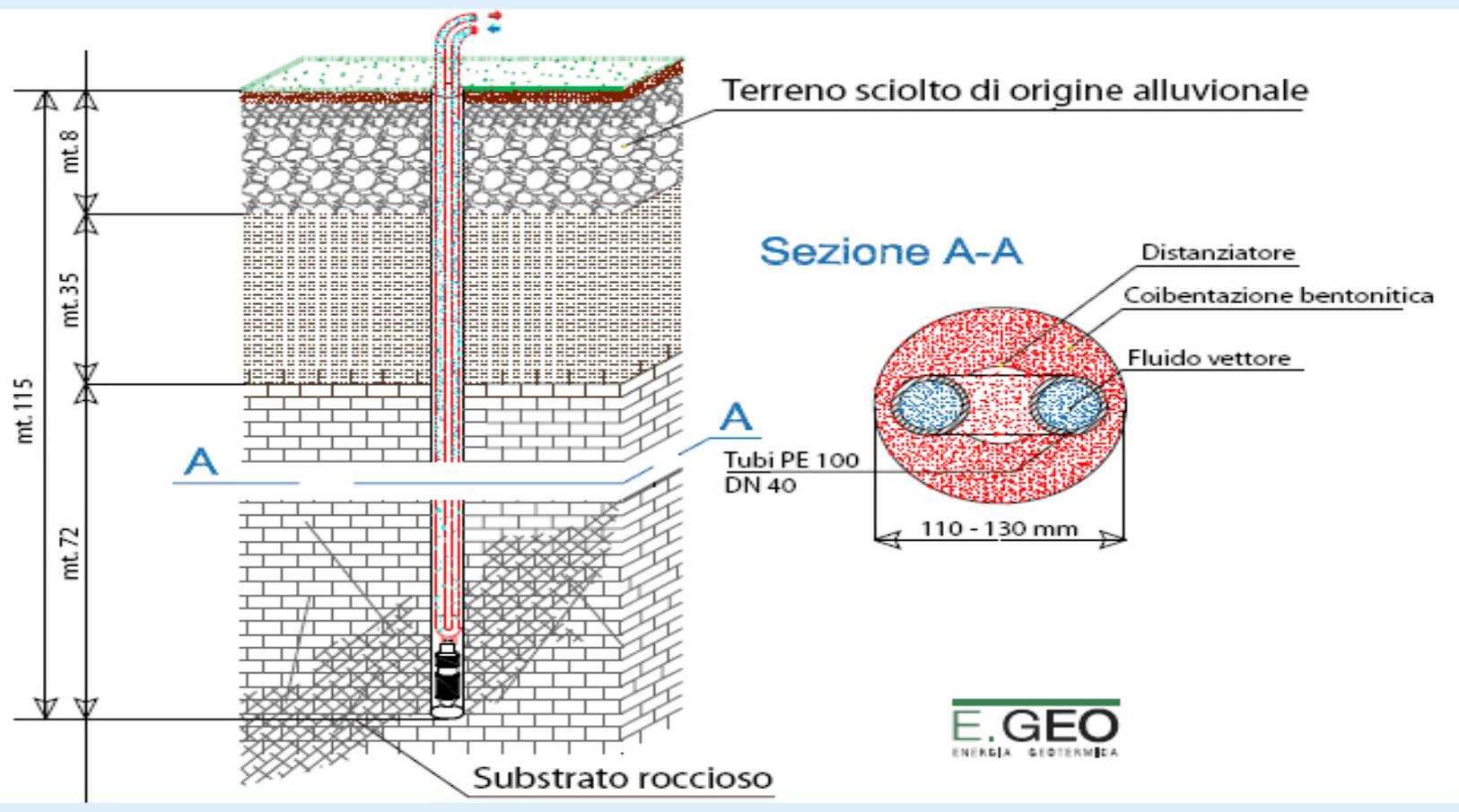
PROFONDITA' DELLE TRIVELLAZIONI	Si possono raggiungere profondità considerevoli. In genere si parla di 15 - 25m per ogni KW di potenza frigorifera installata. Ciò dipende dalle caratteristiche del terreno e dalla lunghezza complessiva della trivellazione;
DIAMETRO DELLA TRIVELLAZIONE	Per la maggior parte delle applicazioni sono sufficienti dei diametri di 10 - 15cm;
DISTANZA FRA DUE TRIVELLAZIONI	Al fine di garantire un corretto prelievo di energia termica dal terreno occorre distanziare i pali energetici di qualche metro, 7 - 8m. In questa maniera le sonde non si influenzano reciprocamente;
DIAMETRO TIPICO DELLE TUBAZIONI	I diametri più comuni sono compresi fra 3 e 4 cm;
PREVALENZE DEGLI ORGANI DI SPINTA	Si utilizzano pompe con prevalenze comprese fra 6 e 9 metri e fabbisogno approssimativo di $0,03KW_{el}$ per ogni KW termico;
PORTATE	Le portate tipiche sono di $0,05 m^3$ al secondo per ogni KW termico previsto;

