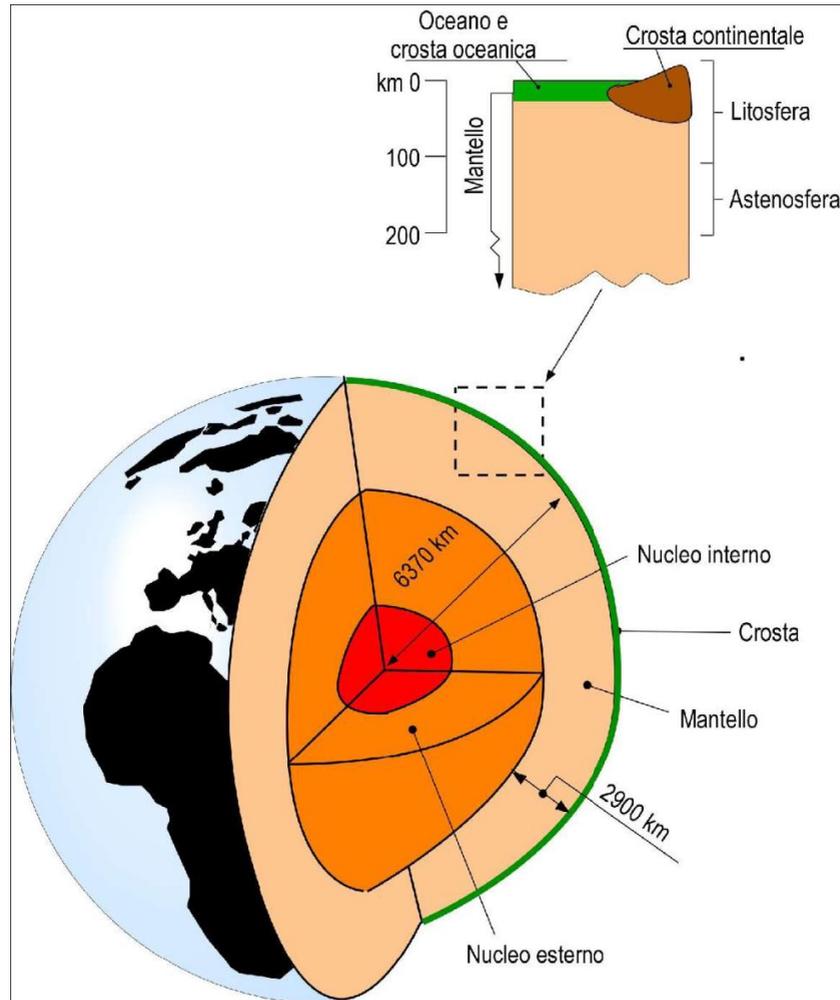


SOLUZIONI PER LO SFRUTTAMENTO GEOTERMICO

Sistemi a Bassa e Media/alta Entalpia

Prof. Francesco CALISE
Dipartimento di Ingegneria Industriale
Università degli Studi di Napoli Federico II

IL GRADIENTE GEOTERMICO

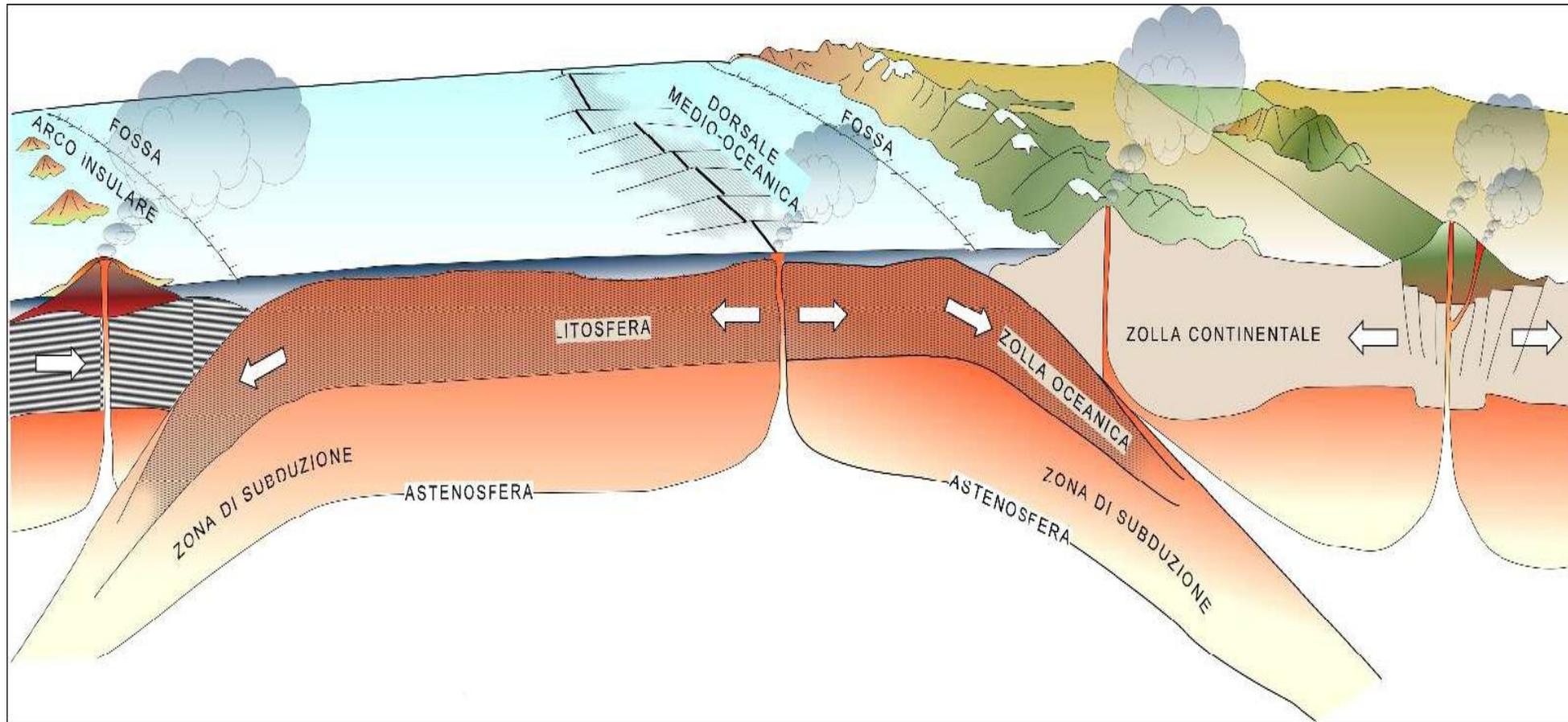


La temperatura nel sottosuolo cresce con la profondità. Mediamente si osserva un **incremento della temperatura** pari a:

$$\Delta t \cong 25 \div 35 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{km}}$$

Il flusso termico può variare dai circa **65 mW/m²** (aree continentali) a quasi **101 mW/m²** (aree oceaniche) in funzione delle caratteristiche termiche degli strati sotterranei

NATURA DELLE RISORSE GEOTERMICHE



il meccanismo delle tettonica a zolle.

IL MECCANISMO DELLA TETTONICA A ZOLLE

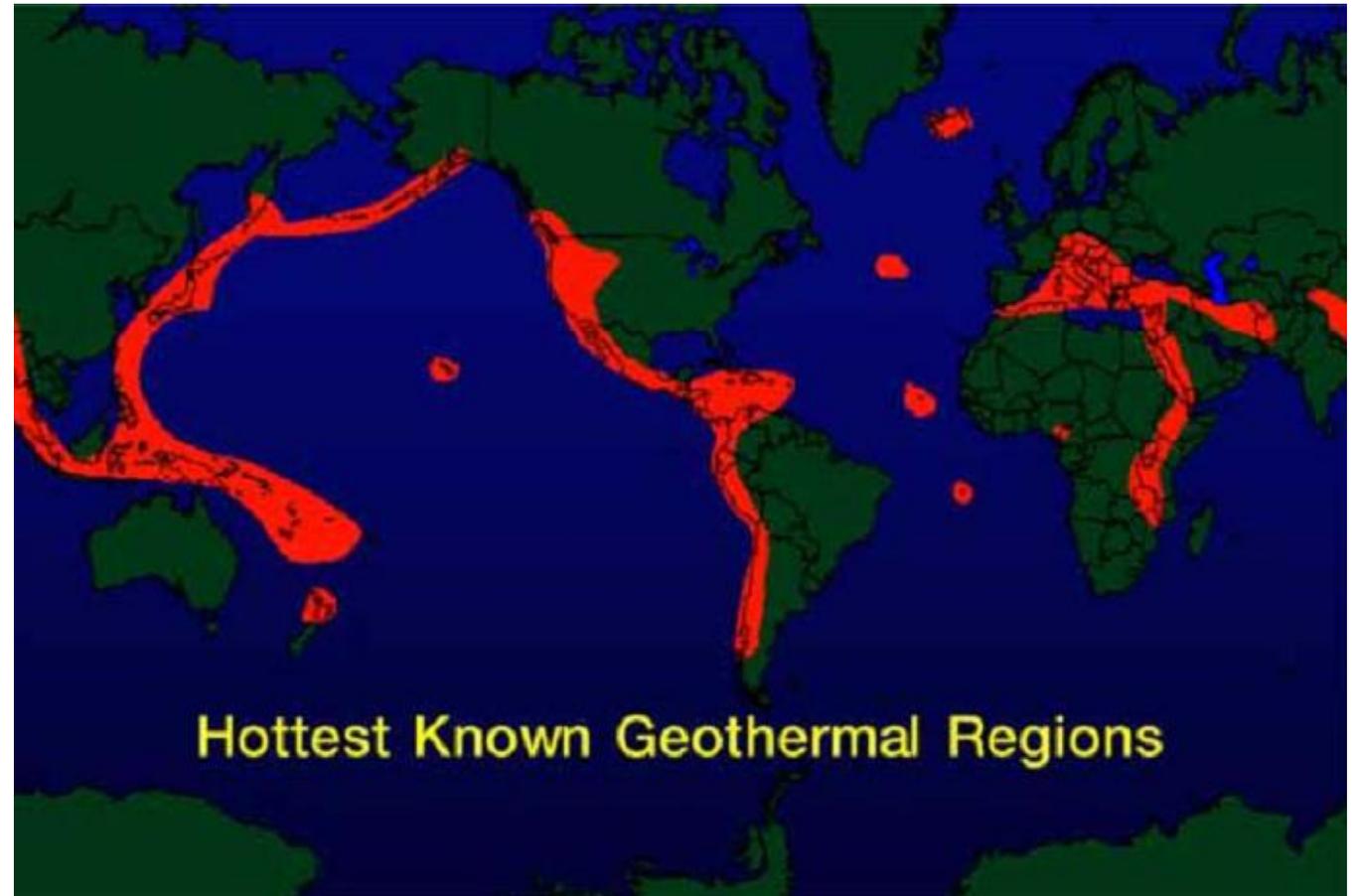
Zolle crostali, dorsali, fosse oceaniche, zone di subduzione e campi geotermici. Le frecce indicano la direzione del movimento delle zolle. (1) Campi geotermici che producono elettricità; (2) dorsali interrotte dalle faglie trasversi (fratture trasversali); (3) zone di subduzione, nelle quali la litosfera volge in basso verso l'astenosfera, dove fonde.



FASCE GEOGRAFICHE GEOTERMICHE

L'esistenza di energia termica all'interno della terra è reso evidente da fenomeni (fumarole vulcani, geysers,) distribuiti sulla superficie terrestre secondo fasce geografiche delineate e contraddistinte dal punto di vista geologico:

1. Fascia Pacifico-Americana
2. Fascia Medio-Atlantica
3. Fascia Africa Orientale
4. Fascia Alpino-Himalainana
5. Fascia Asia Continentale
6. Fascia Pacifico-Asiatica

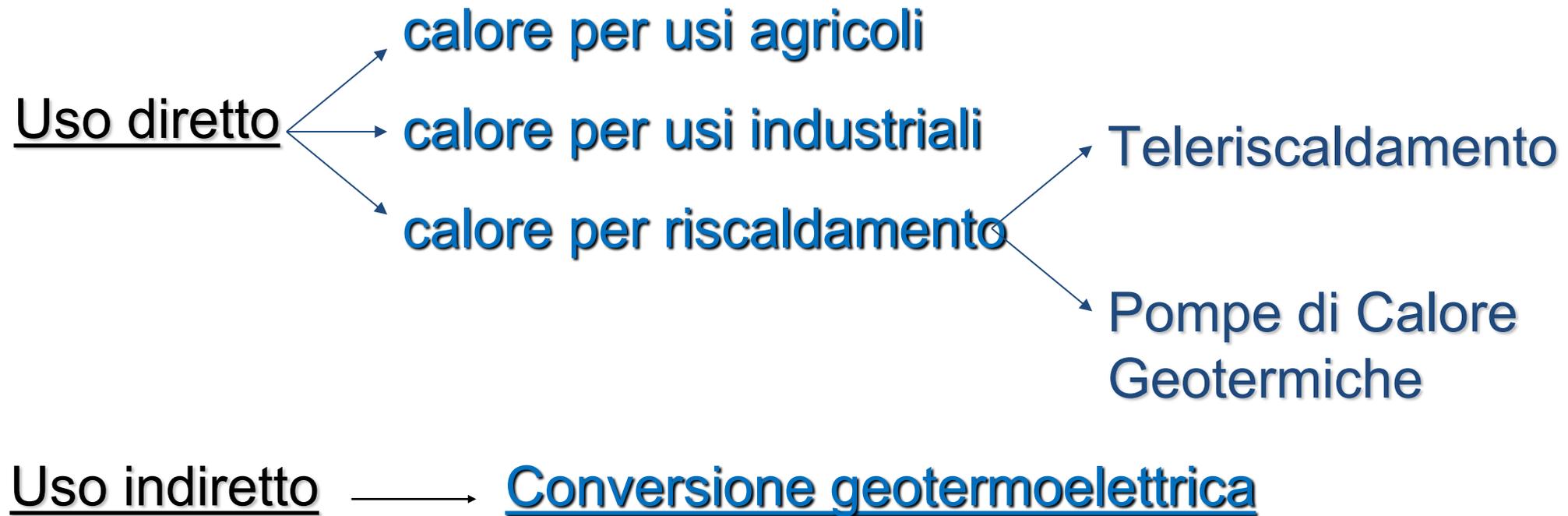


CLASSIFICAZIONE DELLE RISORSE IN BASE ALLA T (°C)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Risorse a bassa entalpia	< 90	<125	<100	≤150	≤190
Risorse a media entalpia	90-150	125-225	100-200		
Risorse ad alta entalpia	>150	>225	>200	>150	>190

