

Media e bassa entalpia geotermica: quali opportunità per i territori?

Tecnologie di utilizzazione dell'energia geotermica: risorse a medio-bassa entalpia



ing. Maurizio Vaccaro
Dottorando

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni - DESTEC

Università di Pisa

ENERGEA



Sommario

Introduzione

La risorsa geotermica

- Caratterizzazione e classificazione
- Aspetti tecnologici e ambientali

Classificazione degli impianti

- Impianti geotermoelettrici per risorse a medio-alta entalpia
- Impianti a ciclo binario (ORC)
Gestione sostenibile della risorsa

Usi diretti della geotermia

- Usi diretti del calore geotermico
- Impianti a pompa di calore geotermica
- Tipologie di geoscambiatori
- La situazione in Toscana



Classificazione dei serbatoi geotermici in base al contenuto energetico

(bassa – media – alta entalpia)

Table 1

Classification of geothermal resources by temperature (Dickson and Fanelli, 1990)

	Source ^a			
	(a)	(b)	(c)	(d)
Low enthalpy	< 90°C	< 125°C	< 100°C	< 150°C
Intermediate	90–150	125–225	100–200	–
High enthalpy	> 150	> 225	> 200	> 150

^a Source: (a) Muffler and Cataldi, 1978; (b) Hochstein, 1990; (c) Benderitter and Cormy, 1990; (d) Haenel et al., 1988.

Classificazione dei serbatoi geotermici in base al fluido estratto

Campi a vapore

- Solo 6 nel mondo: Italia (Larderello), USA (Geysers, CA), Islanda, Indonesia, Nuova Zelanda
- Sistema di condensazione a liquido
- Impatti ambientali elevati (CO₂, H₂S, inquinamento termico)

Liquido a $T > 160$ °C

- Flash : Sistema di condensazione a liquido
- Possibilità di combinazione flash - binario

Liquido 100 °C $< T < 160$ °C

- Impianti a ciclo binario (ORC)
- 100% rigenerazione dei pozzi
- Possibilità di utilizzazione condensatori ad aria (torri evaporative a secco)
- Ridotte emissioni inquinanti
- Elevati costi di installazione

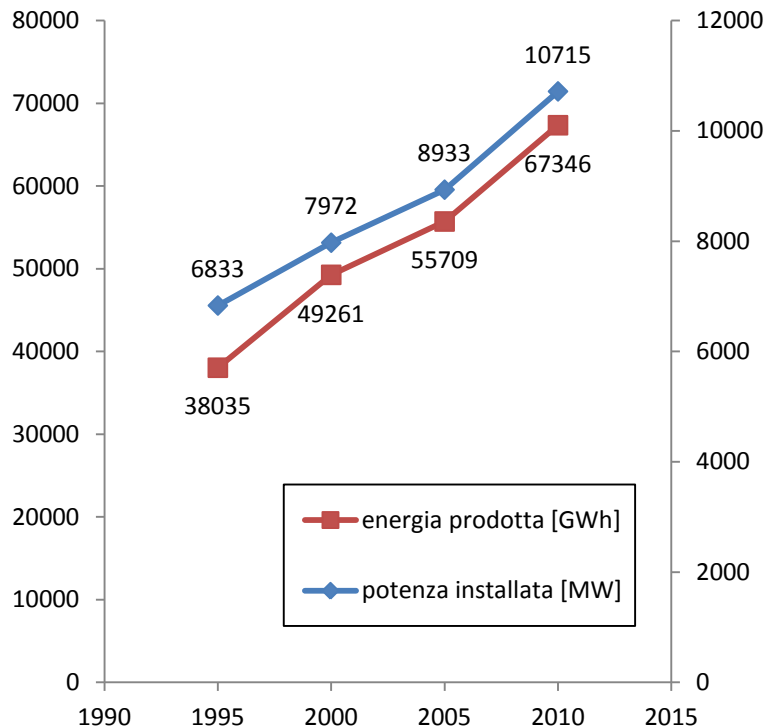
Campi a vapore dominante

- Vapore 90% - 98%
- Gas 2 % - 10%

Campi ad acqua dominante

- Fase liquida 20% - 100% del totale estratto

Introduzione

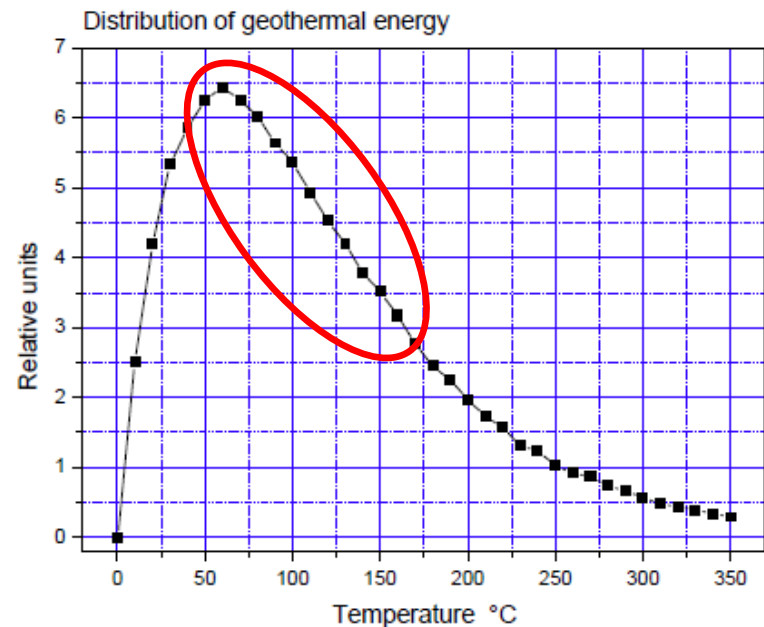


from R. Bertani, "Geothermal Power Generation in the World 2005–2010 Update Report"

- Impianti in grado di **operare per tempi molto lunghi** rispetto alle altre fonti rinnovabili

- Produzione e potenza installata "marginale" rispetto alle altre rinnovabili

✓ Circa 10000 MW installati nel mondo (solo in Germania più di 24000 MW di eolico)



Calcolo della distribuzione dell'energia geotermica a livello mondiale in funzione della temperatura della risorsa (da Stefansson V., "World geothermal assessment", Proceedings World Geothermal Congress 2005)

La risorsa geotermica – Valutazione del potenziale geotermico

Stato dell'arte: osservazioni generali

- ❑ **Non esiste una metodologia di valutazione condivisa, esistono però concetti e metodi ritenuti basilari ed affidabili a cui fare riferimento.**
- ❑ *Molti studi riguardano specifiche regioni geografiche di interesse, piuttosto che l'elaborazione di tecniche d'indagine generali*

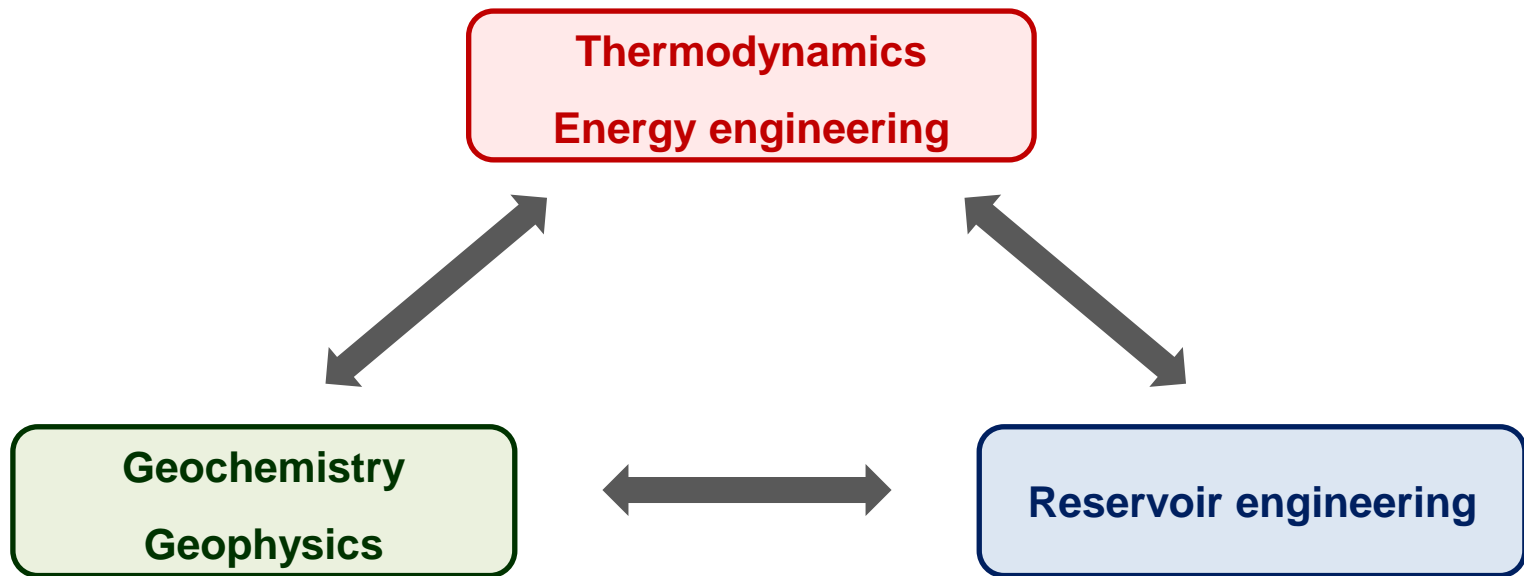
Obiettivi

- ❑ **Energia immagazzinata; temperatura, pressione e portata del fluido estraibile; composizione chimica e salinità del fluido estratto e della fase gassosa; pozzi (numero, distanze reciproche e mutue interferenze); intervallo di tempo dopo il quale si presenterà un abbassamento della portata o dell'energia termica estratta; eventuali pozzi di compensazione; strategia di reiniezione**
- ❑ Oltre a definire la risorsa “di base”, è fondamentale **valutare la porzione di risorsa estraibile e utilizzabile in condizioni (tecniche – economiche – ambientali) favorevoli**

Studio del **sistema globale “IMPIANTO – POZZI – SERBATOIO”**
le loro reciproche connessioni e gli scambi con l'ambiente

La risorsa geotermica – Multidisciplinarietà

Problema multidisciplinare – Approccio integrato



Ottimizzazione del sistema globale “impianto – serbatoio”

Strumenti principali: tecniche di caratterizzazione della risorsa, simulazione numerica del serbatoio, ottimizzazione della strategia di produzione-reiniezione, ottimizzazione dell’impianto di produzione di energia

Impianti geotermici per la produzione di energia elettrica

Impianti a espansione diretta

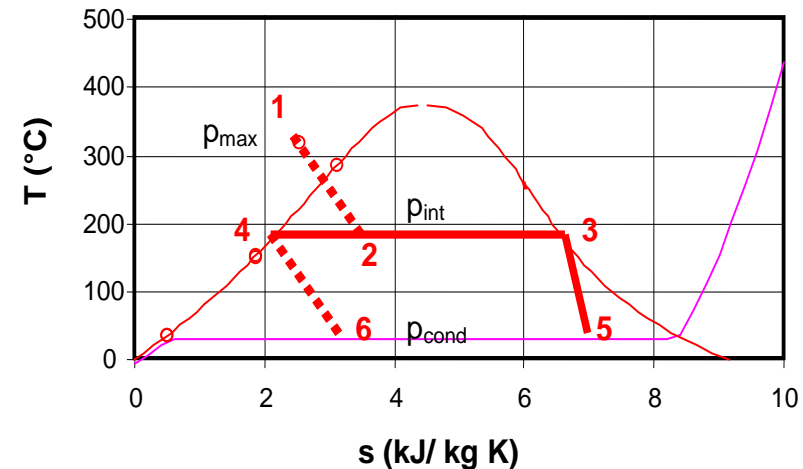
- Espansione diretta del vapore estratto a pressione atmosferica o inferiore
- Impiantistica tradizionale degli impianti a vapore (taglie impiantistiche standard 10-20-40-60 MW)

Impianti con separazione del vapore

- Impianti a **singolo flash**
- Impianti a **doppio flash**
- Impianti a ciclo combinato (flash + binario)

Impianti a ciclo binario

- Fluido geotermico completamente reiniettato
- Emissioni nulle di sostanze nell'ambiente
- Problema del raffreddamento a secco e consumo degli ausiliari



Impianti geotermici per la produzione di energia elettrica

Rendimenti e parametri di merito

Efficienza di primo principio

(First Law efficiency)

$$\eta_I = \frac{W_{net}}{\dot{m}_{geo} (h_{in} - h_{rej})}$$

Efficienza di secondo principio

(Second Law efficiency)

$$\eta_{II} = \frac{W_{net}}{\dot{m}_{geo} [(h_{in} - h_0) - T_0 (s_{in} - s_0)]_{geo}}$$

Produttività dell'impianto geotermico

(Specific consumption of geothermal brine)

$$\beta = \frac{\dot{m}_{geo}}{W_{net}} \left[\frac{kg}{MJ} \right]$$

Impianti a ciclo binario (Organic Rankine Cycle, ORC)