Scambiatori Verticali a ciclo aperto

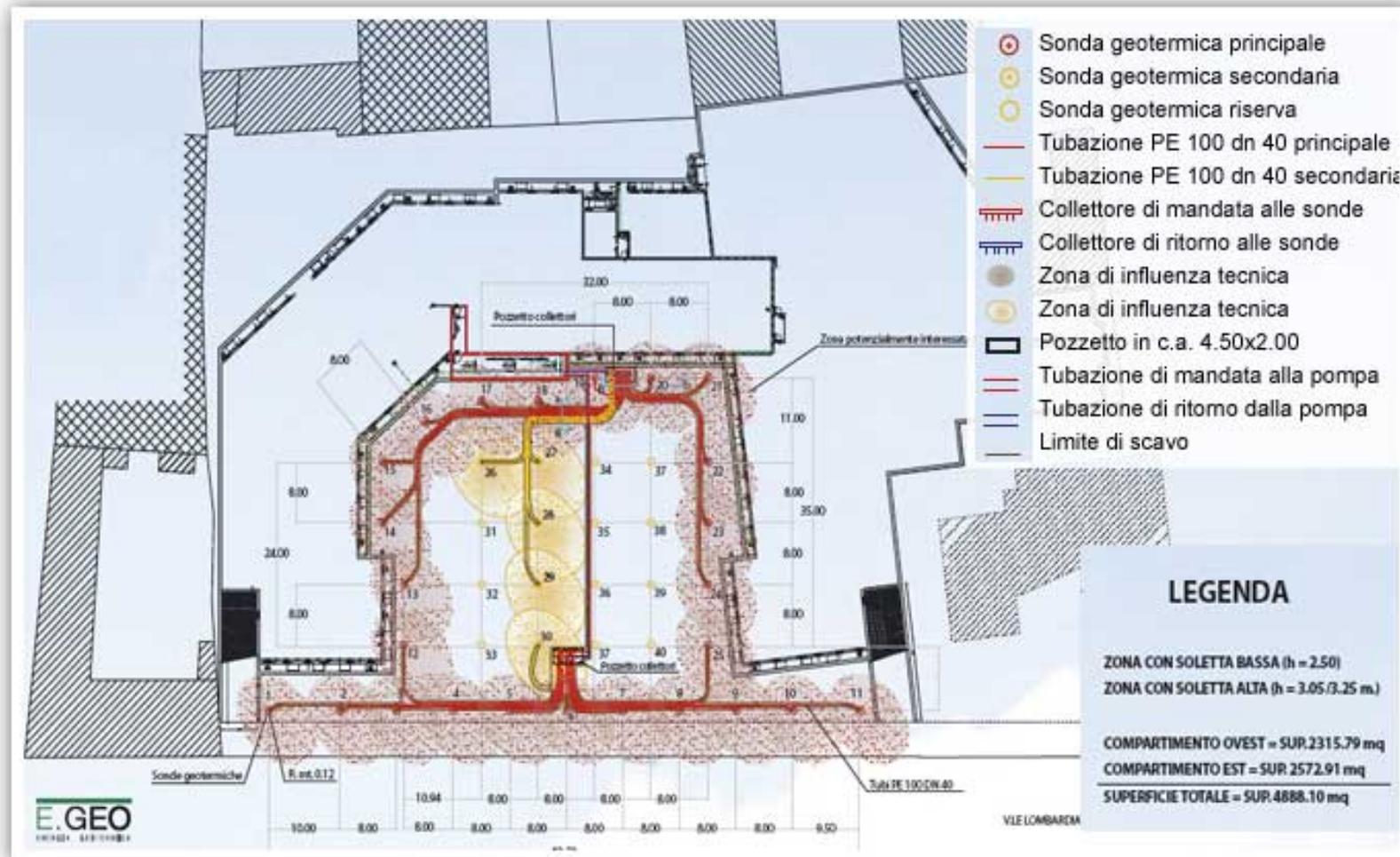
E' una soluzione che prevede l' utilizzo diretto di una falda acquifera presente nel sottosuolo. La realizzazione prevede lo scavo di un minimo di due pozzi di cui uno di presa e l' altro di reiniezione.