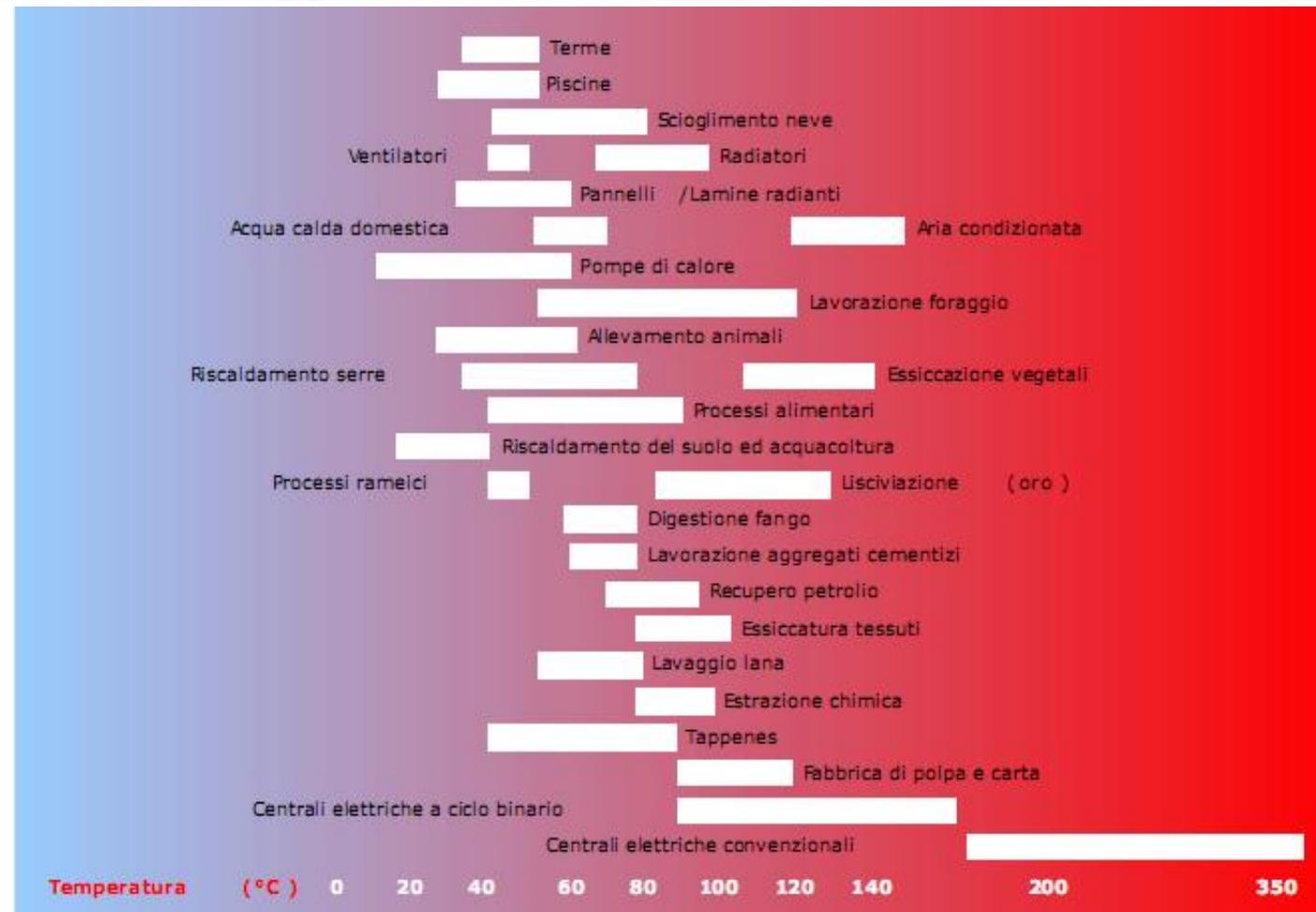
Rif: (a) Muffler and Cataldi (1978), (b) Hochstein (1990), (c) Benderitter and Cormy (1990), (d) Nicholson (1993), (e) Axelsson and Gunnlaugsson (2000)

PRINCIPALI USI DELLE FONTI GEOTERMICHE



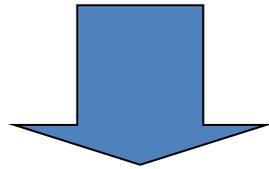
PRINCIPALI USI DELLE FONTI GEOTERMICHE

Versione aggiornata del Diagramma di Lindal, 1973



I FLUIDI GEOTERMICI

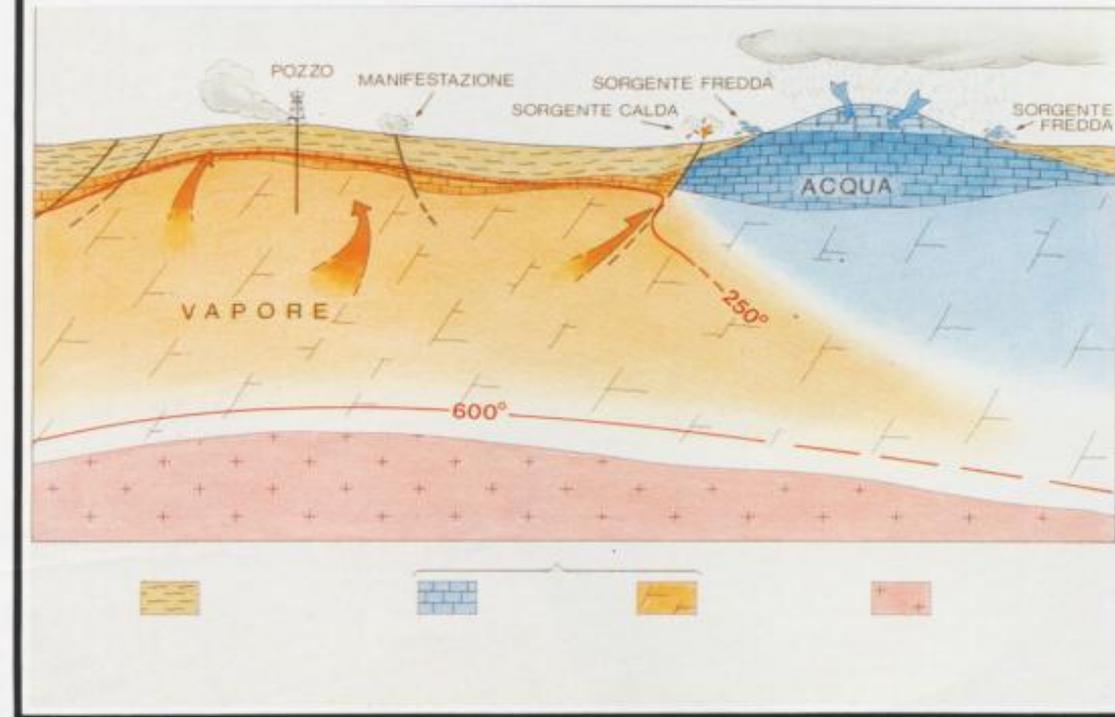
I fluidi geotermici sono essenzialmente composti da acqua meteorica o di origine marina che penetra nel sottosuolo e si riscalda a contatto con le rocce calde.



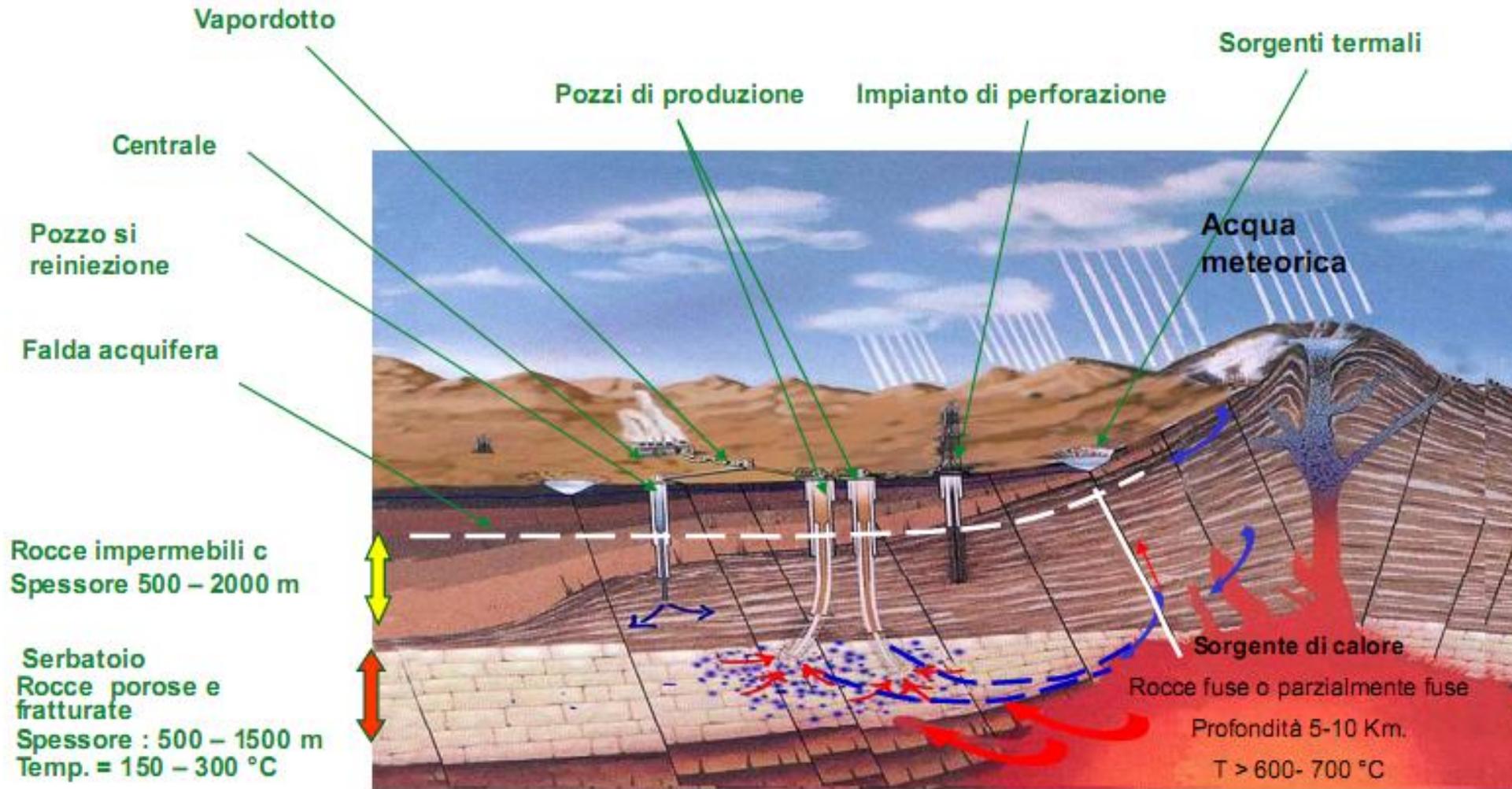
ACQUIFERI

strati o raggruppamenti di materiale permeabile saturo di acqua, nel caso di falde geotermiche le temperature possono arrivare oltre 300°C

Figura 5 - Schema di principio di un sistema geotermico idrotermale.



SCHEMA DI UTILIZZO DI SERBATOIO GEOTERMICO



CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI GEOTERMICI

Se i fluidi caldi rimangono entro il serbatoio per effetto di una **copertura di terreni impermeabili**, si possono avere concentrazioni di energia termica di interesse industriale a fini di produzione di energia

Sistema geotermico

- Idrotermale ($t > 100^{\circ}\text{C}$)
- Geopressurizzato
- Magmatico ($600^{\circ}\text{C} < t < 1400^{\circ}\text{C}$)
- Rocce calde secche ($200^{\circ}\text{C} < t < 350^{\circ}\text{C}$)

SISTEMI GEOTERMICI IDROTERMALI

Rappresentano praticamente gli **unici sistemi geotermici utilizzati** nel mondo su scala industriale

Acqua dominante

Sono i più diffusi.

$$T_{\text{acqua}} > 100^{\circ}\text{C}$$

La fase dominante è liquida

Vapore dominante

Sono i meno diffusi (10%)

$$p = 0,1 - 1 \text{ MPa}$$

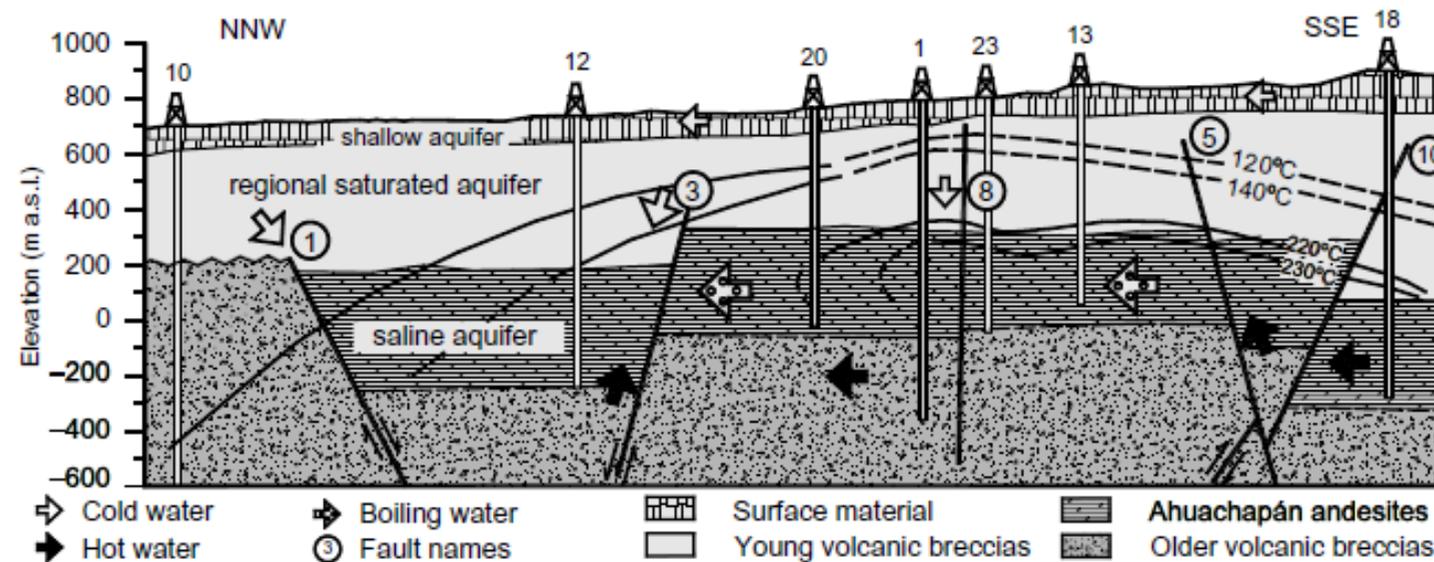
$$T_{\text{vapore}} > 200^{\circ}\text{C}$$