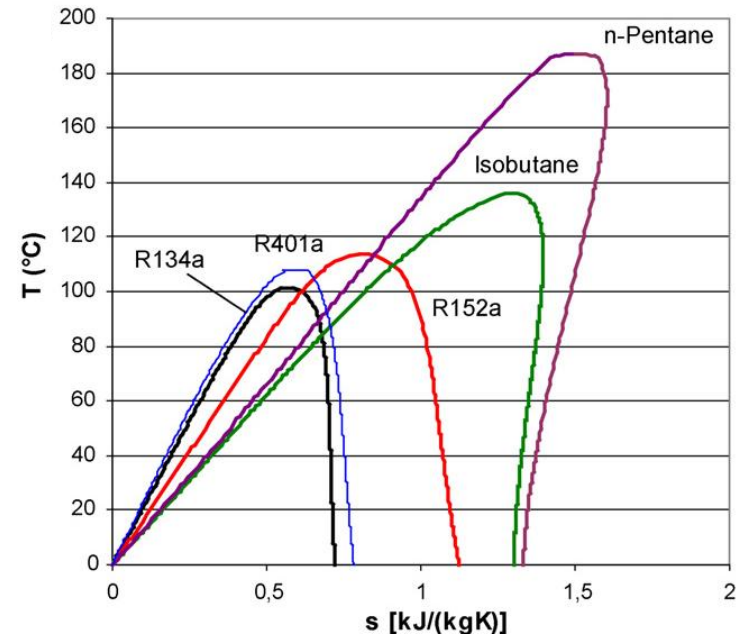
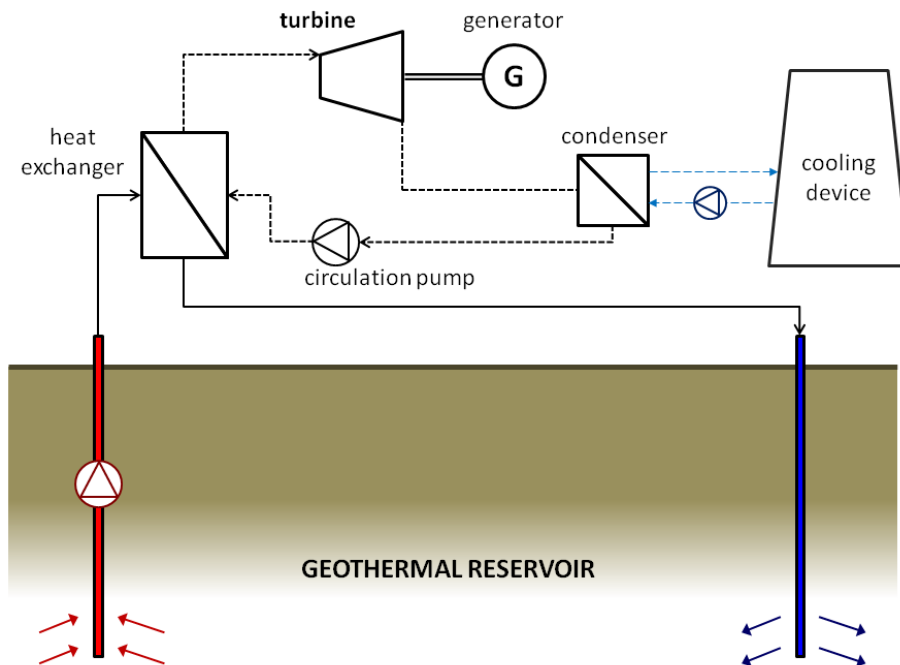
- ❑ Possibilità di **sistemi modulari** (prospettiva di standardizzazione e maggiore diffusione)
- ❑ Maggiori costruttori: ORMAT, Turboden, UTC, Mafi Trench, Cryostar
- ❑ Possibilità di utilizzo in **impianti geotermici a ciclo combinato**
- ❑ ORC – Tecnologia utilizzata per cicli “bottoming” per recupero di calore e cascami termici (anche da altre fonti rinnovabili, es.: biomasse)
- ❑ Soluzioni per il raffreddamento: a secco o con torri a umido



Impianti a ciclo binario (Organic Rankine Cycle, ORC)

- **ORC e Kalina** : tecnologie di riferimento per $T < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
- **L'attenzione viene sempre più rivolta a giacimenti a temperature inferiori**
- Le prestazioni degli impianti ORC sono fortemente condizionate da $\Delta T = (T_{\text{prelievo}} - T_{\text{reiniezione}})$ e **portata**

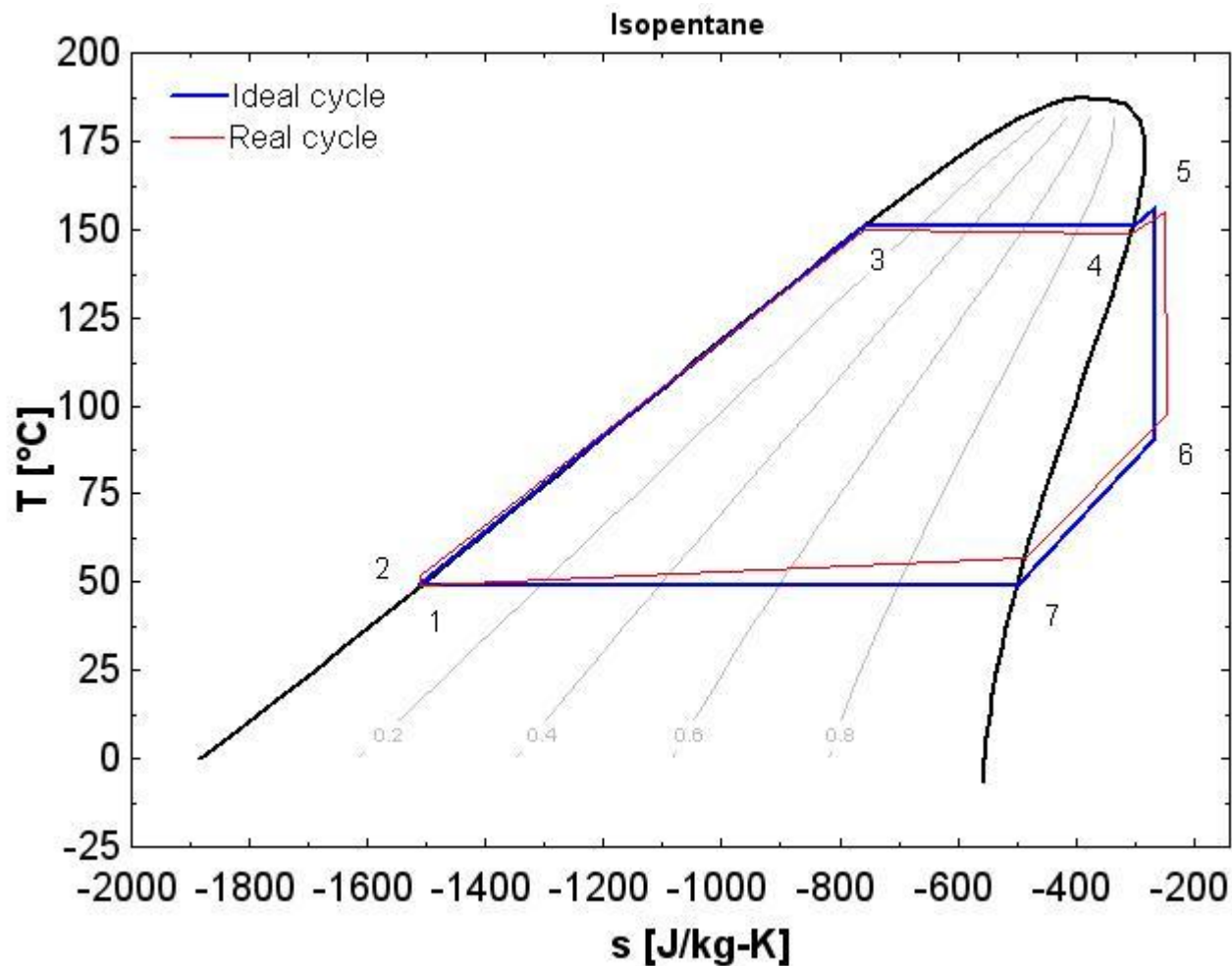
✓ **100 % estrazione/reiniezione di fluido geotermico!**



- La **T di reiniezione** è limitata inferiormente dai fenomeni chimici di scaling
- La **corretta caratterizzazione della risorsa** è tanto più importante nel caso di impianti a ciclo binario (a media entalpia), le cui prestazioni e la cui operatività risentono maggiormente delle variazioni dei parametri esterni

Impianti a ciclo binario (Organic Rankine Cycle, ORC)

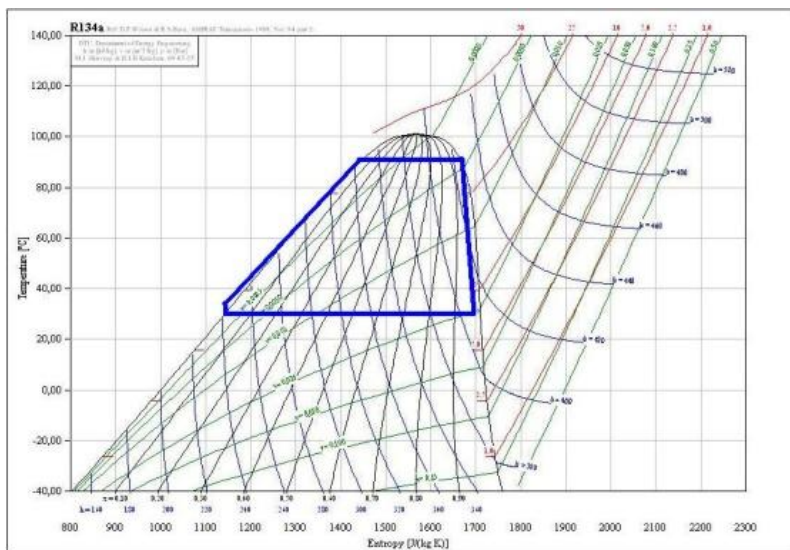
Ciclo termodinamico



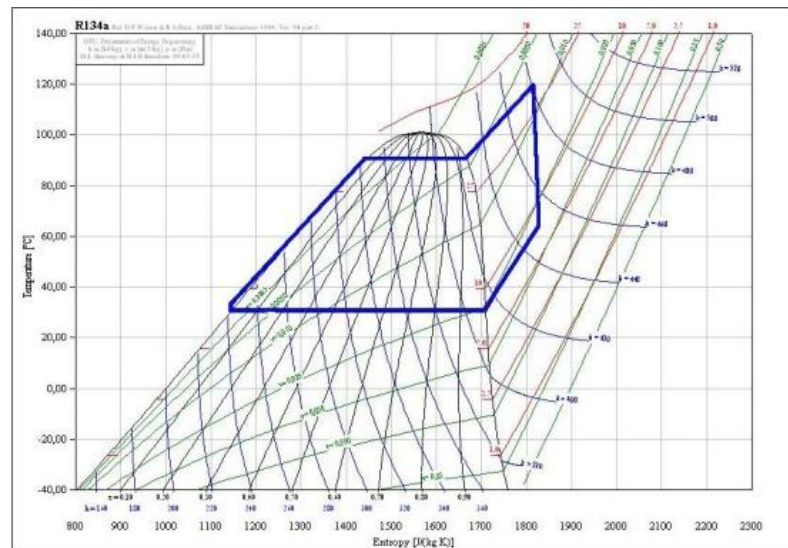
Rappresentazione sul piano T – s del ciclo Rankine (ideale e reale),
con surriscaldamento del vapore, fluido: isopentano

Impianti a ciclo binario (Organic Rankine Cycle, ORC)

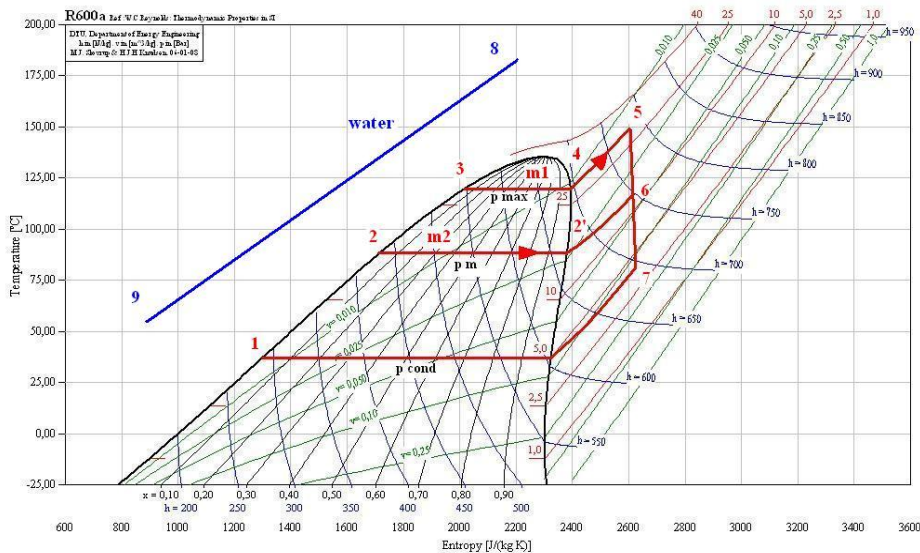
Rankine



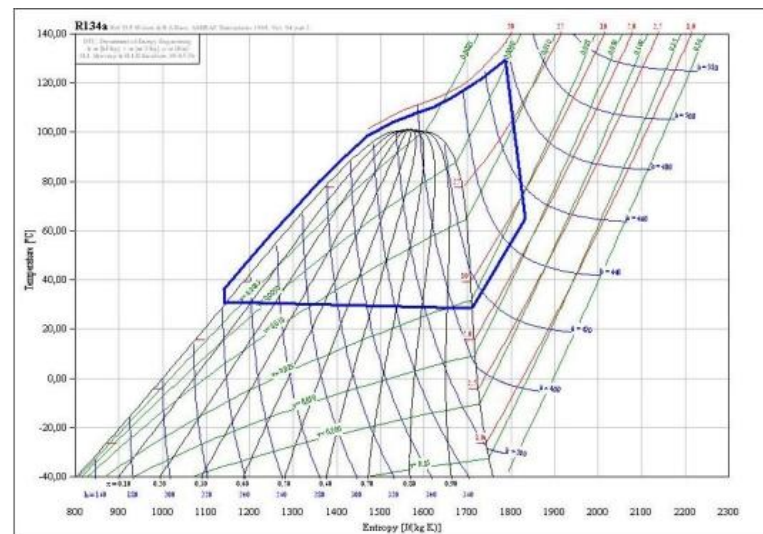
Hirn (Rankine con surriscaldamento)