Lo schema di impianto più comune in tale ambito consiste in uno scambiatore di calore a fascio tubero o a piastre fra l' acqua prelevata dalla falda e un circuito chiuso connesso alla pompa di calore. E' possibile prevedere l' utilizzo diretto dell' acqua di falda all' interno degli elementi radianti o dei convettori. Si minimizza così la richiesta energetica del sistema durante la stagione estiva.

FLUIDO TERMOVETTORE	E' l' acqua di falda prelevata mediante la circolazione in un pozzo;
CIRCOLAZIONE DEL FLUIDO	E' affidata ad una pompa sommersa, montata all' interno del pozzo di falda;
REINIEZIONE	La richiesta energetica del sistema è ciclo chiuso, in quanto occorrono pozzi di maggior diametro, opere di captazione, un sistema di reimmissione dell' acqua in falda;
PORTATE D'ACQUA DI FALDA	Occorrono portate idriche nell' ordine dei 0,10 - 0,15 m ³ all' ora per ogni KW di potenza termica o frigorifera installata. Tali valori sono riferiti ad un salto termico dell' acqua contenuto entro i 5 - 6 °C;
POTENZIALITA'	A parità di superficie impiegata è la configurazione che consente l' installazione di potenze maggiori. Si adatta al servizio di grandi edifici;
RENDIMENTI	L' utilizzo diretto dell' acqua di falda è la soluzione che assicura i migliori rendimenti alle pompe di calore. Nei mesi estivi si ha condensazione del refrigerante a temperatura più bassa, mentre in inverno, l' evaporatore può asportare calore da una fonte a temperatura pressoché costante nel tempo;



Impianto realizzato nel comune di Brescia



Esempio di pompa di calore per applicazione geotermica



Dati tecnici SIH 6ME

pompa di calore geotermica acqua glicolata-acqua, ad alta temperatura

Collaudo e messa in funzione/colore		All'interno/bianco (simile a RAL 9003)
Codice		SIH 6ME
Limiti di funzionamento di temperatura Circuiti secondario/primario		70 °C
Limiti di funzionamento di temperatura Circuito primario		-5 °C to 25 °C
Potenza/COP a B0/W50*	kW	5,80 / 3,00
Potenza/COP a B0/W35*	kW	6,20 / 4,30
Assorbimento di energia elettrica a B0/W35	kW	1,44
Refrigerante R134a	kg	1,80
Circuito primario: Portata/Perdite di carico	m³/h / Pa	1.3 / 8900
Circuito secondario: Portata/Perdite di carico	m³/h / Pa	0.50 / 1200
Dimensioni (** L x P x H)	mm	650 x 462 x 805
Peso (incl. imballaggio)	kg	118
Tensione al microprocessore	V	230
Tensione a regime		1/N/PE~230V, 50Hz
Assorbimento di corrente all'avviamento	A	38 SA
Fusibile	A	20
Collegamenti al circuito secondario		1 1/4"
Collegamenti al circuito primario		1 1/4"

* I valori specificati hanno il seguente significato: B0/W35; di cui B0 è la temperatura del circuito primario (0°C) e W35 è la temperatura del circuito secondario (35 °C), resa dalla pompa di calore.

II ** si necessita di uno spazio supplementare per i collegamenti, il funzionamento e la manutenzione dell'impianto.