La fase dominante è vapore

Sempre disciolti all'interno sostanze solide, liquide e gassose tra cui i gas "incondensabili" (CO₂)

SISTEMI IDROTERMALI AD ACQUA DOMINANTE

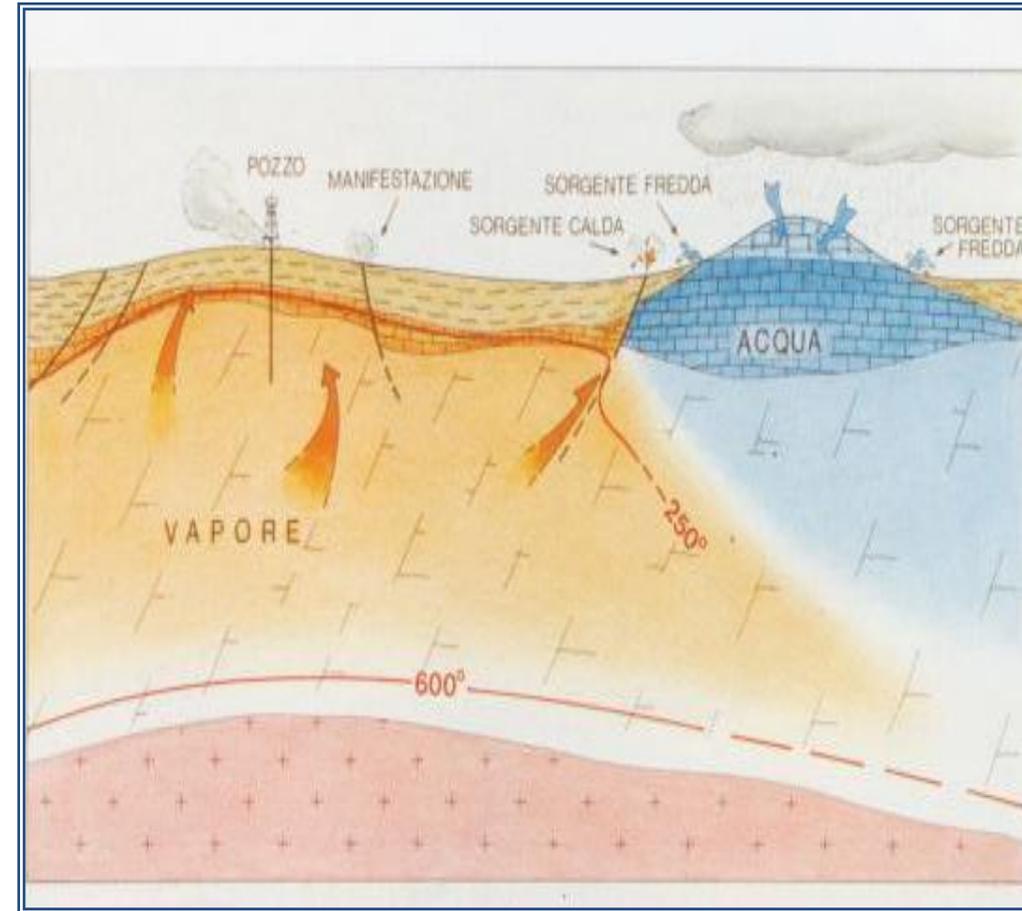
Sono formati da **formazioni rocciose permeabili**, che costituiscono i serbatoi geotermici contenenti il fluido caldo, **ricoperti di terreno impermeabile**.



L'alimentazione del serbatoio è generalmente legata alla circolazione di acqua meteorica o marina, mentre la fonte di calore è generalmente rappresentata da **intrusioni di magma** ancora caldo nella crosta terrestre.

SISTEMI IDROTERMALI A VAPORE DOMINANTE

- Il fluido geotermico è disponibile totalmente o prevalentemente in fase vapore
- Sono poco diffusi e rappresentano il 10% di tutti i sistemi idrotermali
- Il vapore è disponibile a temperatura anche superiore a 200°C e con pressioni alla bocca del pozzo di 0,5-1MPa.
- I serbatoi geotermici a vapore dominante in produzione sono Larderello, the Geysers (USA), Matsukawa (Giappone), Kawah Kamojang (Indonesia)

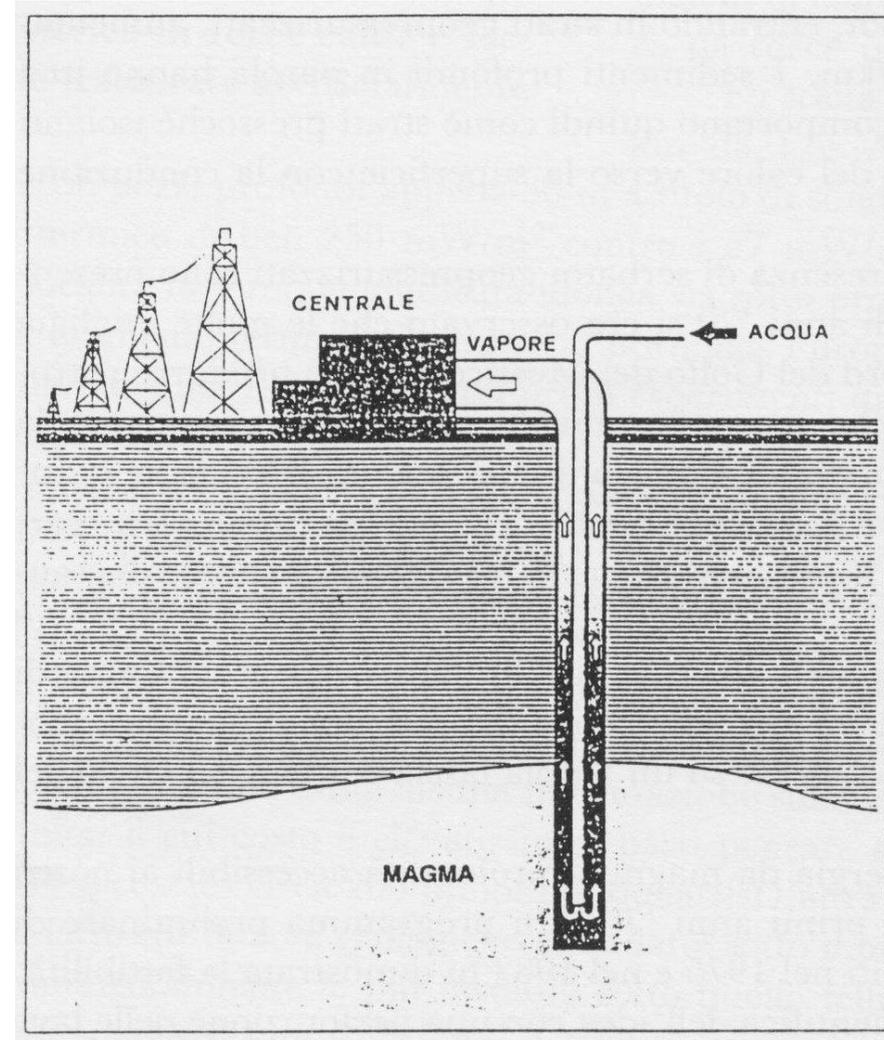


SISTEMI GEOPRESSURIZZATI

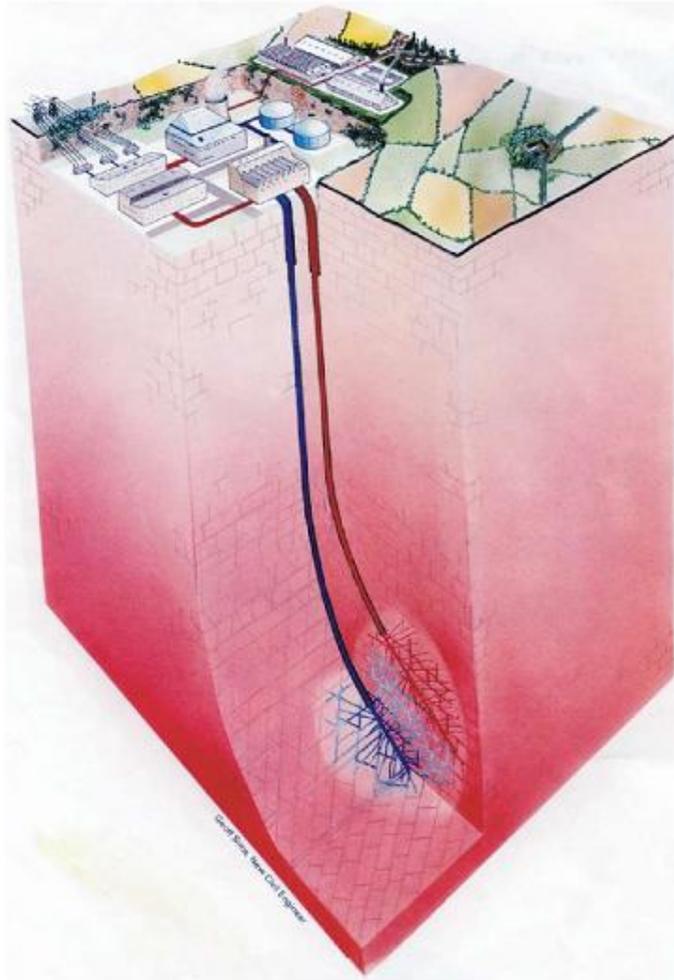
- I sistemi geopressurizzati sono estese **masse di sabbia o arenarie sature di acqua sigillate entro sedimenti impermeabili**, di natura prevalentemente argillosa, a profondità superiori ai **4000 m**
- In questi sistemi il gradiente geotermico può arrivare a **50-100°C/km**
- I **sedimenti impermeabili** hanno una conducibilità termica bassa, si comportano, quindi, come strati pressoché **isolanti** che rallentano la propagazione del calore verso la superficie
- Prospezioni finalizzate all'utilizzo dell'energia geotermica per questi tipologie di sistemi sono state effettuate nel nord del **Golfo del Messico** (Jones 1970 e Duffeld and Saas 2003) ed attualmente nella regione del golfo tra Texas e Louisiana

SISTEMI MAGMATICI

- Sistemi con temperature che vanno dai **600°C** ai **1400°C**
- Sono costituiti da rocce fuse di origine magmatica
- I grossi problemi relativi allo sfruttamento di questo sistema ne fanno un obiettivo di utilizzo a lungo termine
- **Magma Energy Extraction Program** (1984) è stato effettuato Long Valley Caldera, in California con un pozzo profondo **6000 m** e temperatura intorno ai **500 °C**.



ROCCE CALDE SECCHHE



- Se ne prevede l'uso **iniettando acqua in rocce calde naturalmente fratturate**
- Lo sfruttamento è sostenibile in tempi **medio-brevi** se la temperatura del serbatoio è **almeno di 200°C**, l'area di scambio termico supera i **2 milioni di m²** il volume interessato della roccia è di almeno **200 milioni di m³** e la perdita d'acqua del sistema non supera il **10 %**
- Al primo progetto di **Los Alamos (USA)** ne sono seguiti altri prevalentemente in **Giappone (Hijiori, Ogachi e Yunomori)**. In Europa le ricerche più avanzate sui HDR sono in Alsazia (Francia)

IMPIANTI GEOTERMoeLETRICI

Tipologie:

- ✓ Impianti a Singolo-Flash
- ✓ Impianti a Doppio-Flash
- ✓ Impianti a vapore saturo secco (Dry Steam)
 - ✓ Impianti Binari
 - ✓ Impianti Ibridi

IMPIANTI GEOTERMoeLETRICI

Tipologia	Temperatura sorgente [°C]	Rendimento exergetico %	Complessità impiantistica	Diffusione
Singolo Flash	200 – 260	30 – 35	Moderata	Ampia
Doppio Flash	240 – 320	35 – 45	Moderata → Alta	Ampia
Dry – Steam	>180	50 – 65	Bassa → Moderata	Bassa
Binario	125 – 165	25 – 45	Moderata → Alta	Ampia

Caratteristiche fondamentali delle differenti tipologie di impianti geotermoelettrici

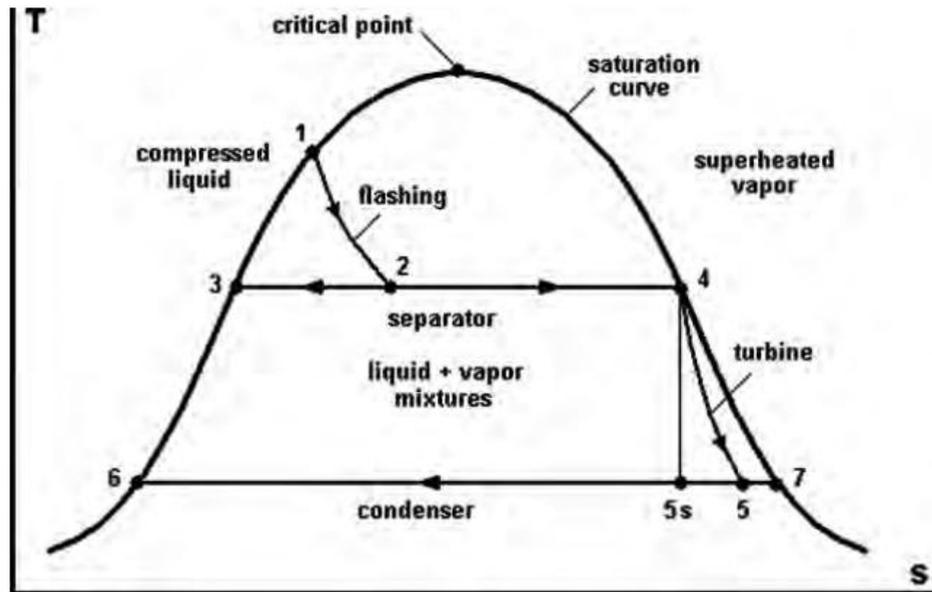
Tratta da:

Geothermal Power Plants – Ronald Di Pippo

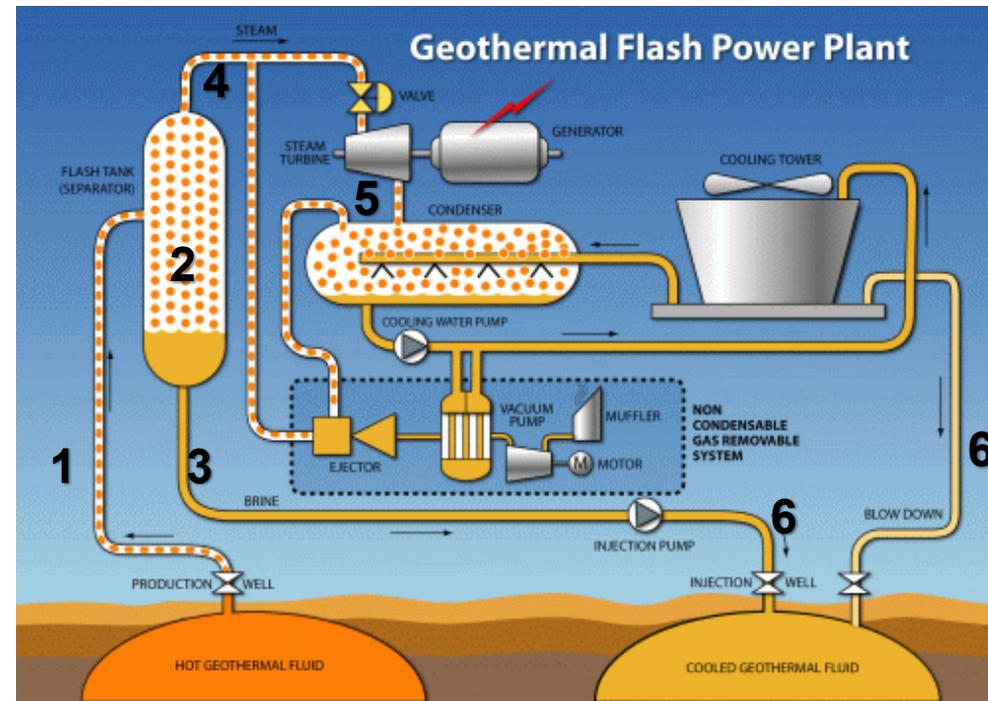
IMPIANTI SINGOLO - FLASH

È indicata con il termine di *flash* la trasformazione termodinamica che subisce un fluido quando è sottoposto ad un processo di laminazione dalla condizione di liquido saturo o sottoraffreddato alla condizione di vapore saturo, caratterizzato dalla contemporanea presenza di una fase liquida ed una fase vapore in equilibrio.

Il fluido geotermico, prelevato in fase liquida, è *laminato e successivamente introdotto in un separatore di fase*. Il vapore saturo secco, generato dall'operazione di laminazione, è inviato in *turbina* dove completa l'espansione mentre il liquido saturo è *reiniettato* nel pozzo.



Rappresentazione ciclo termodinamico sul piano T-s
Tratta da:
Geothermal Power Plants - Ronald Di Pippo

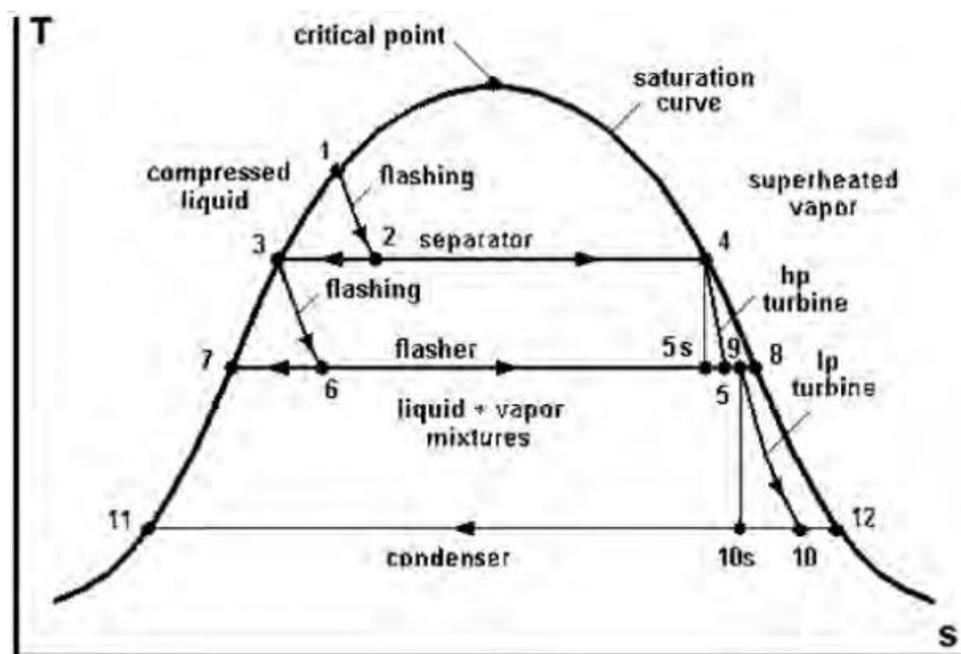


Rappresentazione schematica impianto Single-Flash
Tratta da: Siemens - Siemens Student Awards <http://www.studentaward-middleeast.com/idea.php?id=146>

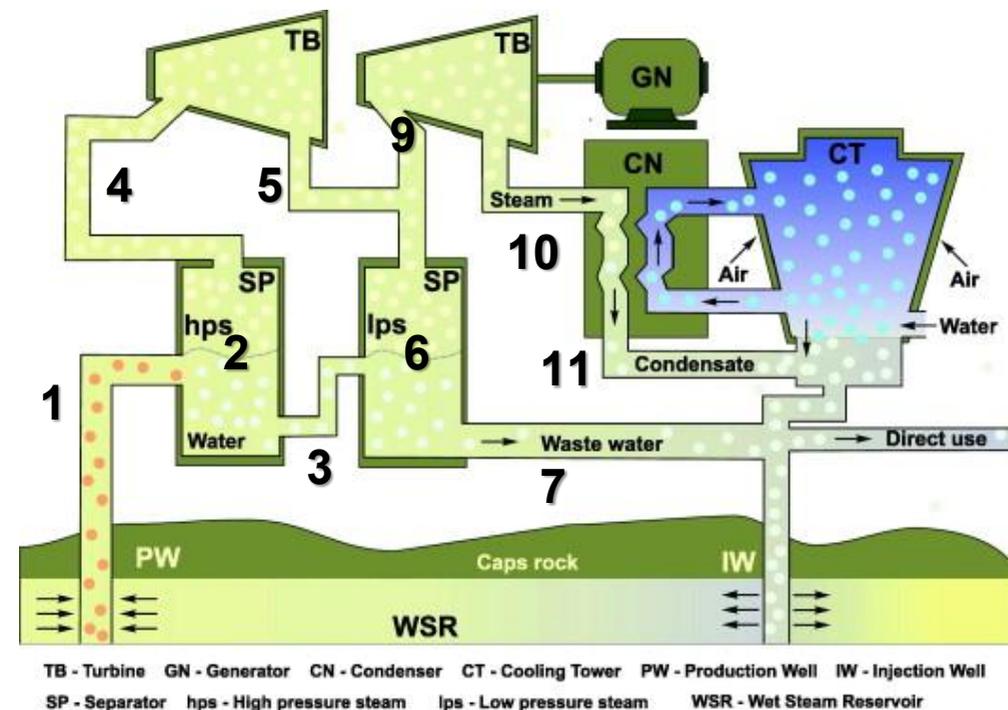
IMPIANTI DOPPIO - FLASH

Il liquido saturo prodotto dalla prima operazione di flash è **ulteriormente laminato** per consentire la produzione di vapore aggiuntivo da inviare in una **turbina di bassa pressione**.

- ✓ Consentono un **incremento di potenza** rispetto alla configurazione a singolo flash pari a 15 – 25%
- ✓ **Più complessi** degli impianti Single-Flash
- ✓ **Più costosi** degli impianti Single-Flash



Rappresentazione ciclo termodinamico sul piano T-s
Tratta da:
Geothermal Power Plants – Ronald Di Pippo



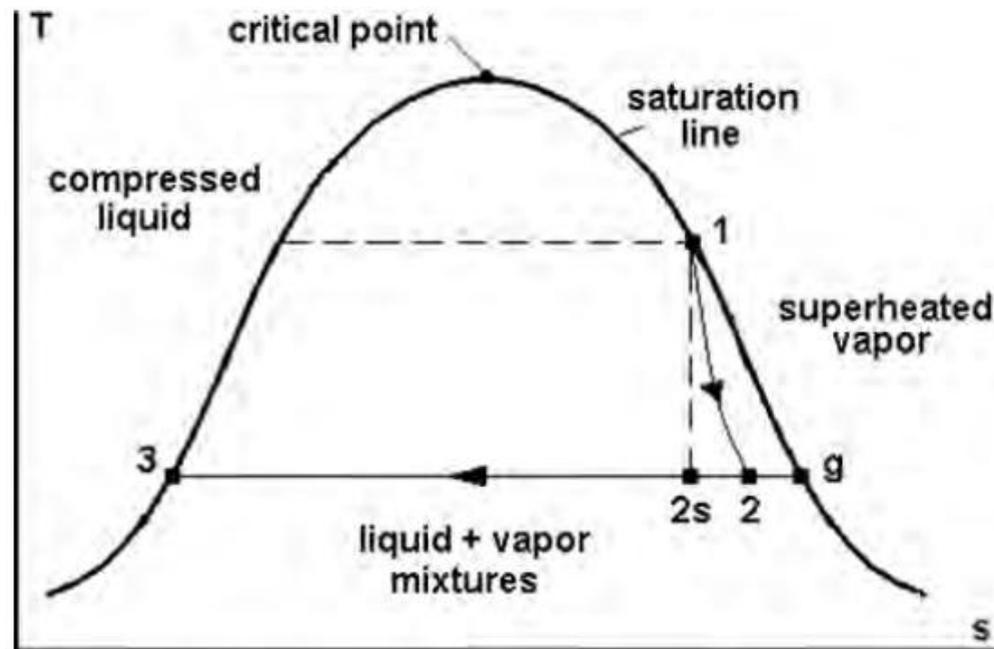
TB - Turbine GN - Generator CN - Condenser CT - Cooling Tower PW - Production Well IW - Injection Well
SP - Separator hps - High pressure steam lps - Low pressure steam WSR - Wet Steam Reservoir

Rappresentazione schematica impianto Doble Flash
Tratta da:
Guzović Z. et Al. - Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia from medium-temperature geothermal sources – Applied Energy 2012

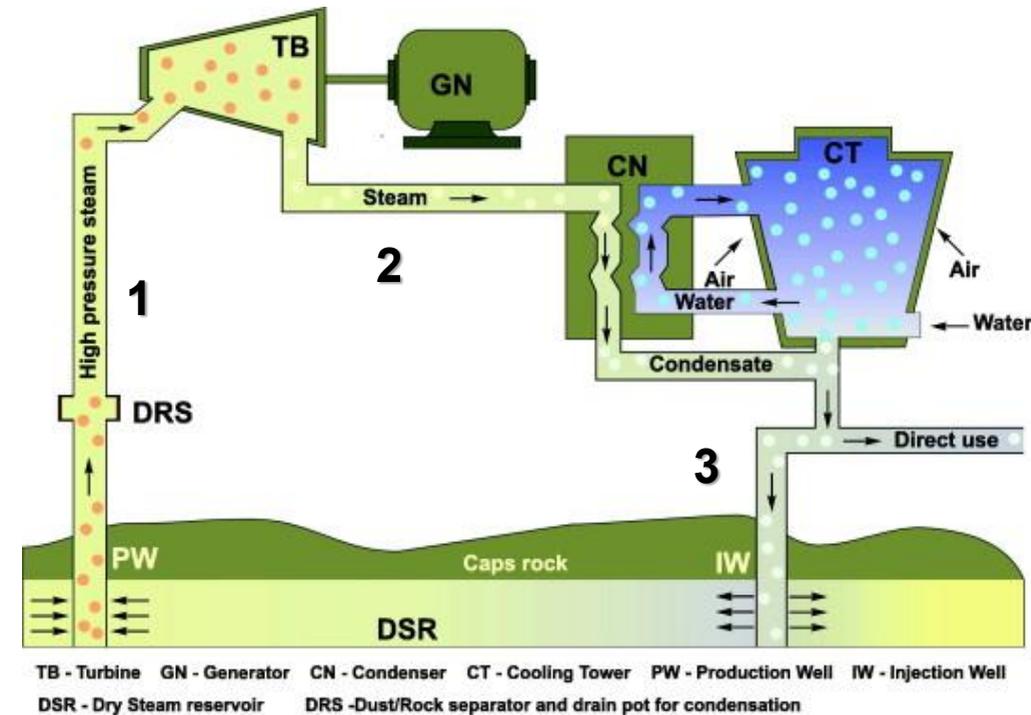
IMPIANTI DRY STEAM

Il fluido geotermico, prelevato da un pozzo a vapore dominante, è **direttamente introdotto in turbina** senza subire alcun processo di laminazione. Storicamente gli impianti Dry-Steam rappresentano **la prima applicazione dell'uso** della sorgente geotermica per la produzione di energia elettrica

- ✓ Necessitano di pozzi **a vapore dominante** con specifiche caratteristiche geologiche
- ✓ **Più semplici** degli impianti Single-Flash
- ✓ **Meno costosi** degli impianti a Flash



Rappresentazione ciclo termodinamico sul piano T-s
Tratta da: Geothermal Power Plants – Ronald Di Pippo



Rappresentazione schematica impianto Dry-Steam
Tratta da: Guzović Z. et Al.- Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia from medium-temperature geothermal sources – Applied Energy 2012

IMPIANTI BINARI

Il fluido geotermico è utilizzato esclusivamente come fluido termovettore. Esso ha il compito di somministrare calore ad **un fluido terzo**, generalmente di natura organica, che evolve all'interno di un ciclo di potenza. Grazie alle caratteristiche termodinamiche dei fluidi organici questa tipologia d'impianto è adatta allo sfruttamento di sorgenti geotermiche a bassa temperatura.