2 livelli di pressione

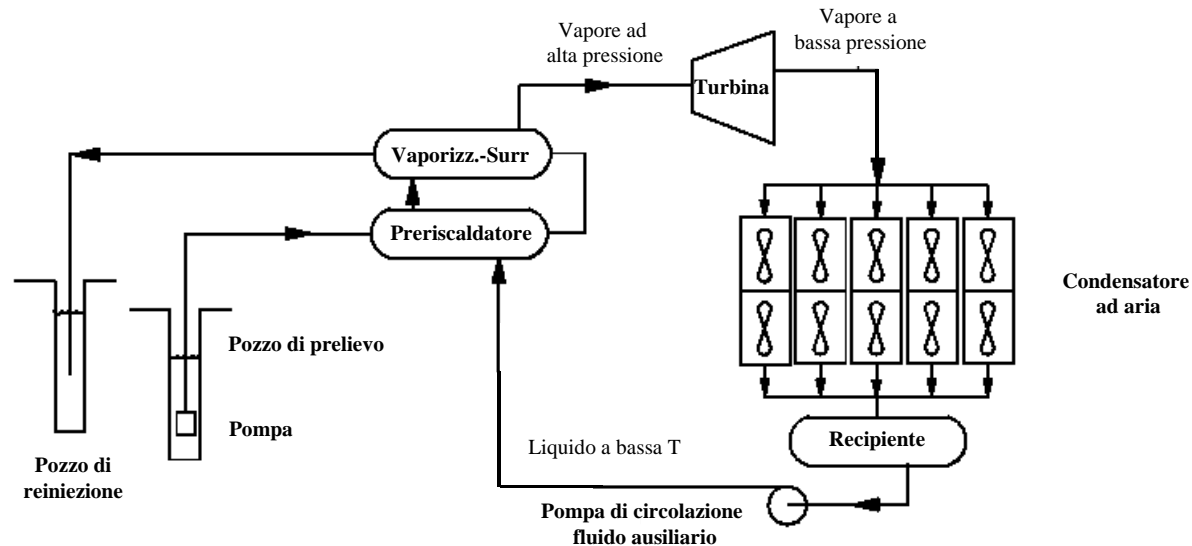
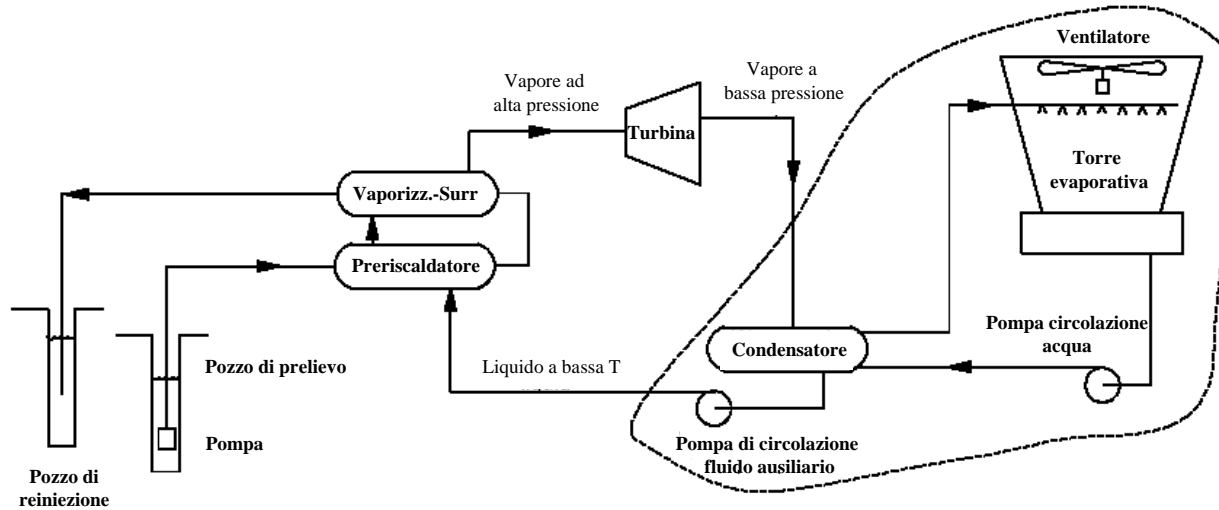


Ciclo Rankine supercritico



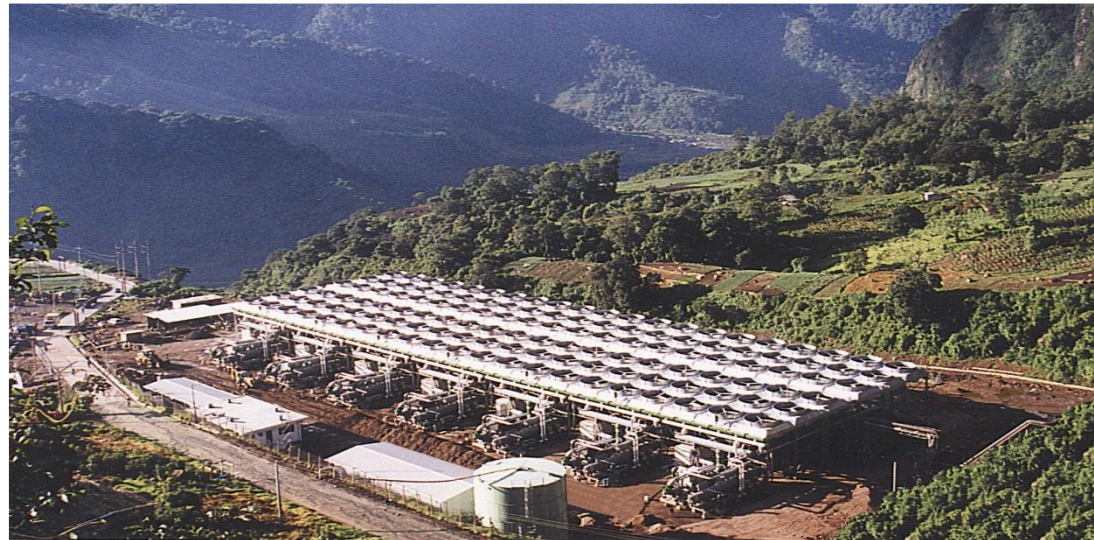
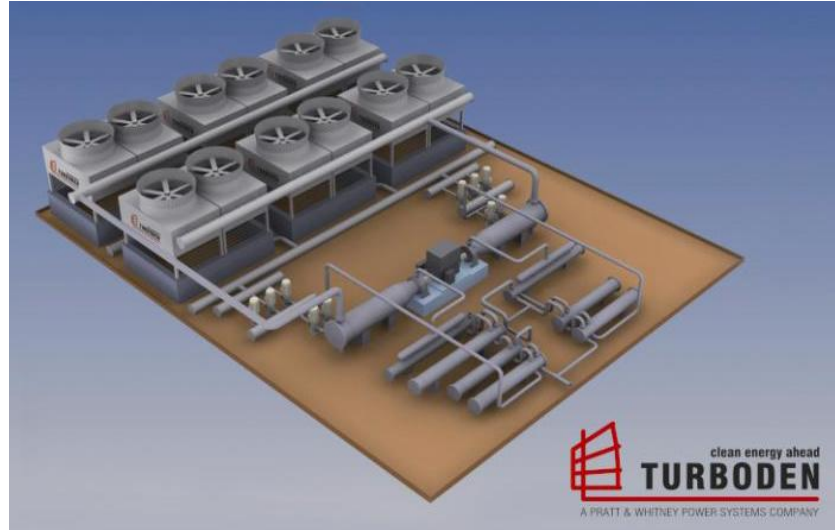
Impianti a ciclo binario (Organic Rankine Cycle, ORC)

Il problema del raffreddamento (condensazione ad acqua o ad aria)



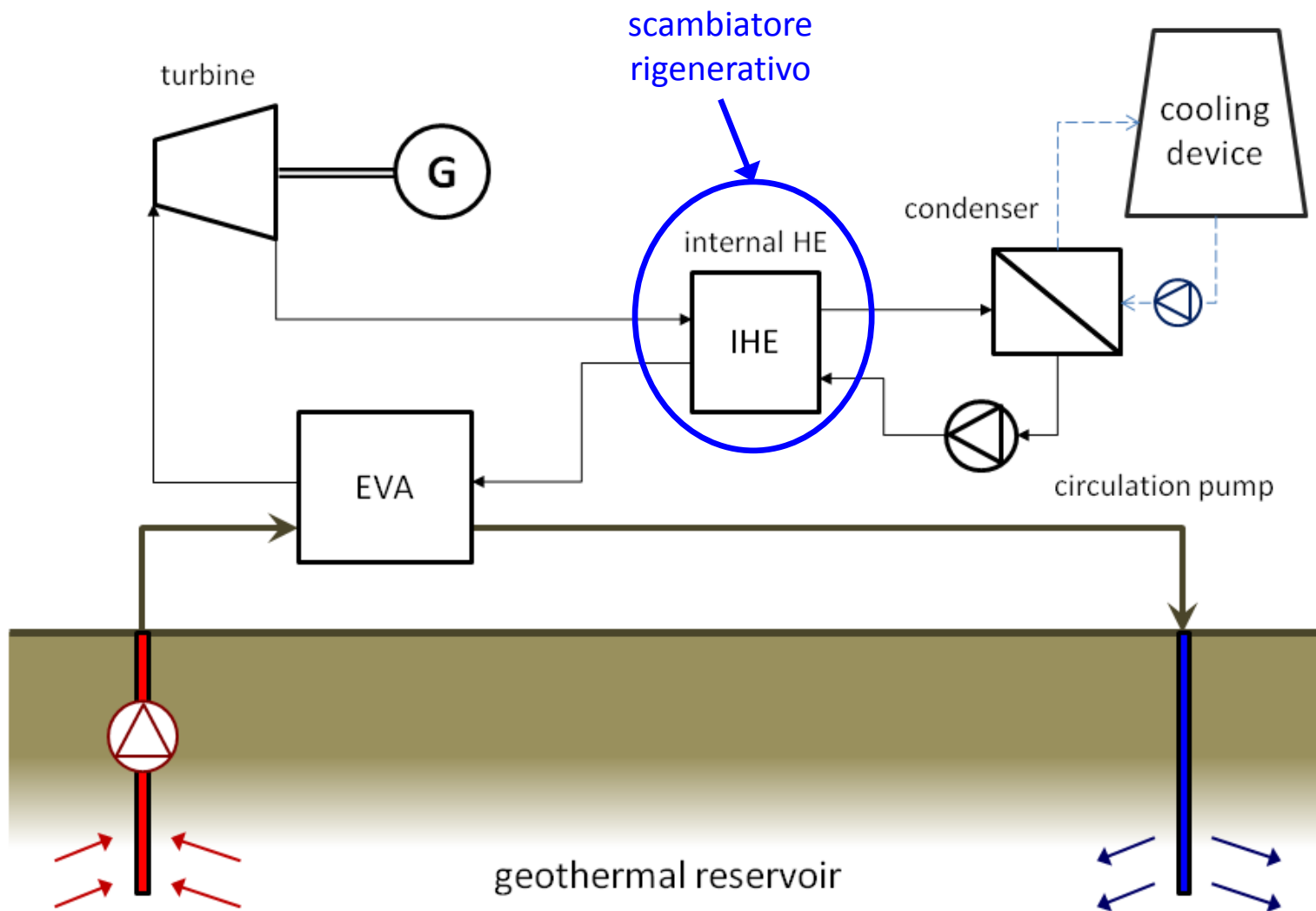
Impianti a ciclo binario (Organic Rankine Cycle, ORC)

Il problema del raffreddamento (condensazione ad acqua o ad aria)



Impianti a ciclo binario (Organic Rankine Cycle, ORC)

Impianto a ciclo binario rigenerativo



Impianti a ciclo binario (Organic Rankine Cycle, ORC)

Ottimizzazione dei cicli binari – Variabili progettuali e uso sostenibile della risorsa:

- ✓ Temperatura di prelievo del fluido geotermico
- ✓ Temperatura di reiniezione (determinata in base ai fenomeni di deposizione salina, scaling)
- ✓ Temperatura di condensazione (legata alla temperatura ambiente)
- ✓ Tipo di fluido di lavoro (criogenico, refrigerante di sintesi o miscela di refrigeranti)
- ✓ Ciclo termodinamico di recupero (Rankine, Hirn, 2 livelli di pressione, ecc.)
- ✓ Presenza di scambiatori di calore rigenerativi
- ✓ Sistema di condensazione e raffreddamento (a secco o ad umido)

Va comunque considerato
il “sistema geotermico” globale:

IMPIANTO – POZZI – SERBATOIO

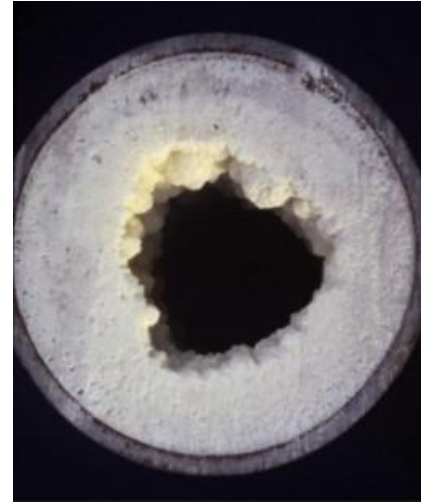
Problemi tecnologici – Scaling

- Fenomeni di deposizione chimica, danno luogo a incrostazioni e intasamenti
- danneggiamento delle parti a contatto; effetti negativi sulla portata; “tapping” del pozzo di reiniezione; corrosione

- Metodi di inibizione chimica*
- Metodi di inibizione meccanica*
- Metodi di rimozione meccanica*

Fattori che governano lo scaling:

- **TEMPERATURA**
- **PRESSIONE**
- **pH**



Strategie di coltivazione e di reiniezione

Reiniezione



Garantire la ricarica del serbatoio, consentire la rinnovabilità della risorsa

Stimolazione

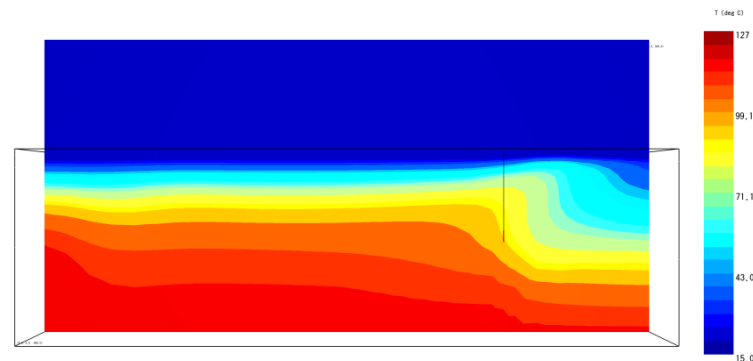
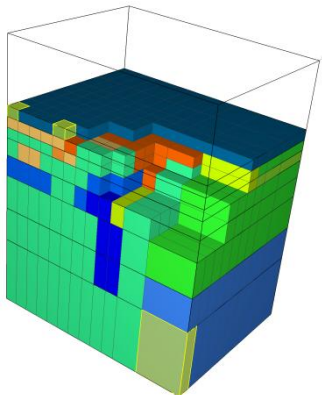


Migliorare l'estrazione e la produttività (iniezione di acqua in pressione e miscele acide)

*Attività di indagine sui fenomeni di scaling e deposizione chimica verranno affrontate nel costituendo laboratorio **ENERGEA** (c/o struttura C EGL), le cui attività sono in programmazione.*

Gestione sostenibile della risorsa

- “**Approccio integrato**” al problema dello sfruttamento della risorsa geotermica
- Garantire la “**rinnovabilità**” della risorsa (portata, quota idraulico, temperatura)
- **Simulazione numerica** dei serbatoi e dei sistemi di utilizzazione (strumento essenziale)
 - ✓ Elaborazione di **scenari di sfruttamento** in cui la “durability” dell’impianto e la “ricarica” dei reservoirs avvengano in maniera sostenibile (dal punto di vista ambientale, tecnologico ed economico)
 - ✓ **Caratterizzazione** preliminare accurata della risorsa
 - ✓ Ottimizzazione della **strategia di reiniezione**



Problemi tecnologici e ambientali

Caratteristiche chimiche del vapore geotermico

Pressione:	5-10 bar
Temperatura:	150-250 °C
Percentuale di incondensabili:	5 % in volume
Portata:	100-250 t/h

SPECIE INCONDENSABILE		VOLUME (%)
CO₂	Anidride carbonica	80-95
H₂	Idrogeno	2-5
CH₄	Metano	4-8
N₂	Azoto	1 -3
H₂S	Acido solfidrico	1-2

Altri componenti: O₂, Hg, HCl, HF, As, NH₃, H₃BO₃

Problemi tecnologici e ambientali

- **Impatto visivo**
- **Inquinamento acustico**
- **Fenomeni di subsidenza**
- **Inquinamento atmosferico**
 - Acido solfidrico (H_2S)
 - Mercurio (Hg)
 - Arsenico (As)

} Reiniezione

soglia olfattiva molto bassa
(cattivo odore): $0,7 \mu g/m^3$

} Sistemi di
abbattimento

Sviluppi futuri

- Tendenza a una maggiore diffusione dei cicli binari
 - emissioni ridotte, quasi nulle
 - modularità delle unità ORC (taglie ridotte)
 - piccole dimensioni
 - possibilità di standardizzazione, per una maggiore penetrazione sul mercato

- Miglioramento costante della tecnologia ORC
 - prestazioni, robustezza e affidabilità; anche per la sempre crescente utilizzazione degli ORC come cicli di recupero per fonti di calore a medio-bassa entalpia (altre fonti rinnovabili, es.: biomasse)

- Maggiore attenzione alla “rinnovabilità” della risorsa e alla sostenibilità (ambientale, tecnologica ed economica) degli impianti
 - caratterizzazione attenta della risorsa
 - simulazione numerica come strumento previsionale
 - strategia di reiniezione (traccianti, interference test)

Previsioni di sviluppo – produzione geotermoelettrica



PREVISIONI DI CRESCITA DELLA GEOTERMIA IN ITALIA FINO AL 2030

Per un nuovo Manifesto della geotermia italiana

(dicembre 2011)

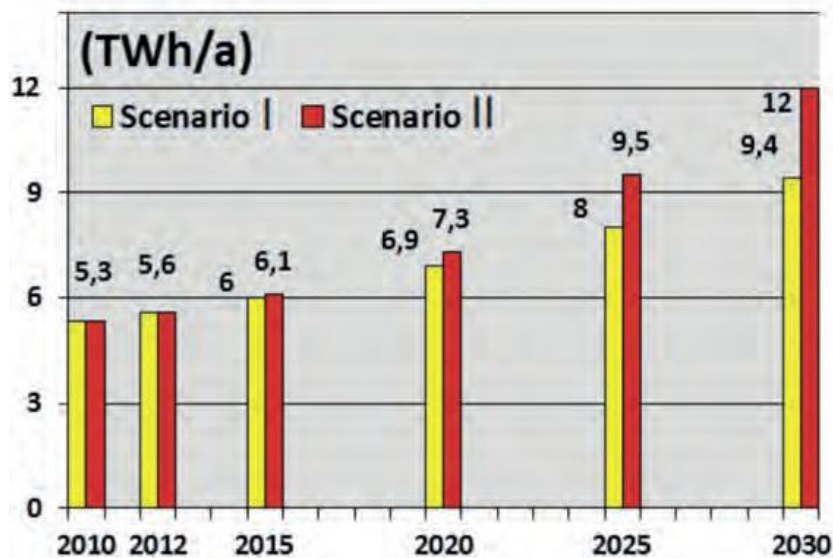
Scenario I

trend di sviluppo economico-sociale corrente, uso di tecnologie di produzione quasi soltanto mature, e prezzi alla fonte del greggio al 2030 di 250 US \$/barile (circa tre volte più alti, cioè, di quelli medi del 2010, che sono stati 80 US \$/barile ≈ 400-420 €/tonn)

Scenario II

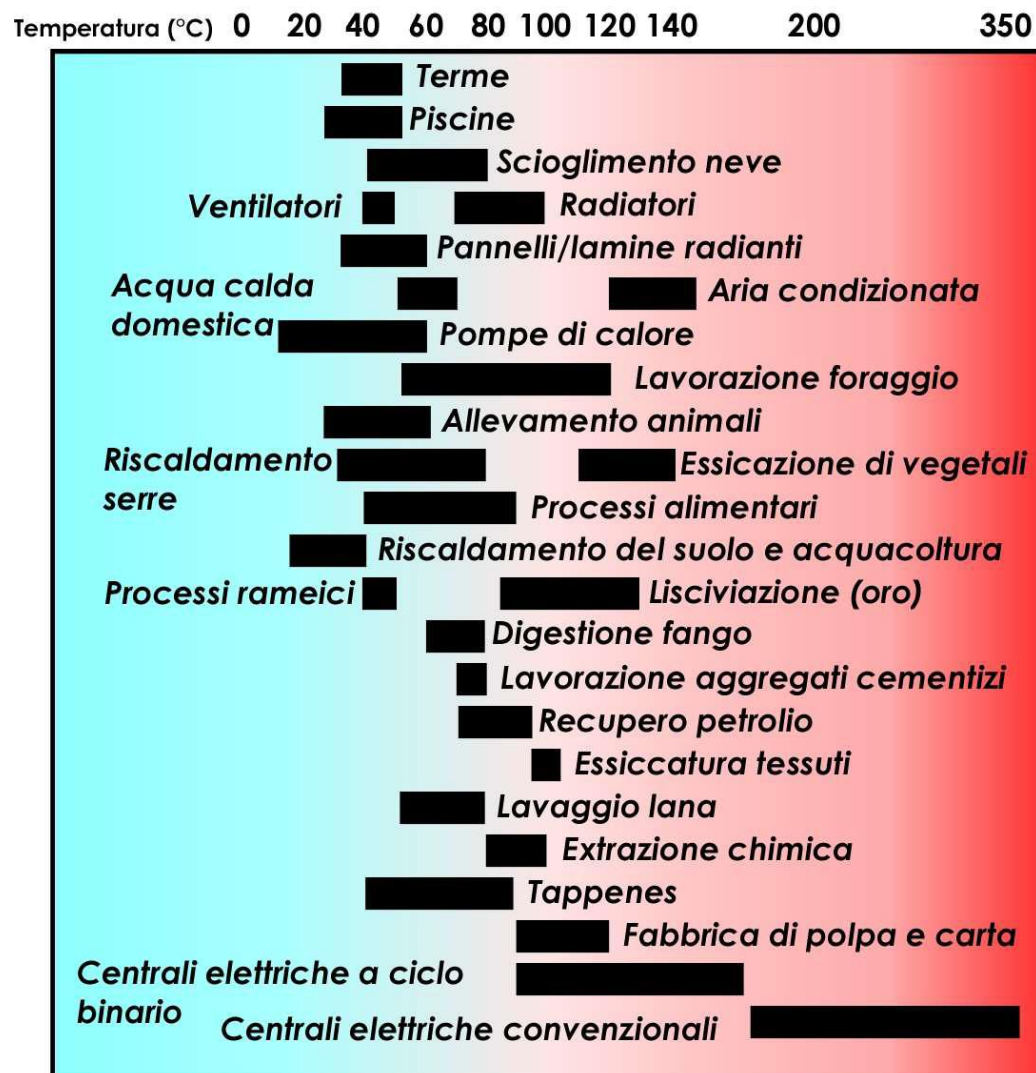
trend di sviluppo economico-sociale trainato da scelte politiche forti in senso ecologico, uso di tecnologie di produzione non solo mature ma anche avanzate, e prezzi alla fonte del greggio al 2030 di 300 US\$/barile (circa quattro volte più alti, cioè, di quelli del 2010).

Anno/Year	2010	2020	2030
SCENARIO I			
Potenza installata (MW _e) Installed capacity	882,5	1 080	1 500
Produzione lorda (TWh/y) Gross generation	5,343	6,9	9,4
Olío risparmiato (kTOE/y) Oil saved	1 020	1 310	1 790
CO ₂ evitata (kTonnes/y) Avoided CO ₂ emissions	3 200	4 140	5 700
SCENARIO II			
Potenza installata (MW _e) Installed capacity	882,5	1 150	2 000
Produzione lorda (TWh/y) Gross generation	5,343	7,3	12,0
Olío risparmiato (kTOE/y) Oil saved	1 020	1 390	2 280
CO ₂ evitata (kTonnes/y) Avoided CO ₂ emissions	3 200	4 380	7 200



Usi diretti della geotermia

- ❑ La pratica industriale e tecnologica degli usi diretti del calore geotermico ha storicamente prodotto numerosissime soluzioni applicative
- ❑ Corpi acquiferi di interesse per gli usi diretti (anomalie geotermiche) sono presenti in Italia, in regioni come la Toscana, il Lazio, la Campania, l'Emilia-Romagna
- ❑ Le utilizzazioni tramite impianti a pompa di calore possono essere applicati praticamente ovunque, senza bisogno di ricadere in aree caratterizzate da anomalie geotermiche o intrusioni di corpi magmatici



Usi diretti della geotermia

Sistemi di utilizzazione del calore geotermico

□ Sistemi senza prelievo di fluido

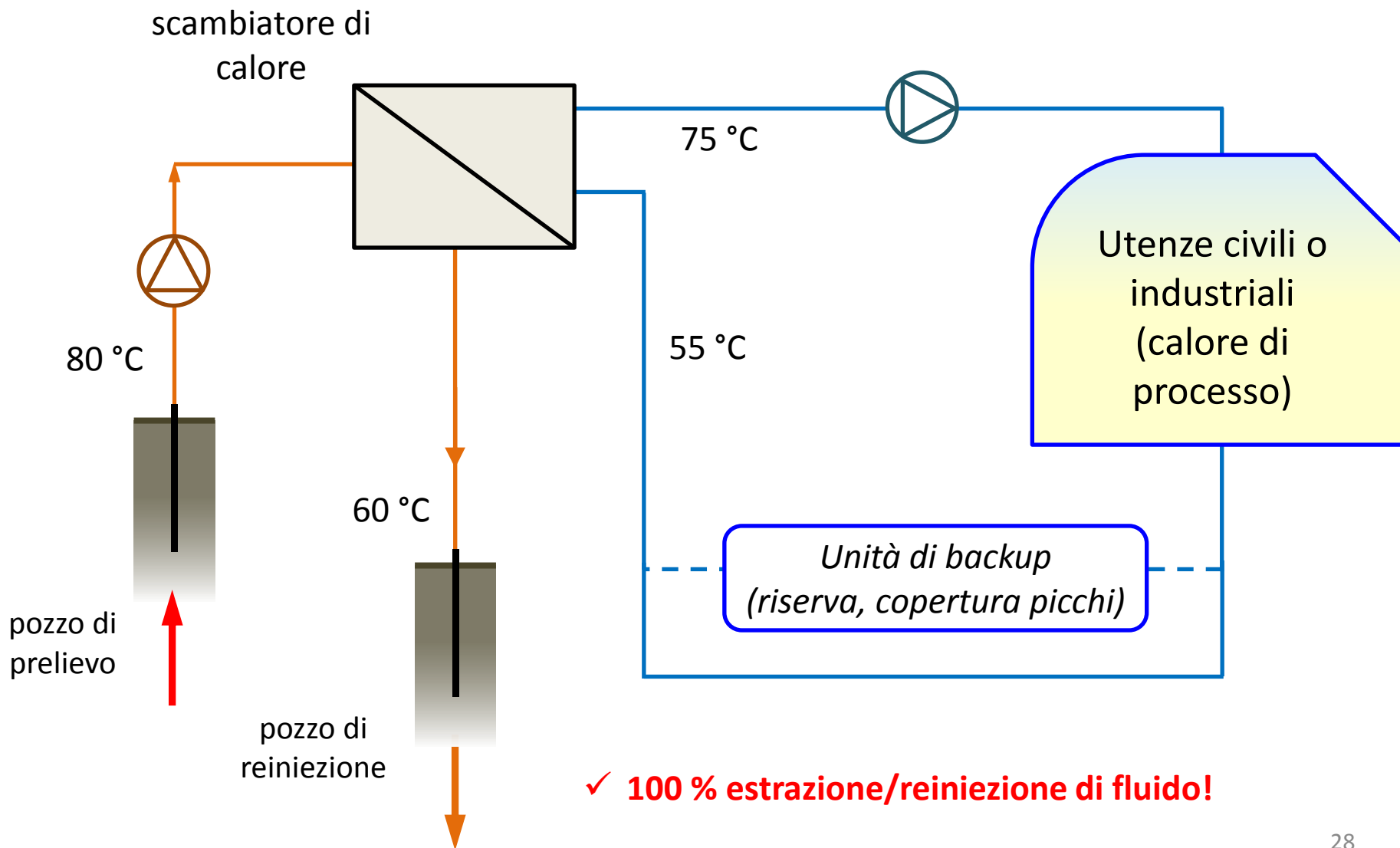
- Sonde geotermiche (BHE)
- Pali geotermici

□ Sistemi con prelievo di fluido

- Sistemi Open loop
- Sistemi ATES

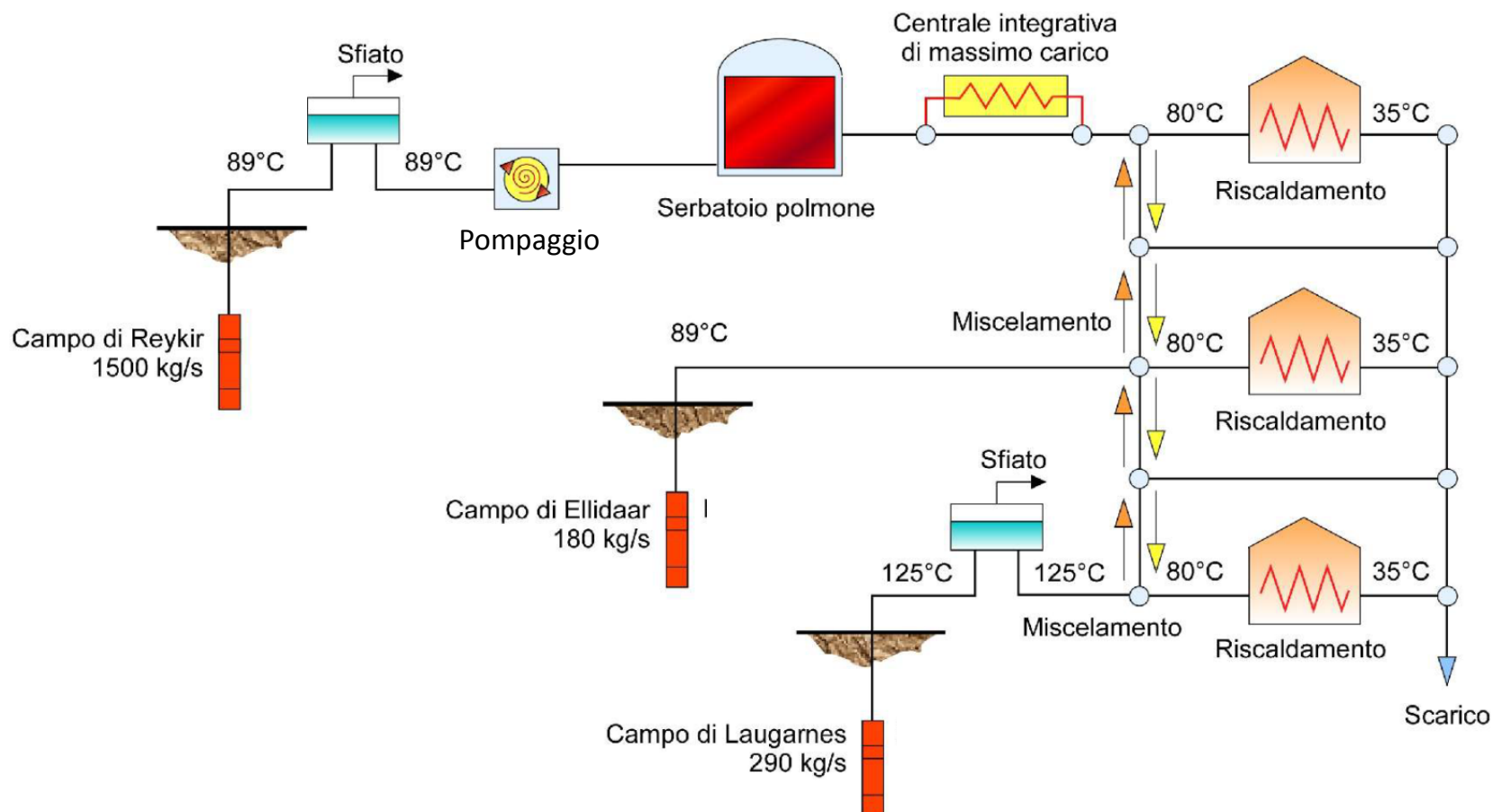
Usi diretti della geotermia

Teleriscaldamento



Usi diretti della geotermia

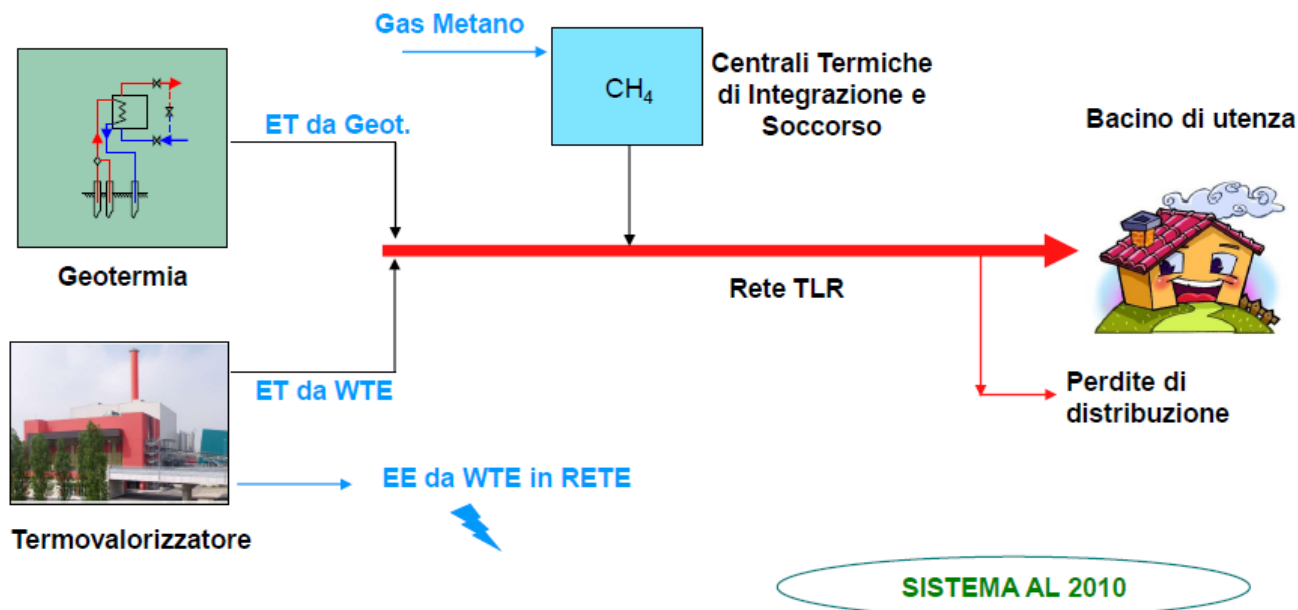
Teleriscaldamento



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

Usi diretti della geotermia

Teleriscaldamento – Il caso di Ferrara



(da F. Ferraresi)

Percentuale di fonti di energia utilizzate nella rete di teleriscaldamento di Ferrara

Geotermia 42 %

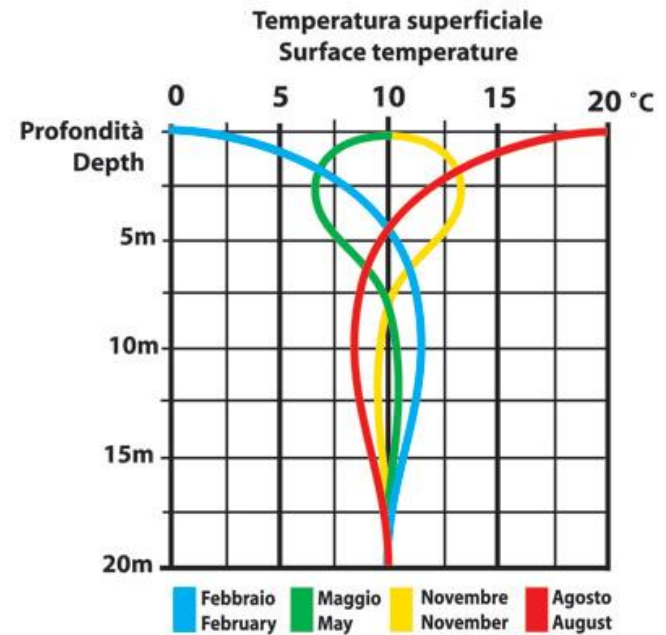
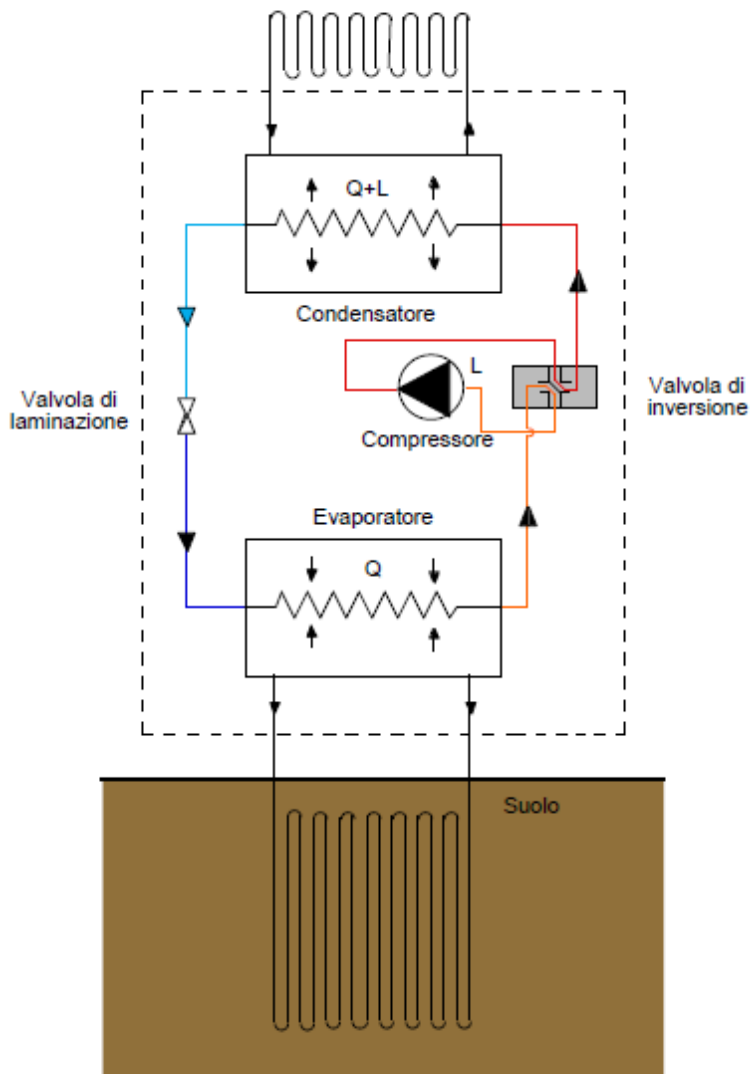
Termovalorizzatore 41 %