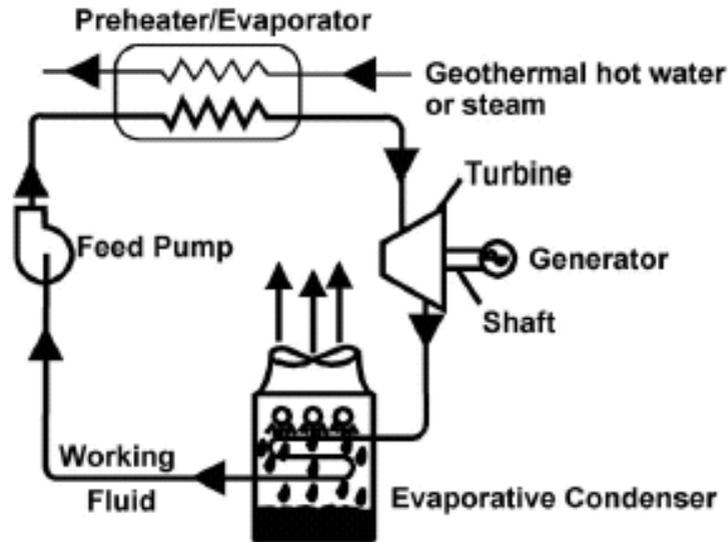
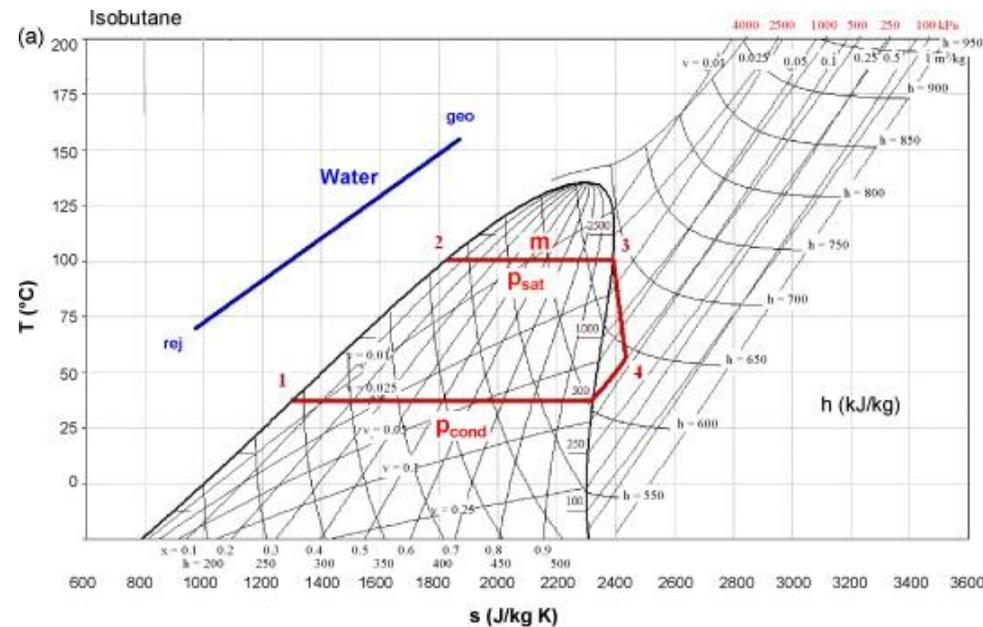


Figure 2. Schematic of the binary cycle (Rankine cycle) (Nichols, 1986).



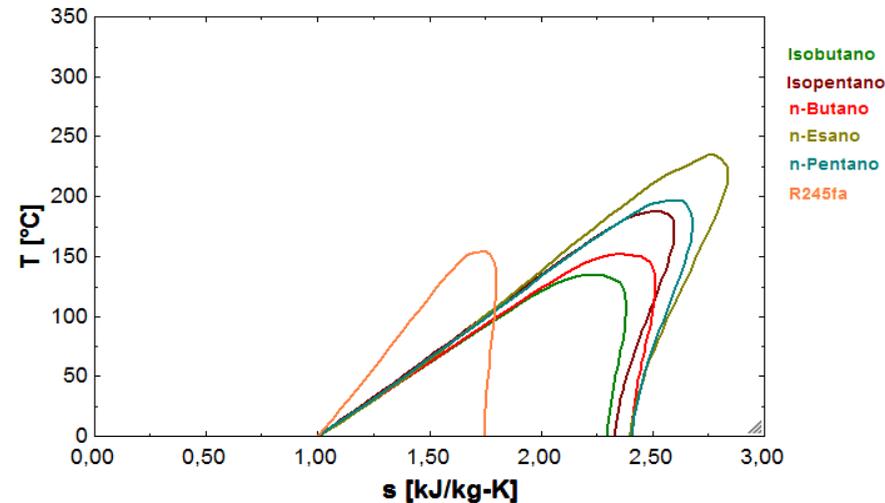
Rappresentazione ciclo termodinamico del fluido organico sul piano T-s Tratta da:

Franco A., Villani M. - Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, medium-temperature geothermal fields – Geothermics 2009

FLUIDI ORGANICI

I fluidi organici sono sostanze con elevato peso molecolare, calore latente di evaporazione inferiore rispetto all'acqua, basse temperature critiche e di ebollizione. Grazie a tali proprietà essi consentono di:

- ✓ Ridurre il **calore** richiesto durante la fase di **evaporazione**
- ✓ Ridurre il livello di **temperatura** e pressione **all'evaporatore**
- ✓ **Evitare** la presenza di **vapore saturo allo scarico della turbina** grazie alla pendenza positiva della curva limite superiore sul piano termodinamico T-s (fluidi *secchi*)
- ✓ Aumentare la **pressione di condensazione**
- ✓ Aumentare la **densità del fluido allo scarico dell'espansore**
- ✓ Ridurre le portate volumetriche
- ✓ Ridurre il rapporto d'espansione



Fluido	T _c [°C]	P _c [bar]
Isopentane	187,24	33,69
n-Butano	151,97	37,96
n-Esano	234,7	30,58
n-Pentano	196,54	33,64
Toluene	318,6	41,26
R245fa	154,01	36,51
Acqua	373,95	220,64

IMPIANTI BINARI

Sulla base delle caratteristiche dell'impianto di potenza, gli impianti binari si distinguono in:

- ✓ Impianti binari tradizionali
- ✓ Impianti binari a doppio livello di pressione
- ✓ Impianti binari a doppio fluido
- ✓ Impianti binari con ciclo Kalina



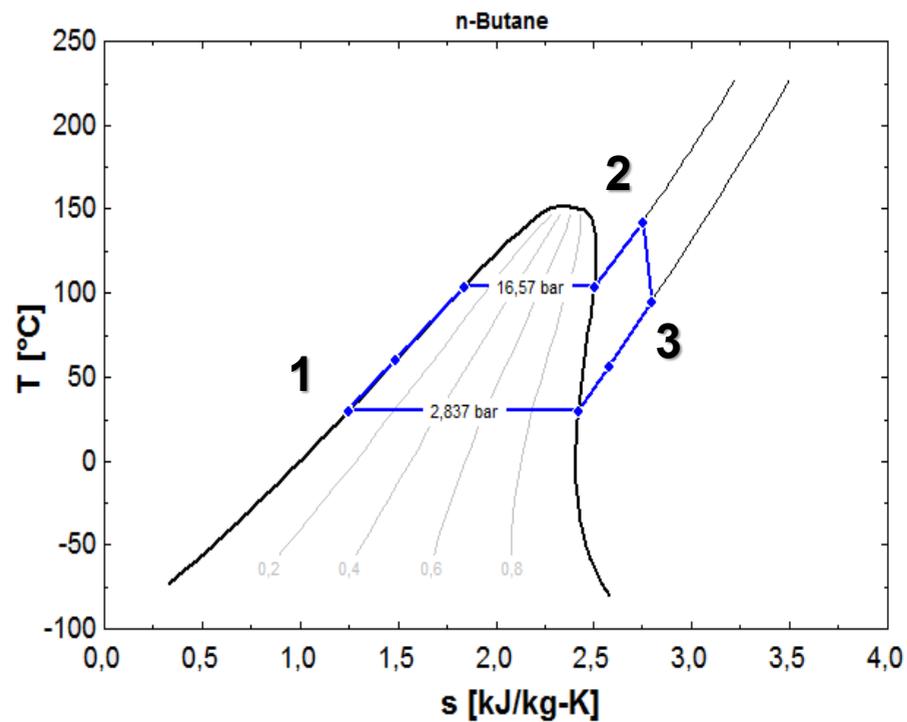
Enel Green Power Stillwater Hybrid Power Plant

Foto da:

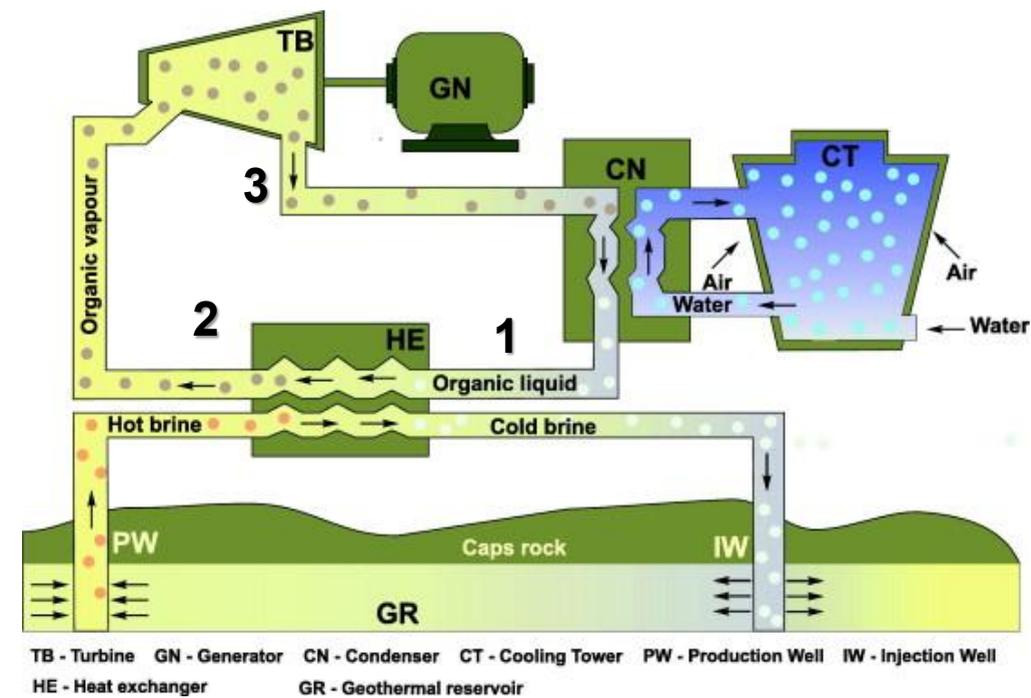
http://www.cleanenergyactionproject.com/CleanEnergyActionProject/CS.Enel_Green_Power_Stillwater_Hybrid_Power_Plant___Hybrid_Renewable_Energy_Systems_Case_Studies.html

IMPIANTI BINARI TRADIZIONALI

Il fluido geotermico, prelevato dal pozzo, è inviato in uno scambiatore di calore dove cede energia sotto forma di calore ad un fluido organico opportunamente scelto che evolve in un ciclo rankine tradizionale (ciclo ORC).



Rappresentazione ciclo termodinamico del fluido organico sul piano T-s



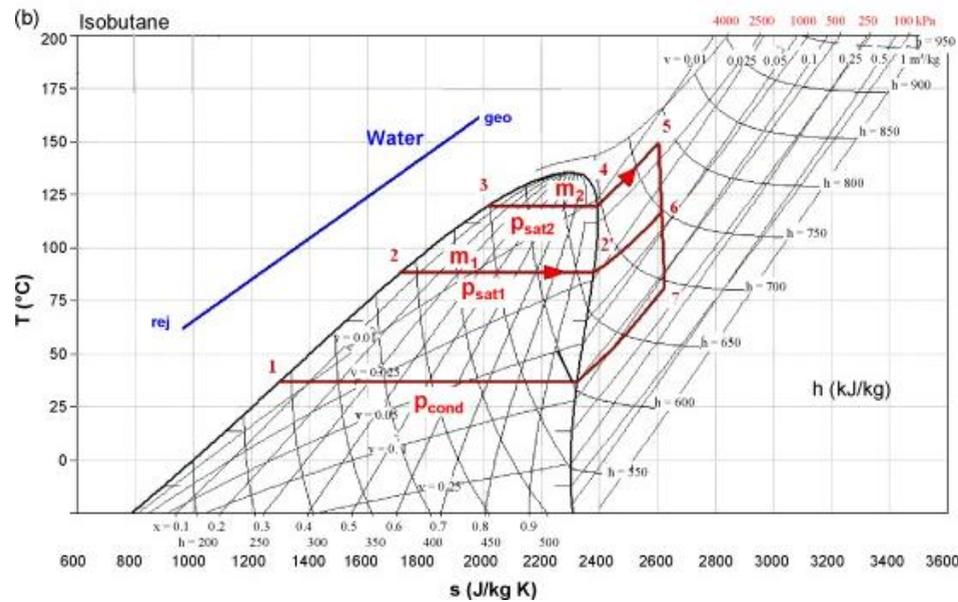
Rappresentazione schematica impianto binario

Tratta da:

Guzović Z. et Al.- Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia from medium-temperature geothermal sources – Applied Energy 2012

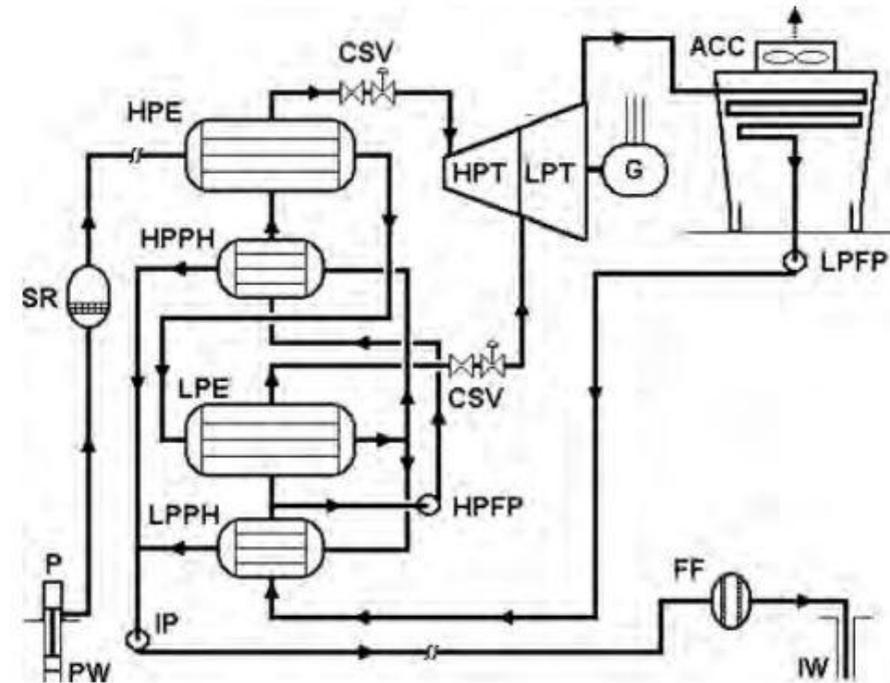
IMPIANTI ORC A DOPPIO LIVELLO DI PRESSIONE

Il liquido geotermico è inviato in **scambiatori di calore disposti in cascata** per riscaldare un fluido organico che evolve all'interno di un ciclo **Rankine a doppio livello di pressione**.



Rappresentazione ciclo termodinamico del fluido organico sul piano T-s

Tratta da:
 Franco A., Villani M. - Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, medium-temperature geothermal fields – Geothermics 2009

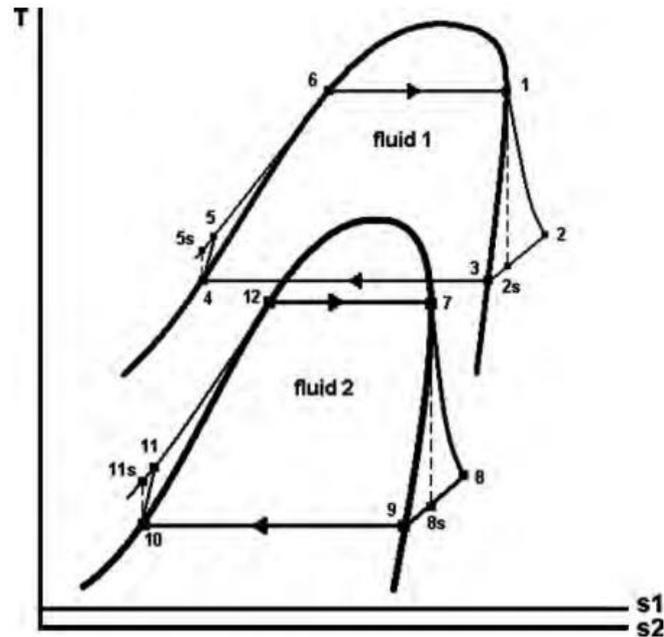


Rappresentazione schematica impianto binario con doppio livello di pressione

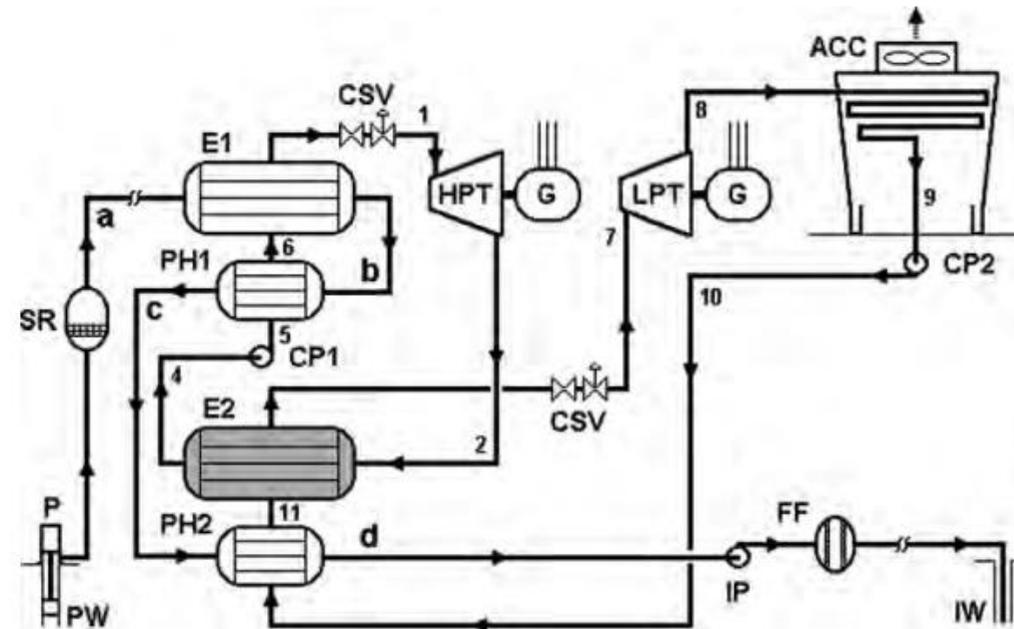
Tratta da:
 Geothermal Power Plants – Ronald Di Pippo

IMPIANTI BINARI A DOPPIO FLUIDO

Il liquido geotermico è utilizzato come sorgente calda per alimentare **due cicli rankine organici disposti in cascata**. Il ciclo di potenza adopera una **coppia di fluidi organici con proprietà differenti**: il fluido altobollente alimenta il ciclo superiore, quello bassobollente il ciclo ad esso sottoposto.



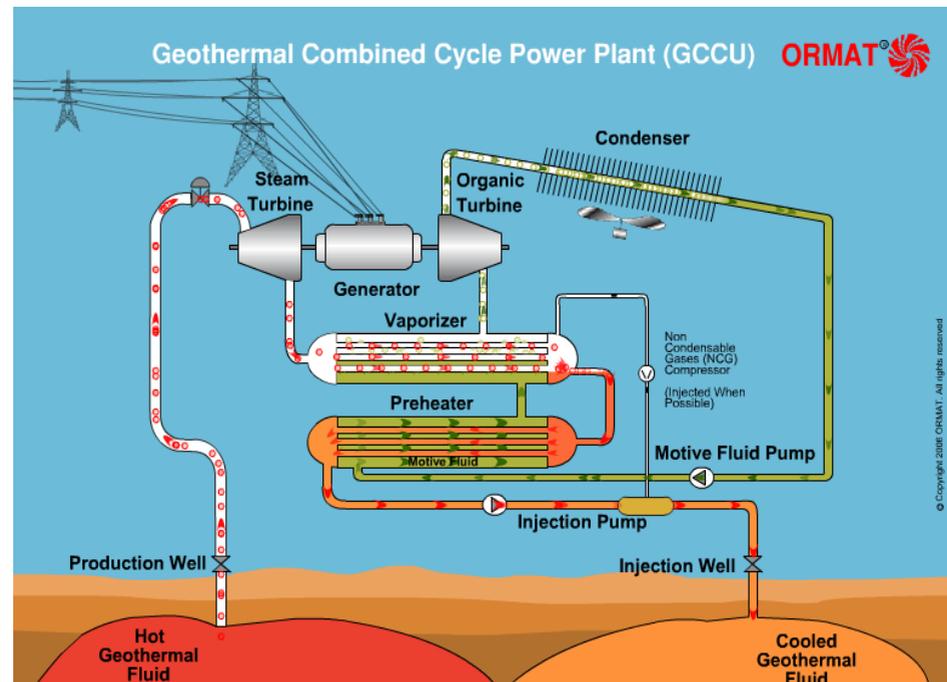
Rappresentazione ciclo termodinamico del fluido organico sul piano T-s per impianto binario a doppio fluido
Tratta da: Geothermal Power Plants – Ronald Di Pippo



Rappresentazione schematica impianto binario a doppio fluido
Tratta da: Geothermal Power Plants – Ronald Di Pippo

Si classificano come impianti ibridi tutti gli impianti geotermici caratterizzati da configurazioni impiantistiche basate sull'accoppiamento dei sistemi flash o dry-steam con quelli binari.