Centrale termica (integrazione a metano) 17 %

Usi diretti della geotermia

Pompe di calore geotermiche

Sistema di distribuzione a pannelli radianti a pavimento

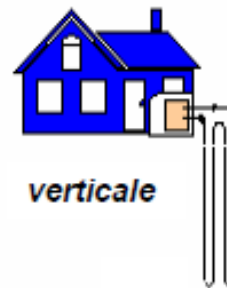


Usi diretti della geotermia

Pompe di calore geotermiche

GCHP

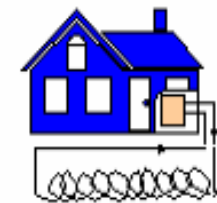
Ground Coupled Heat Pumps
Aka: closed loop heat pumps



verticale



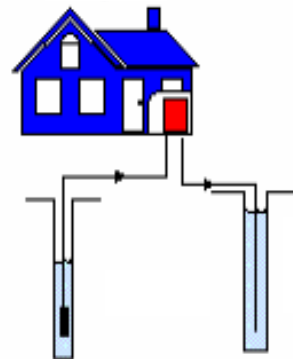
orizzontale



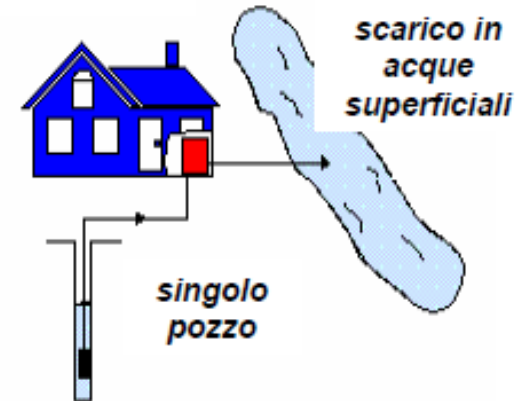
a spirale

GWHP

Ground Water Heat Pumps
Aka: open loop heat pumps



doppio pozzo

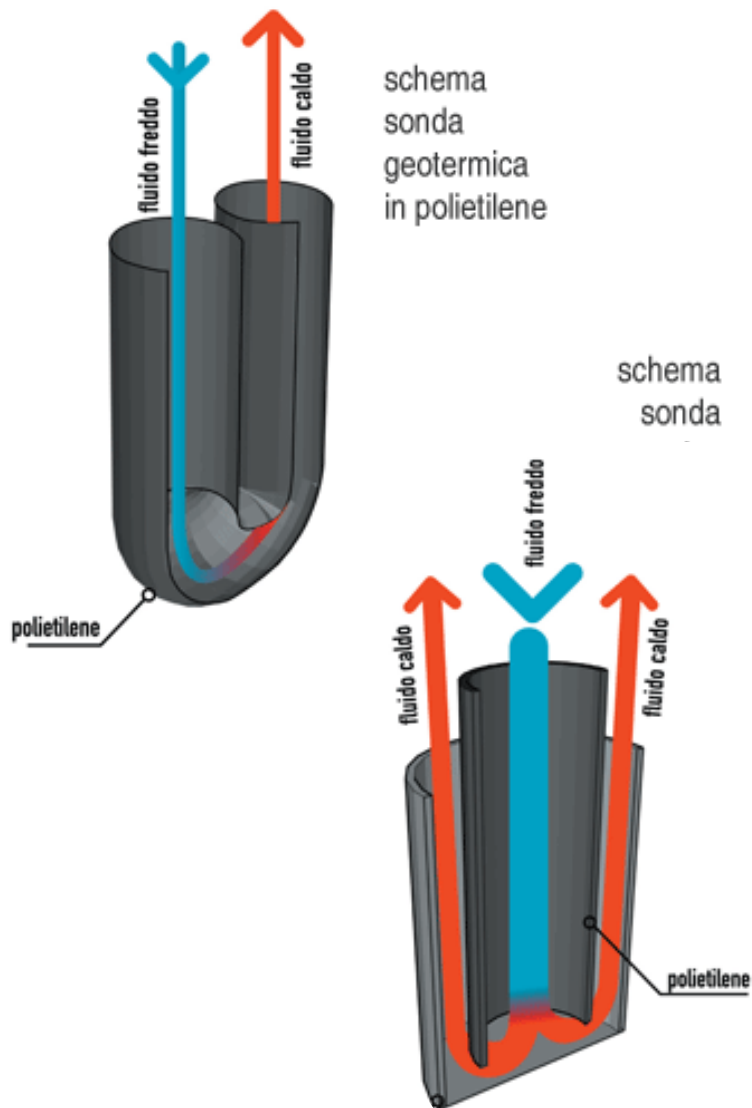


*scarico in
acque
superficiali*

singolo pozzo

Usi diretti della geotermia

Pompe di calore - Sonde geotermiche verticali



Usi diretti della geotermia

Pompe di calore - Sonde geotermiche orizzontali e a spirale



Usi diretti della geotermia

Caratteristiche del suolo

Roccia	Conducibilità termica media λ [W/Km]	Resa [W/m]
Linee guida generali		
Sottosuoli sterili, sedimenti secchi ($\lambda < 1,5 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$)		20
Normali sottosuoli rocciosi ($\lambda = 1,5 \div 3,0 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$)		50
Rocce consolidate altamente conduttive ($\lambda > 3,0 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$)		70
Rocce eruttive		
Graniti	3,5	80 – 90
Granodioriti	2,5	60 – 70
Gabbri	1,8	40 – 50
Basalti	1,7	40 – 50
Porfidi	1,9	40 – 50
Ossidiane	1,3	30 – 40
Pomici	0,4	20 – 30
Rocce sedimentarie		
Calcari	2,8	60 – 70
Arenarie	2,2	50 – 60
Travertini	2,4	50 – 60
Gesso	2,5	50 – 60
Ghiaia asciutta	0,4	20 – 40
Ghiaia bagnata	1,6 ⁽¹⁾	40 – 50
Sabbia asciutta	0,5	30 – 50
Sabbia bagnata	2,3	50 – 60
Limi e argille asciutti	0,6	30 – 50
Limi e argille bagnate	1,8	40 – 50
Rocce metamorfiche		
Gneiss	2,9	60 – 70
Marmo	2,2	50 – 60
Ardesia	2,4	50 – 60

*vanno effettuate opportune
prove sito per sito:*

GROUND RESPONSE TEST

THERMAL RESPONSE TEST

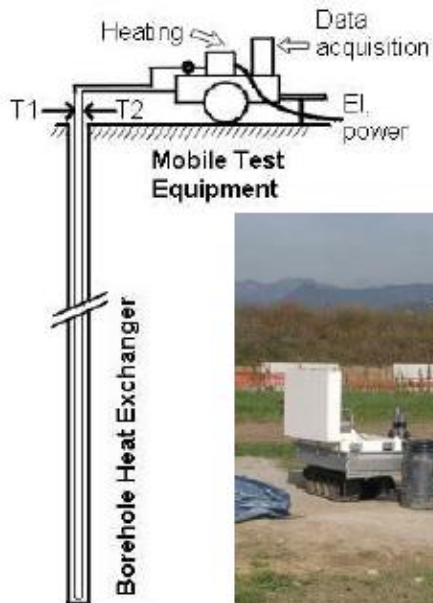
Usi diretti della geotermia

TRT – Thermal Response Test

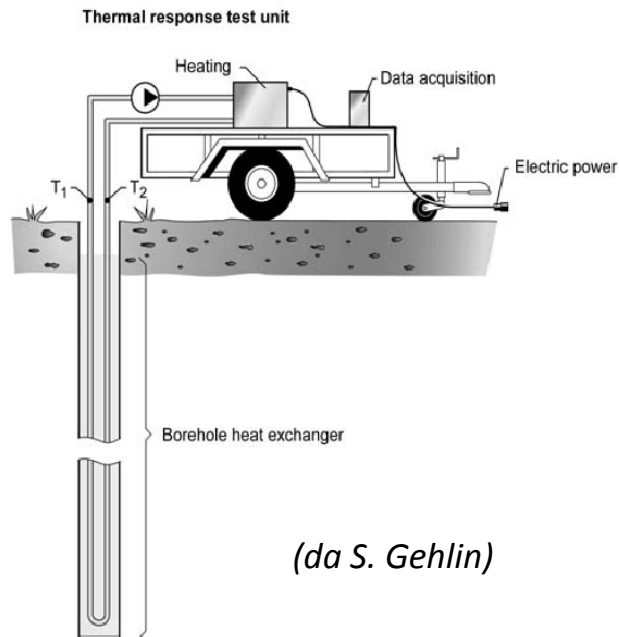
- ❑ È un test finalizzato all'ottenimento di dati utili al dimensionamento di apparati per il geoscambio (sonde, BHE)
- ❑ L'obiettivo è la **caratterizzazione termica del terreno**, ottenendo come risultato la **conducibilità termica** (coefficiente di scambio termico) da utilizzare nei calcoli per il dimensionamento e il progetto delle sonde (e dell'utilizzazione, es.: scambiatore per pompa di calore)
- ❑ Conoscendo la potenza termica (portata, temperature di uscita e ingresso del fluido) con cui viene stimolato il terreno, si può ottenere dalla risposta il valore del coefficiente di scambio
- ❑ La ricerca è concentrata sul raffinamento del metodo, sull'elaborazione dei dati, sulla maggiore efficienza del processo. Il corretto dimensionamento di un sistema di climatizzazione geotermico dipende dalla corretta caratterizzazione del terreno, così come l'efficienza di una centrale geotermoelettrica dipende dalla caratterizzazione del serbatoio e dalla valutazione globale del potenziale geotermico.

Usi diretti della geotermia

TRT – Thermal Response Test

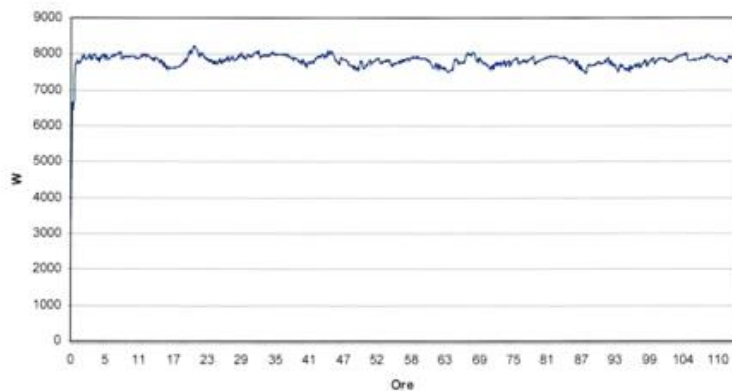


(da B. Sanner et al.)

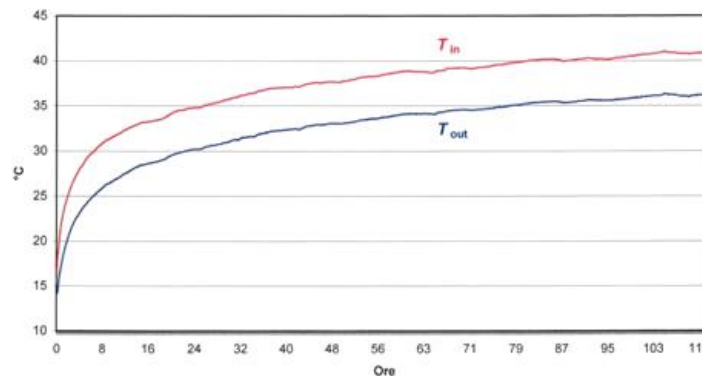


(da S. Gehlin)