Impianto ibrido Dry Steam-Binario

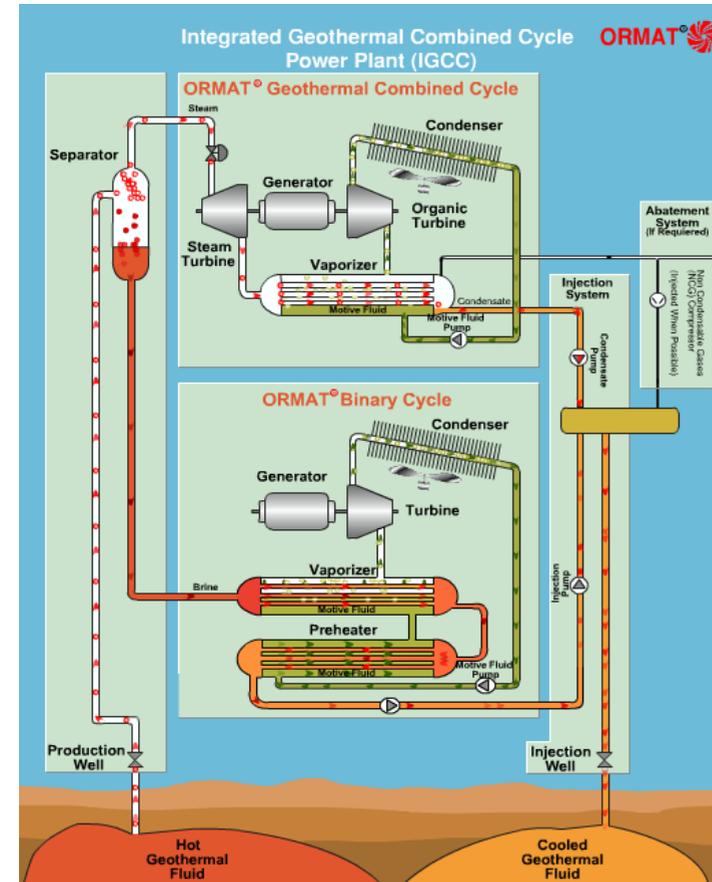


Rappresentazione schematica impianto ibrido dry steam-binario

Tratta da: Ormat website

IMPIANTI IBRIDI

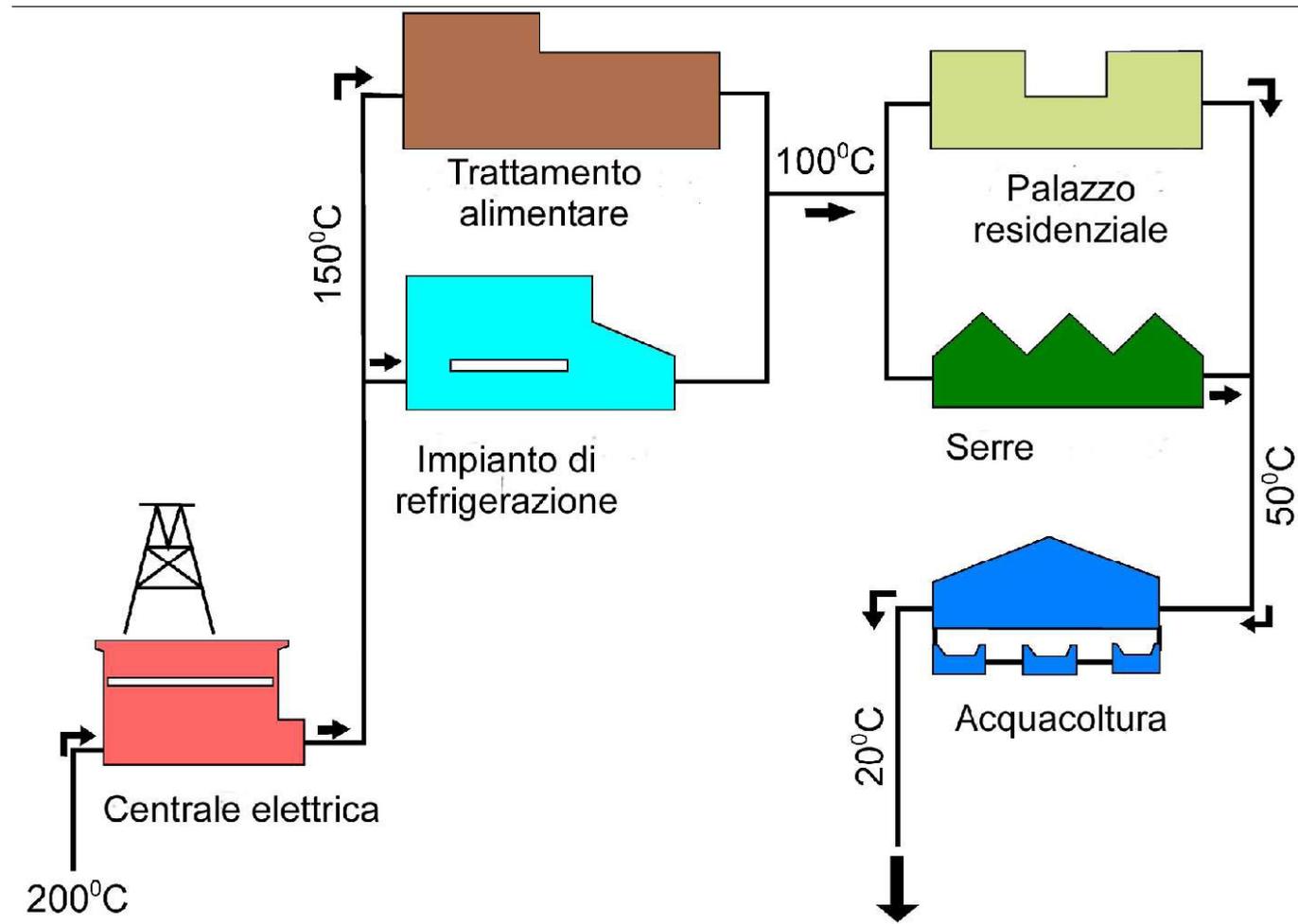
Impianto ibrido Flash-Binario



Rappresentazione schematica impianto ibrido flash-binario

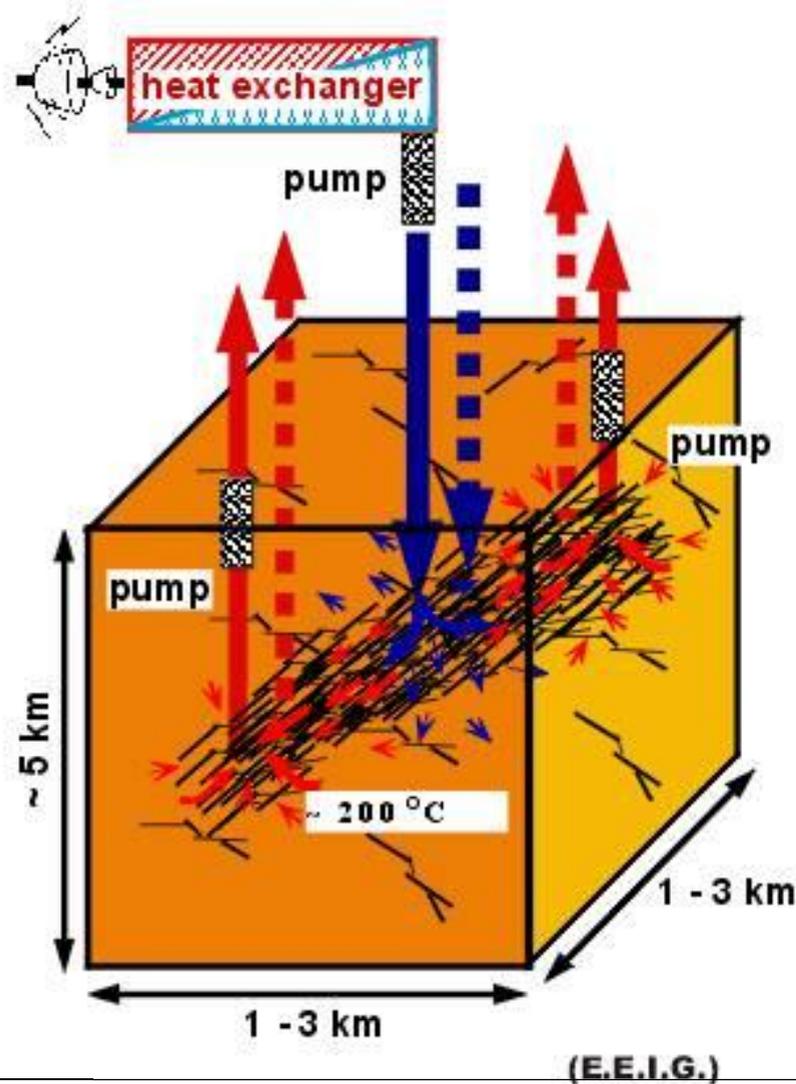
Tratta da: Ormat website

UTILIZZAZIONE A CASCATA DI FLUIDI GEOTERMICI



Esempio di utilizzazione a cascata dei fluidi geotermici (Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, USA)

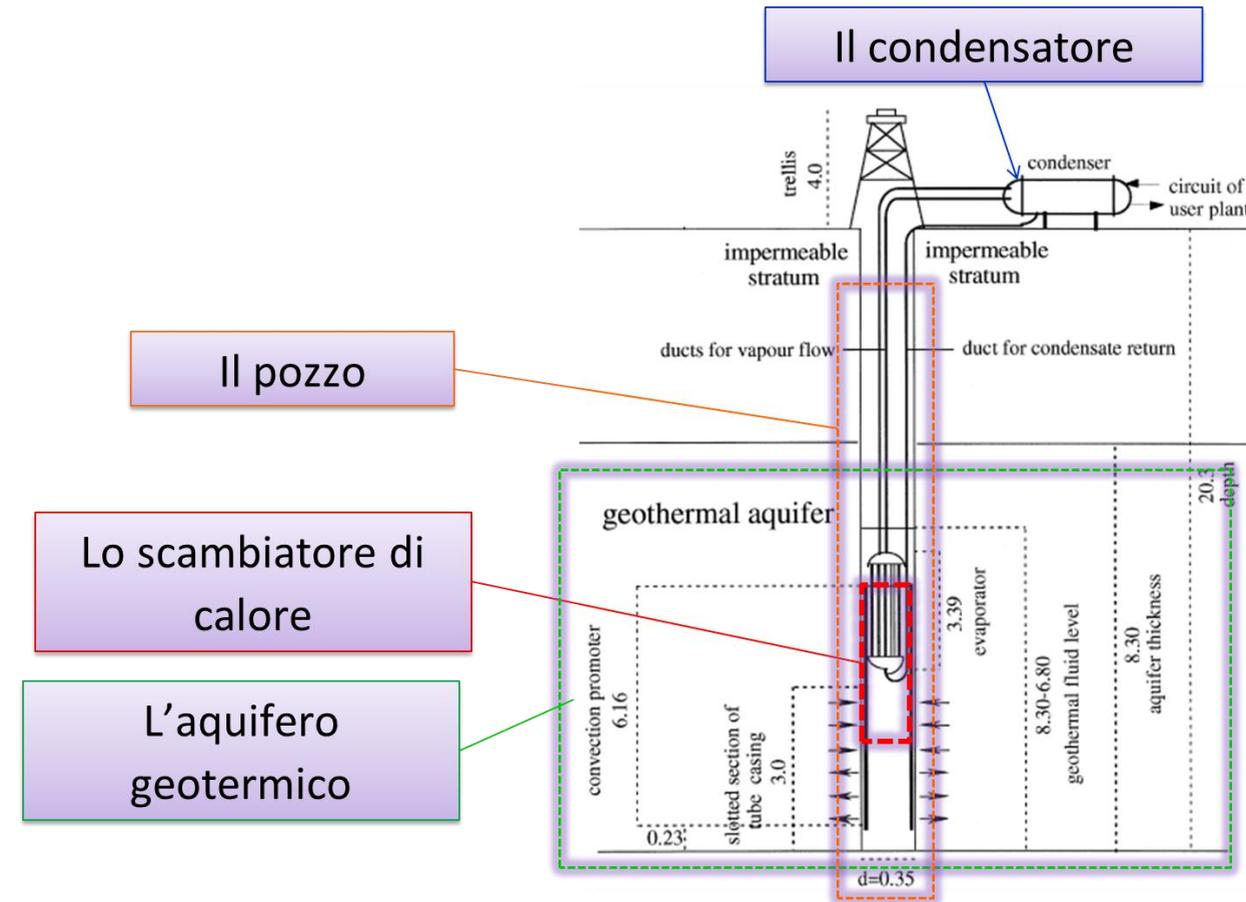
EGS ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEMS



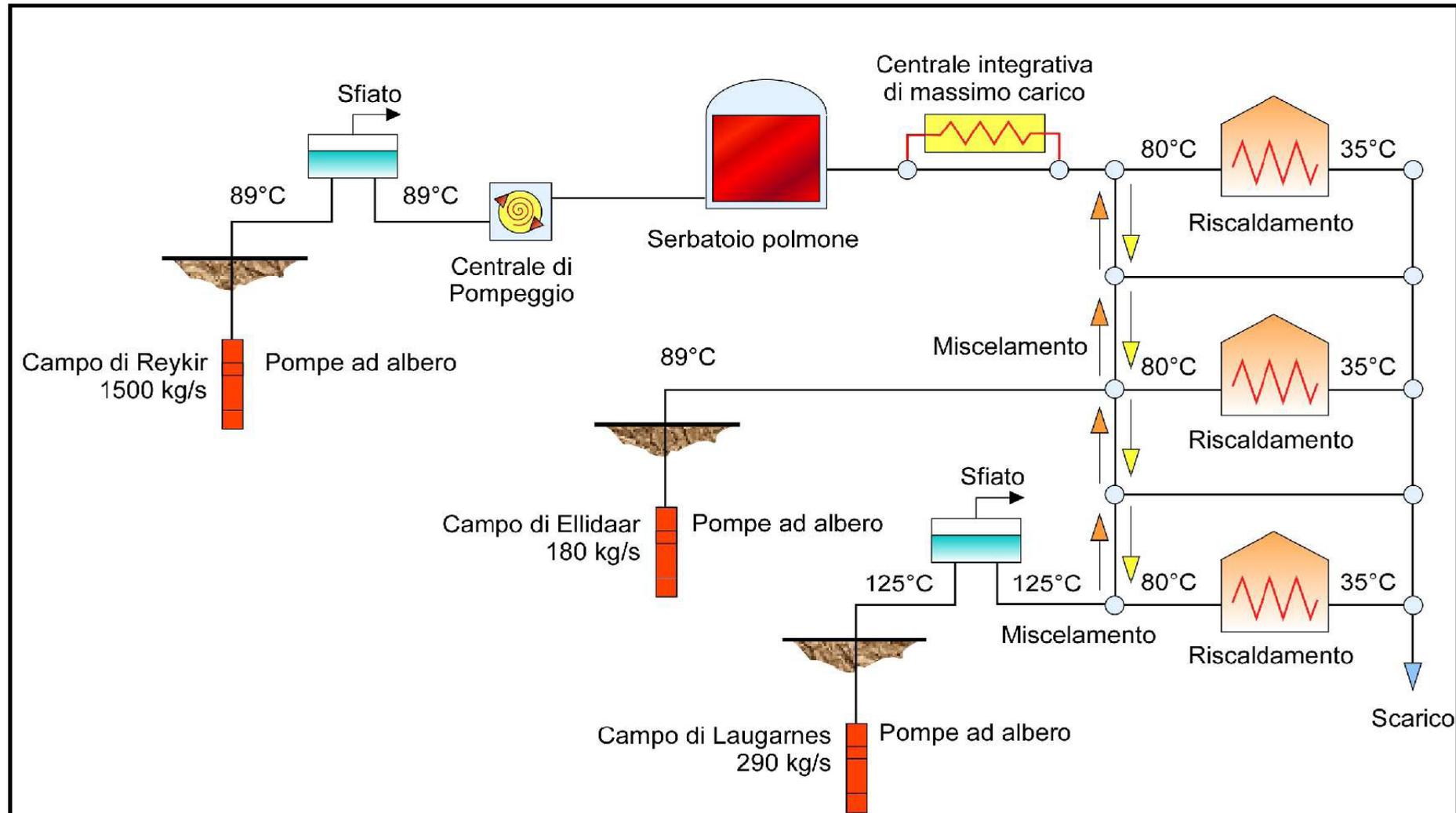
- Entro 5 km di profondità i corpi granitici sono tutti più o meno attraversati da fratture e fessure naturali
- Effettuando interventi di micropressurizzazione o producendo elevati shock termici iniettando fluidi a bassa temperatura nell'ammasso roccioso, si genera un incremento della fratturazione della roccia aumentando considerevolmente la trasmissività idraulica
- È possibile effettuare tali interventi anche su sistemi HDR (rocce calde secche) esistenti incrementandone la produttività
- Allo stato attuale esistono alcuni progetti pilota: Soultz, Cooper Basin, Bale e Coso.

DOWN HOLE EXCHANGERS

- La necessità di differenziare l'utilizzo delle fonti energetiche fa crescere l'interesse verso lo sfruttamento di energia geotermica a bassa entalpia (30-90°C)
- Quando il fluido viene prelevato dall'aquifero (serbatoio), deve essere poi reiniettato in pressione nell'aquifero. Questo rappresenta un **costo aggiuntivo di funzionamento**.
- Gli scambiatori di calore down-hole sono utilizzati per sfruttare l'energia dall'aquifero **senza prelevare il fluido**, risparmiando quindi sul consumo di energia elettrica e sulla manutenzione.



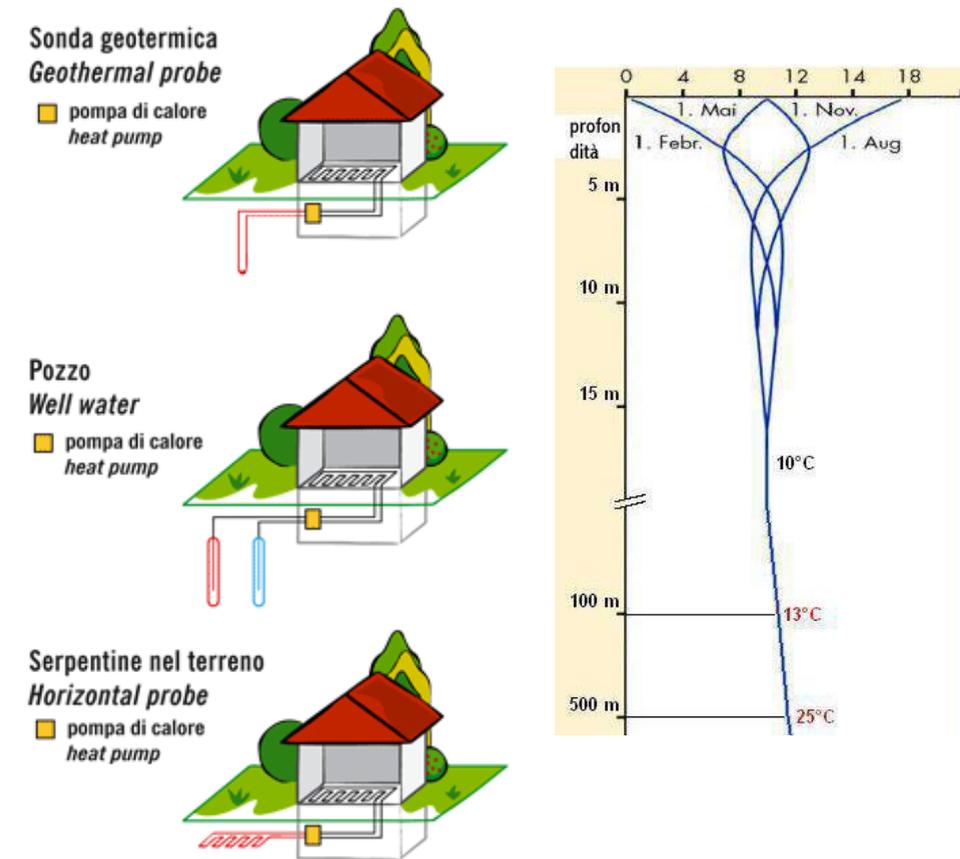
IL TELERISCALDAMENTO DA FONTI GEOTERMICHE



Schema semplificato del sistema di riscaldamento geotermico di un complesso di edifici a Reykjavik, Islanda (da Gudmundsson, 1988).