Potenza scambiata dalla sonda con il terreno



Andamento T_{in} e T_{out}



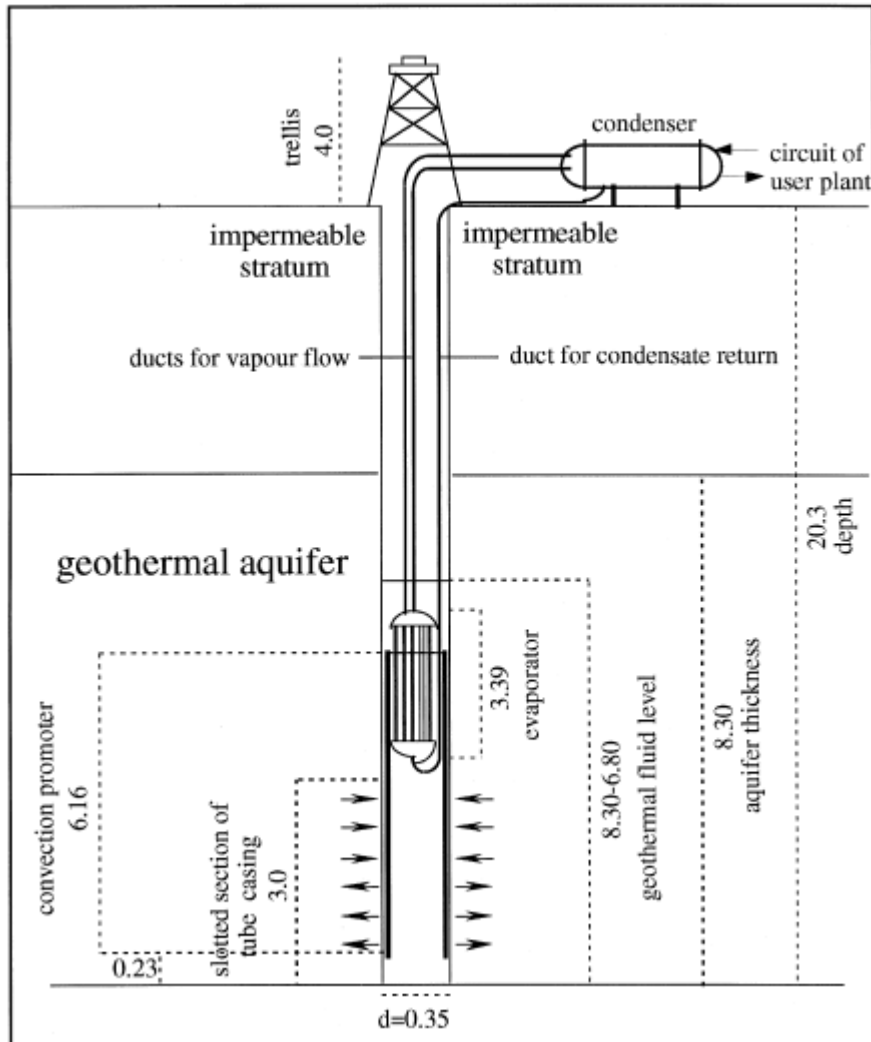
Usi diretti della geotermia

Pali di fondazione per lo scambio di calore col terreno



Usi diretti della geotermia

Geotermoconvettori

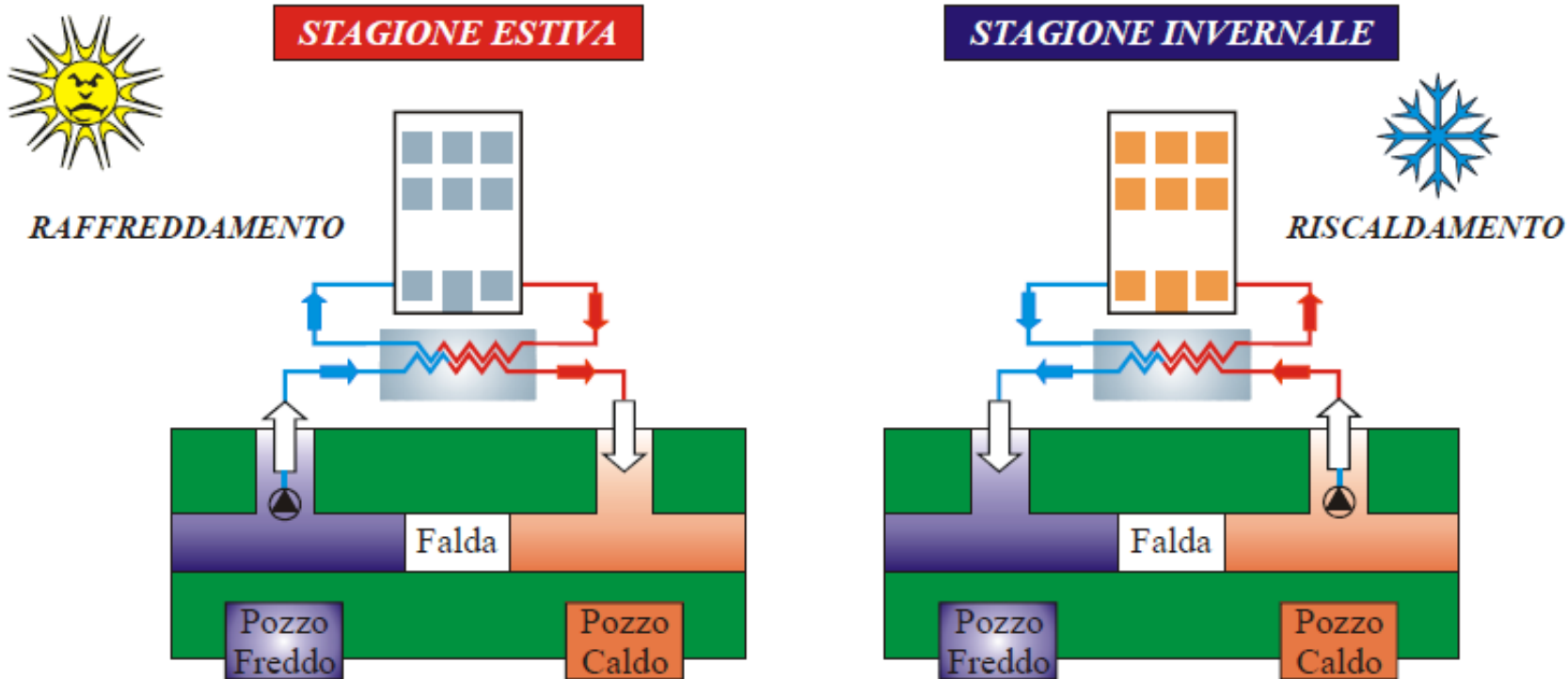


- Prelievo di calore da un acquifero senza prelievo di fluido (per acquiferi sufficientemente caldi e vicini alla superficie)
- Utilizzo del principio dell'heat pipe (es.: termosifone bifase a circuito chiuso)

Usi diretti della geotermia

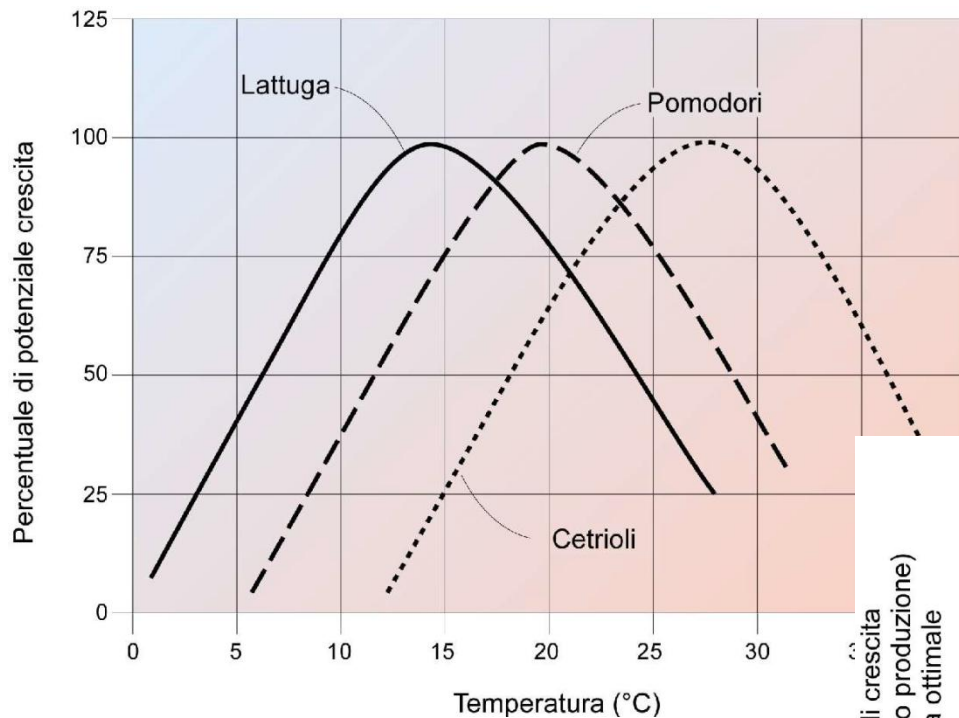
Pompe di calore

ATES – Aquifer Thermal Energy Storage

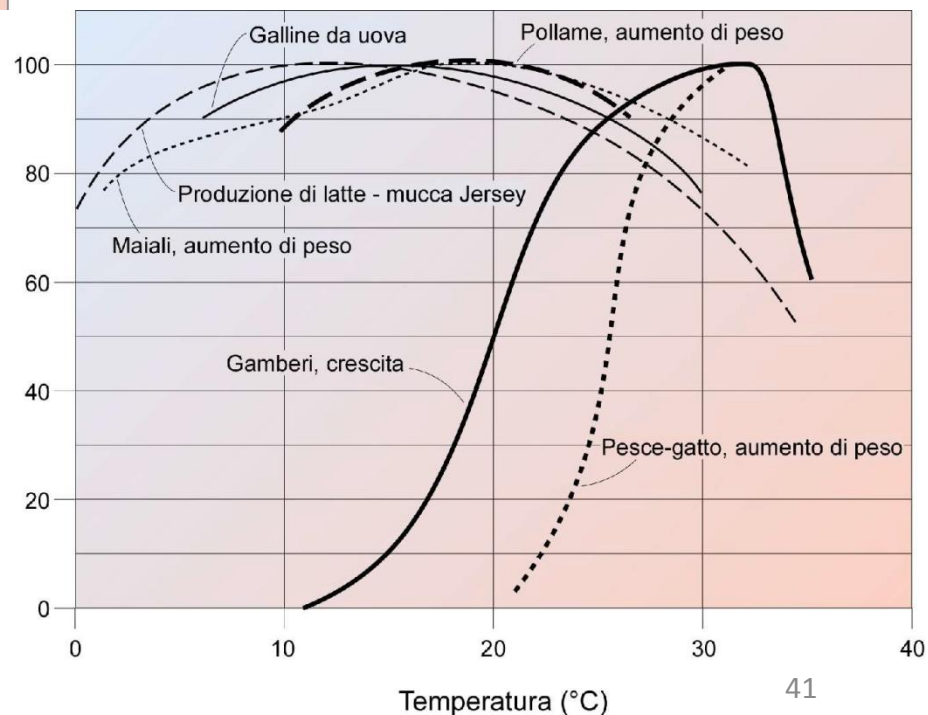


Usi diretti della geotermia

Agricoltura (serre) e allevamento



Curve di accrescimento di alcune verdure (da Beall e Samuels, 1971).



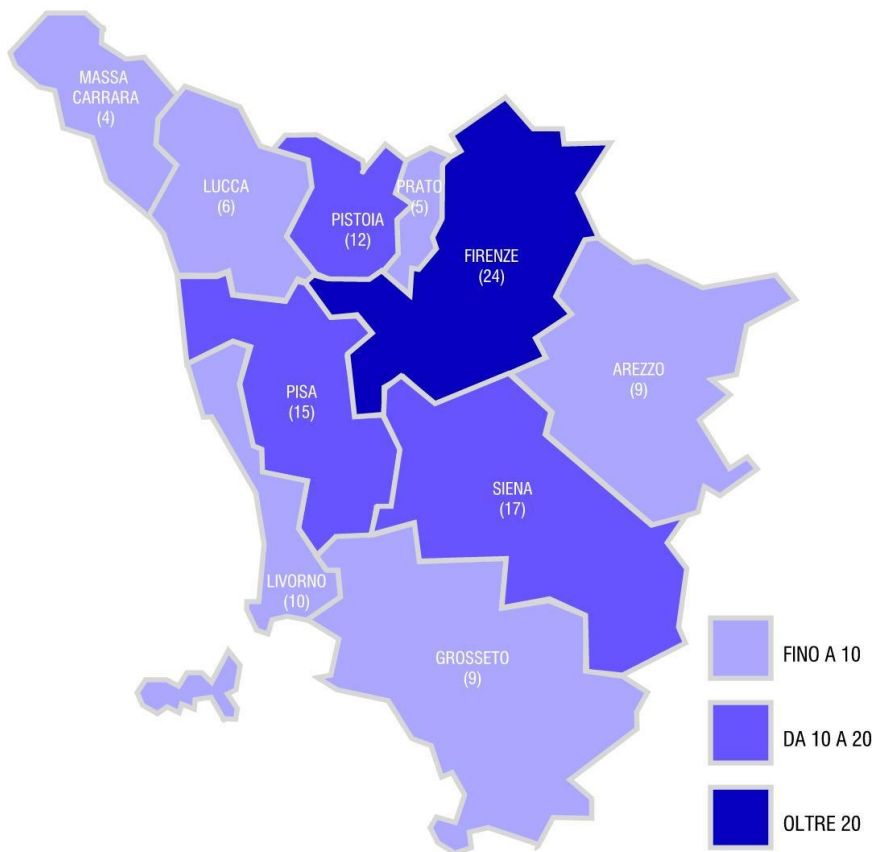
Effetti della variazione di temperatura sulla crescita e produzione animale (da Beall e Samuels, 1971).