SORGENTI GEOTERMICHE A BASSA ENTALPIA

- A una certa profondità, la temperatura del suolo si stabilizza ad un valore molto vicino alla **temperatura media annuale** dell'aria.
- I **tubi orizzontali** sono installati a una profondità ridotta (0,8 ÷ 1,5 m) e di solito si trovano sotto una vasta area priva di edifici.
- I **tubi** sono:
 - ✓ rettilinei (con disposizione densa in serie o in parallelo);
 - ✓ a spirale (con la disposizione di più tubi in circuiti paralleli e il riempimento dello scavo con sabbia);
 - ✓ alettati.
- I tubi devono resistere alla corrosione per periodi molto lunghi. Per questo motivo in passato sono stati spesso utilizzati tubi in rame, mentre più recentemente sono state preferite **materie plastiche** come il polietilene ad alta densità e il polibutilene rinforzato.
- Le **tubazioni verticali** utilizzano una o più perforazioni da valori minimi di 10 m a valori massimi che possono superare anche i 100 m. A tali profondità, le temperature sono difficilmente influenzate dagli effetti superficiali



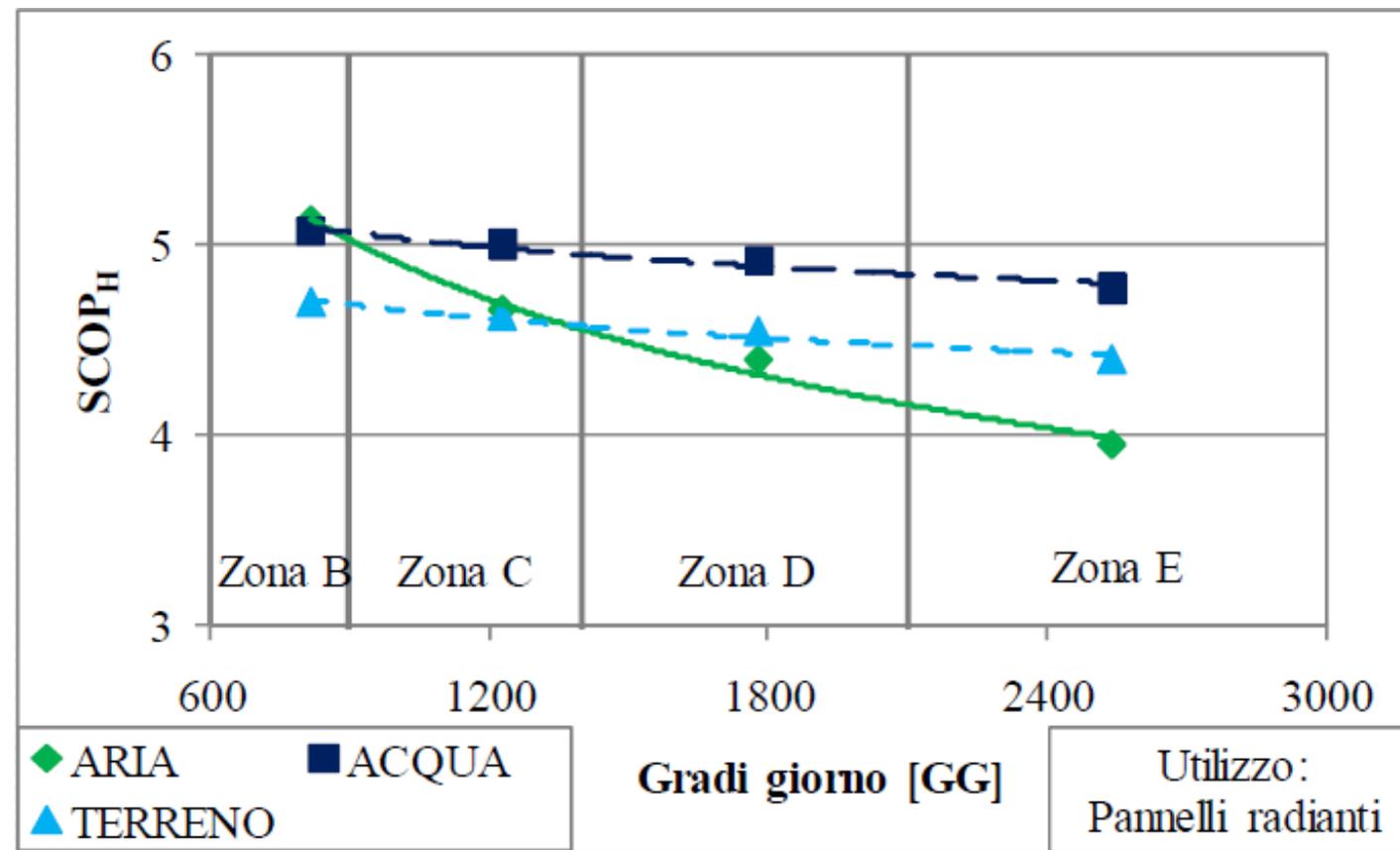
Potenze termiche tipicamente disponibili:

- sonde verticali: da 20 a 100 W/m
- sonde orizzontali: da 10 a 20 W/m²

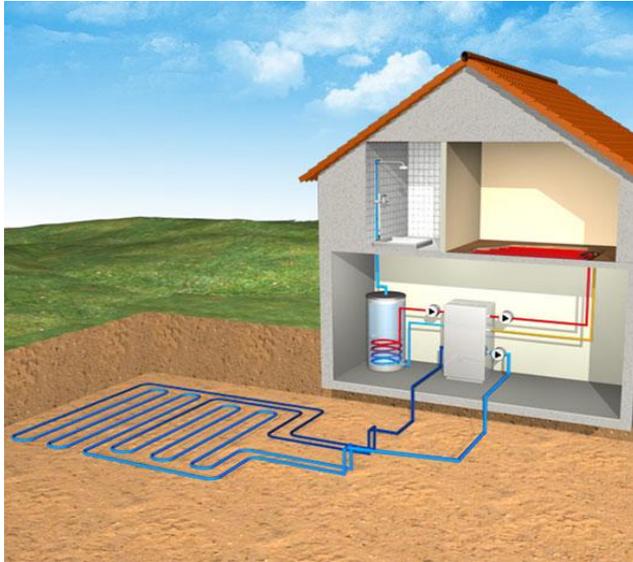
IL COP DELL POMPE DI CALORE GEOTERMICHE

Fascia	Da [GG]	A [GG]	Ore giornaliere ^[7]	Data inizio ^[7]	Data fine ^[7]	Numero comuni
A	0	600	6	1° dicembre	15 marzo	2
B	601	900	8	1° dicembre	31 marzo	157
C	901	1400	10	15 novembre	31 marzo	989
D	1401	2100	12	1° novembre	15 aprile	1611
E	2101	3000	14	15 ottobre	15 aprile	4271
F	3001	+∞	nessuna limitazione (tutto l'anno)			1071

Zona climatica	Gradi giorno	Alcuni esempi	Periodo di riscaldamento
	F oltre 3000	Trento, Belluno, Cuneo	nessun limite (tutto l'anno)
E da 2101 a 3000	Milano, Torino, Bologna	15 Ottobre - 15 Aprile	
D da 1401 a 2100	Roma, Firenze, Genova, Ancona	1 Novembre - 15 Aprile	
C da 901 a 1400	Napoli, Bari, Cagliari	15 Novembre - 31 Marzo	
B da 601 a 900	Catania, Palermo, Reggio Calabria	1 Dicembre - 31 Marzo	
A fino a 600	Lampedusa, Linosa, Porto Empedocle	1 Dicembre - 15 Marzo	



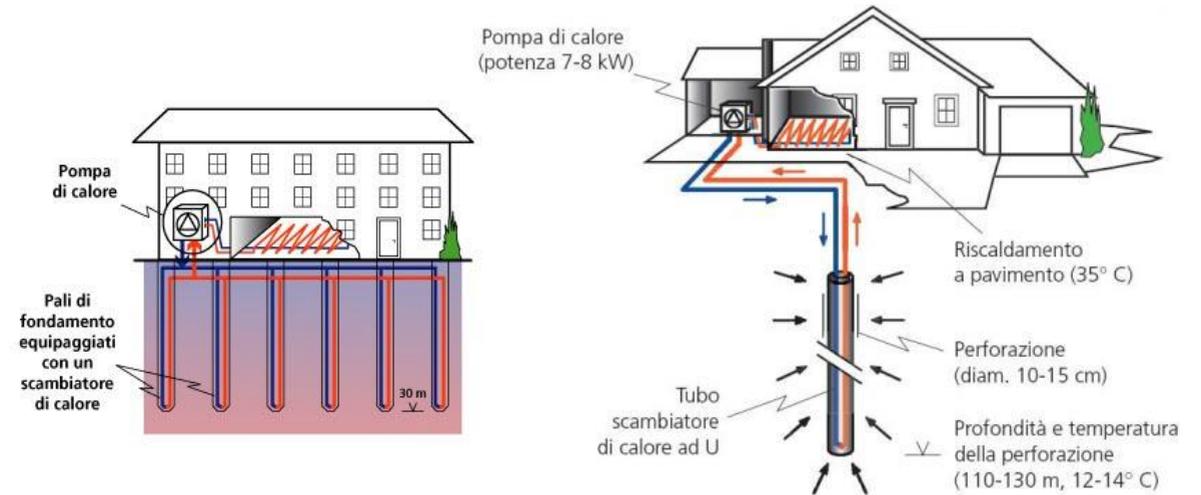
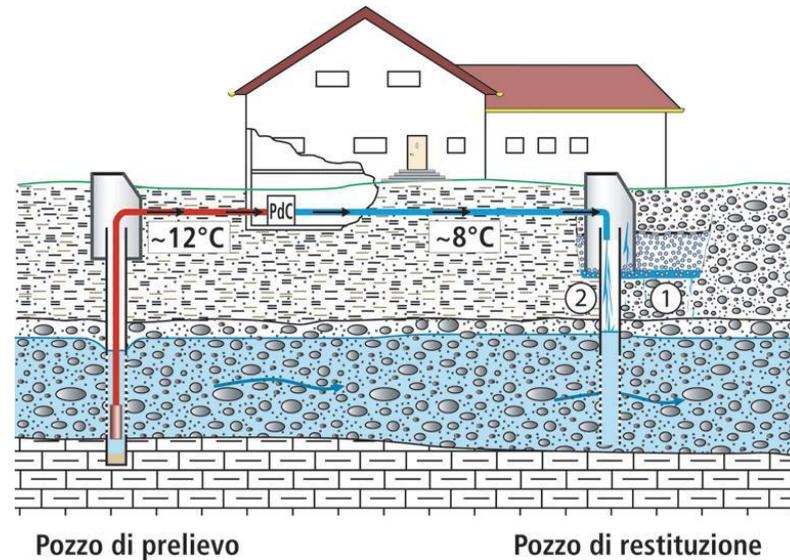
TIPOLOGIE DI POMPE DI CALORE GEOTERMICHE



Sonde orizzontali

- ▶ Sono ideali per terreni umidi e sabbiosi
- ▶ Installate a circa 1,0-1,2 m
- ▶ Distanze minime:
 - ▶ 1 m dalle tubature dell'acqua
 - ▶ 1 m dalla fondazione
 - ▶ 50-80 cm tra i tubi
- ▶ Non possono essere asfaltati

Acqua di falda



Riscaldamento di un'abitazione familiare con una sonda geotermica accoppiata ad una pompa di calore

Sonde verticali

- ▶ Diametro del foro: circa 15 cm
- ▶ Distanza minima tra le forature: 8-10 m
- ▶ Per ogni sonda si ottengono da 20 a 100 W/m
- ▶ Profondità compresa tra 60 e 150 m



POMPE DI CALORE GEOTERMICHE: ASPETTI TECNICI ED ECONOMICI

- ✓ Per sonde orizzontali è necessaria in media una superficie di terreno pari a 2÷2,5 volte l'area netta da riscaldare, per il solo riscaldamento, o 3÷3,5 volte l'area netta da riscaldare se è previsto anche il raffrescamento estivo; il costo per la posa delle tubazioni è dell'ordine di **20-40 € per m² di terreno da sbancare** (rif.: area di 1.000 m², profondità di 2,5 m, posa in trincee).
- ✓ Per sonde verticali, il costo è compreso tra **40 e 65 € per metro di profondità** (tubi a U o a doppia U).
- ✓ Gli extra-costi, in buona misura dovuti alle opere di posa delle tubazioni esterne, sono molto variabili, ma mediamente si aggirano intorno 40-50% del costo di un impianto tradizionale (ad esempio, per un'abitazione unifamiliare da 120/130 m² => potenza termo-frigorifera intorno ai 10-12 kW, il costo complessivo è tipicamente intorno ai 20.000 €; un sistema caldaia a condensaz. – chiller elettrico costerebbe circa 12.000 €, una pompa di calore aria-acqua intorno ai 14.000 €).



- ✓ **Per il funzionamento in pompa di calore, l'investimento può essere interessante in climi rigidi.**
- ✓ **Per il funzionamento in raffrescamento, l'investimento può essere interessante soprattutto in climi molto caldi**