Usi diretti della geotermia

La situazione in Toscana

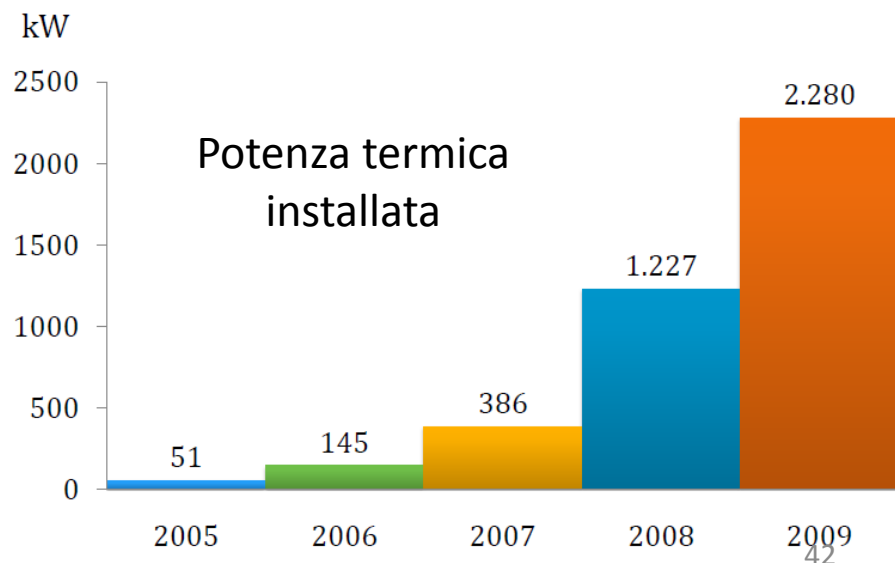
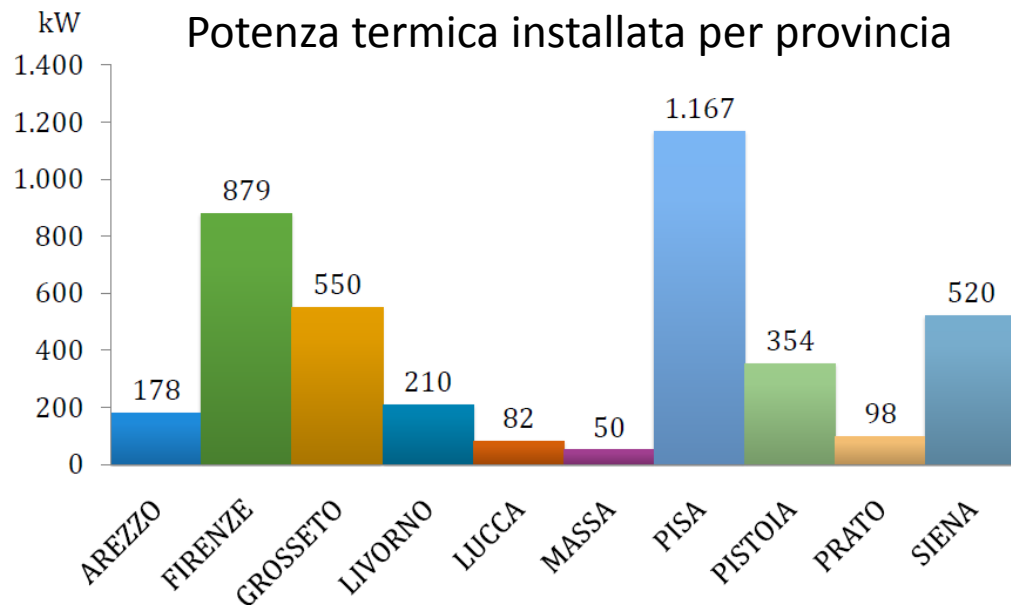
Fonte UGI – Quaderno n. 1

“Pompe di calore geotermiche in Toscana”

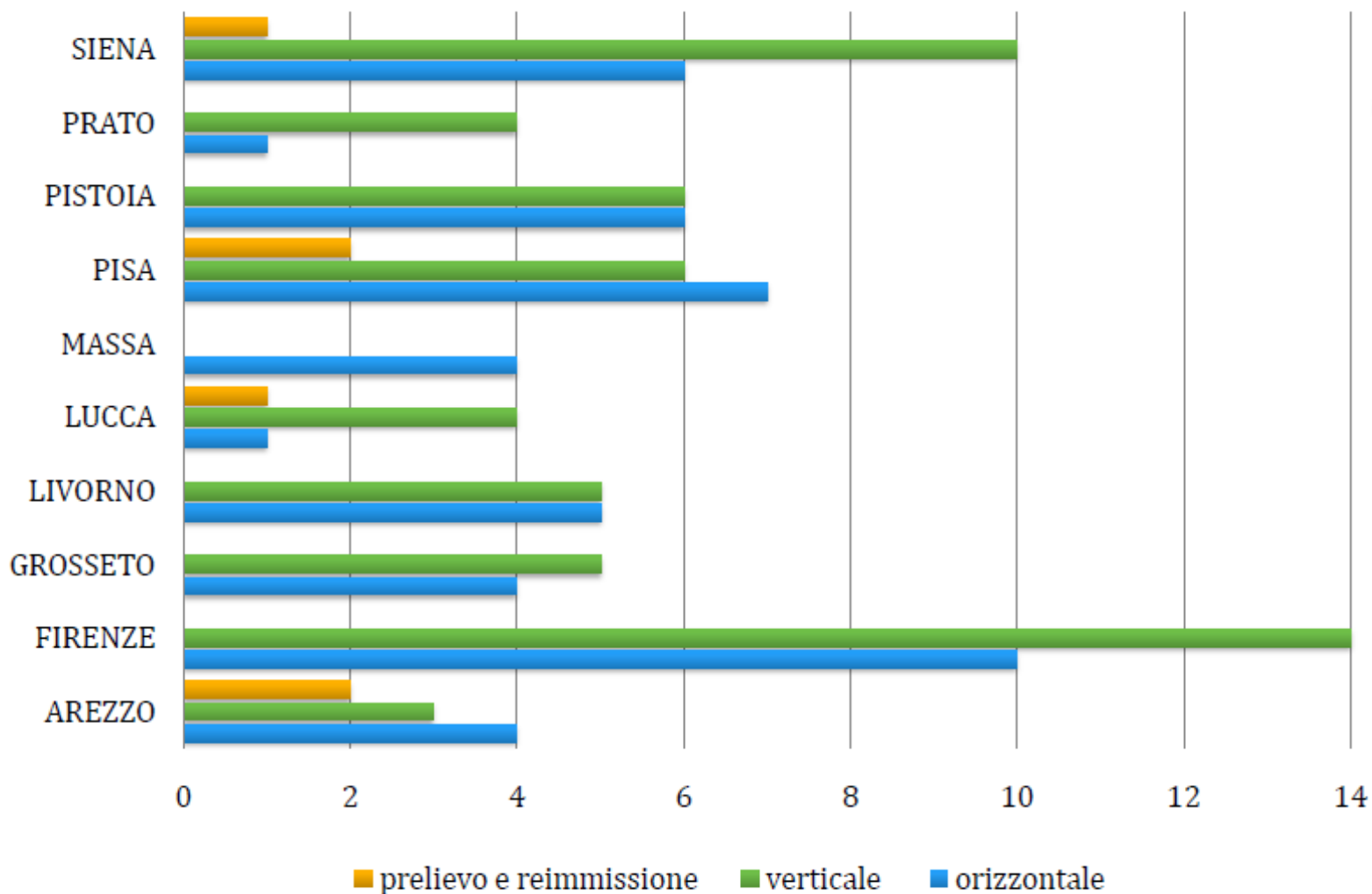


Richieste di autorizzazione per provincia

Potenza termica installata per provincia



Tipo di geoscambiatore (classificazione per provincia)

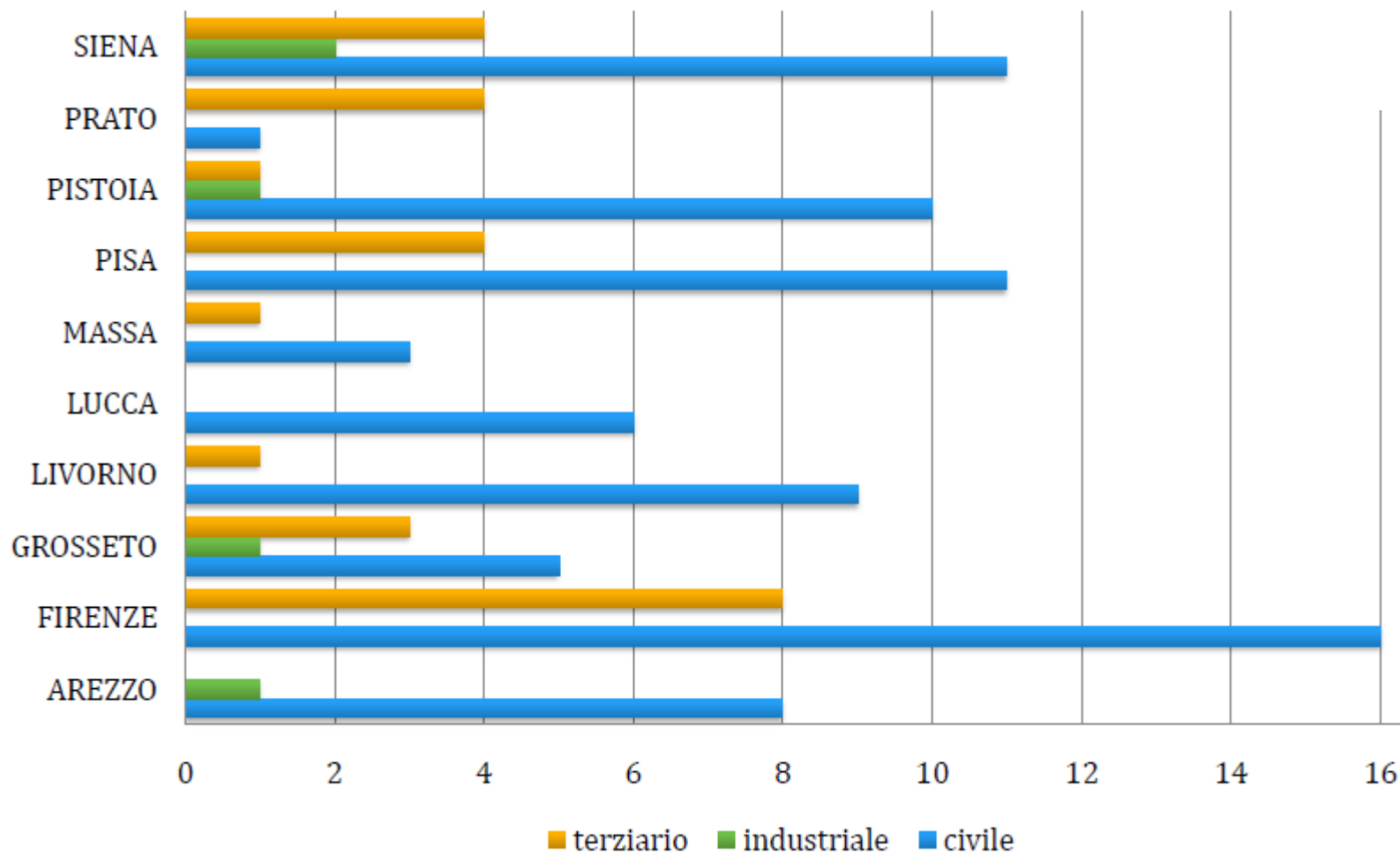


Usi diretti della geotermia

La situazione in Toscana

Fonte UGI – Quaderno n. 1 “Pompe di calore geotermiche in Toscana”

Destinazione d'uso (classificazione per provincia)



Previsioni di sviluppo – usi diretti



PREVISIONI DI CRESCITA DELLA GEOTERMIA IN ITALIA FINO AL 2030

Per un nuovo Manifesto della geotermia italiana

(dicembre 2011)

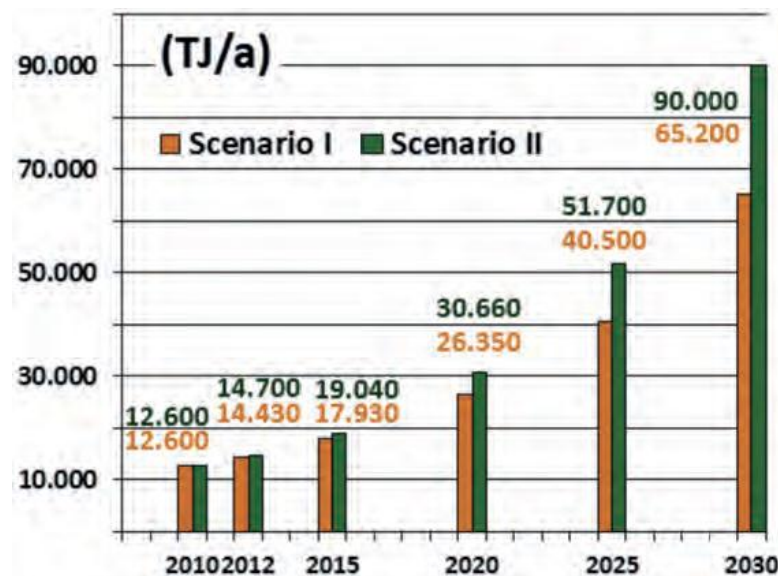
Scenario I

trend di sviluppo economico-sociale corrente, uso di tecnologie di produzione quasi soltanto mature, e prezzi alla fonte del greggio al 2030 di 250 US \$/barile (circa tre volte più alti, cioè, di quelli medi del 2010, che sono stati 80 US \$/barile ≈ 400-420 €/tonn)

Scenario II

trend di sviluppo economico-sociale trainato da scelte politiche forti in senso ecologico, uso di tecnologie di produzione non solo mature ma anche avanzate, e prezzi alla fonte del greggio al 2030 di 300 US\$/barile (circa quattro volte più alti, cioè, di quelli del 2010).

Anno/Year	2010	2020	2030
SCENARIO I			
Potenza installata (MW _{th}) Installed capacity	1 000	2 510	7 400
Produzione lorda (TJ/y) Gross production	12 600	26 380	65 200
Olio risparmiato (kTOE/y) Oil saved	300	630	1 560
CO ₂ evitata (kTonnes/y) Avoided CO ₂ emissions	800	1 640	4 060
SCENARIO II			
Potenza installata (MW _{th}) Installed capacity	1 000	2 750	8 800
Produzione lorda (TJ/y) Gross production	12 600	30 660	90 000
Olio risparmiato (kTOE/y) Oil saved	300	740	2 160
CO ₂ evitata (kTonne/y) Avoided CO ₂ emissions	800	1 920	5 620



Grazie per l'attenzione