

Cos'è l'Energia Geotermica?

Mary H. Dickson and Mario Fanelli

Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy

Preparato nel Febbraio 2004

INTRODUZIONE

Il calore è una forma di energia e, in senso stretto, l'*energia geotermica* è il calore contenuto nell'interno della Terra. Esso è all'origine di molti fenomeni geologici di scala planetaria. Tuttavia, l'espressione "energia geotermica" è generalmente impiegata, nell'uso comune, per indicare quella parte del calore terrestre, che può, o potrebbe essere, estratta dal sottosuolo e sfruttata dall'uomo.

Breve storia della geotermia

I vulcani, le sorgenti termali, le fumarole ed altri fenomeni superficiali di questo genere hanno certamente fatto immaginare ai nostri progenitori che alcune parti dell'interno della Terra sono calde. Soltanto tra il sedicesimo ed il diciassettesimo secolo, tuttavia, quando furono scavate le prime miniere profonde qualche centinaio di metri, ci si rese conto, da semplici sensazioni fisiche, che la temperatura del sottosuolo aumenta con la profondità.

Le prime misure con termometri sono state fatte probabilmente nel 1740 da De Gensanne in una miniera vicino Belfort in Francia (Buffon, 1778). Dal 1870 il regime termico della terra è stato studiato con metodi scientifici moderni (Bullard, 1965), ma soltanto nel ventesimo secolo, dopo la scoperta del ruolo svolto dal *calore radiogenico*, è stato possibile comprendere pienamente fenomeni come il bilancio termico della Terra e ricostruire la storia termica del nostro pianeta. Tutti i moderni modelli termici della Terra, infatti, devono tener conto del calore prodotto in continuazione dal decadimento degli

isotopi radioattivi a lunga vita dell'uranio (U^{238} , U^{235}), del torio (Th^{232}) e del potassio (K^{40}), presenti nell'interno del globo terrestre (Lubimova, 1968). A quella radiogenica, si aggiungono, in proporzioni non esattamente definite, altre fonti di calore, come il calore primordiale del pianeta. Comunque, teorie e modelli termici realistici non sono stati disponibili sino agli anni '80, quando è stato dimostrato che non c'è equilibrio tra il calore prodotto dal decadimento degli isotopi radioattivi presenti nell'interno della Terra ed il calore disperso dalla sua superficie verso lo spazio, e che il nostro pianeta si sta lentamente raffreddando.

Per dare un'idea della grandezza dei fenomeni di cui si parla, si può fare riferimento al *bilancio termico* di Stacey e Loper (1988), nel quale il flusso di calore totale dalla superficie terrestre è valutato $42 \times 10^{12} \text{ W}$ (conduzione, convezione e radiazione). Di questa grandezza, $8 \times 10^{12} \text{ W}$ provengono dalla crosta terrestre, che rappresenta soltanto il 2% del volume totale della Terra, ma è ricca di isotopi radioattivi, $32,3 \times 10^{12} \text{ W}$ derivano dal mantello, che è l'82% del volume totale della Terra, e $1,7 \times 10^{12} \text{ W}$ provengono dal nucleo, che costituisce il 16% del volume totale del pianeta e non contiene isotopi radioattivi (uno schema della struttura interna della Terra è rappresentato nella Figura 1). Poiché il calore radiogenico del mantello è stimato in $22 \times 10^{12} \text{ W}$, il raffreddamento di questa parte della Terra è $10,3 \times 10^{12} \text{ W}$. Calcoli più recenti, basati su un numero maggiore di dati, hanno portato ad un valore del flusso di calore totale dalla superficie del 6% più alto di quello utilizzato da Stacey e Loper, modificando leggermente le conclusioni di questi ultimi. Il raffreddamento del pianeta, comunque, è molto lento. La temperatura del mantello (Figura 1) è scesa, al più, di 300°C - 350°C in tre miliardi di anni e, alla sua base, è di circa 4000°C . È stato stimato che il calore totale contenuto nella Terra, assumendo una temperatura superficiale media di 15°C , sia dell'ordine di $12,6 \times 10^{24} \text{ MJ}$ e che quello contenuto nella crosta sia dell'ordine di $5,4 \times 10^{21} \text{ MJ}$ (Armstead, 1983). L'energia termica della Terra è quindi enorme, ma soltanto una parte di essa può essere sfruttata. Sino ad oggi,

l'utilizzazione di questa energia è stata limitata a quelle aree nelle quali le condizioni geologiche permettono ad un vettore (acqua in fase liquida o vapore) di “trasportare” il calore dalle formazioni calde profonde alla superficie o vicino ad essa, formando quelle che chiamiamo risorse geotermiche. Nuove vie potrebbero però essere aperte in un futuro prossimo da metodi innovativi e tecnologie d'avanguardia, alcuni già in fase di sperimentazione.

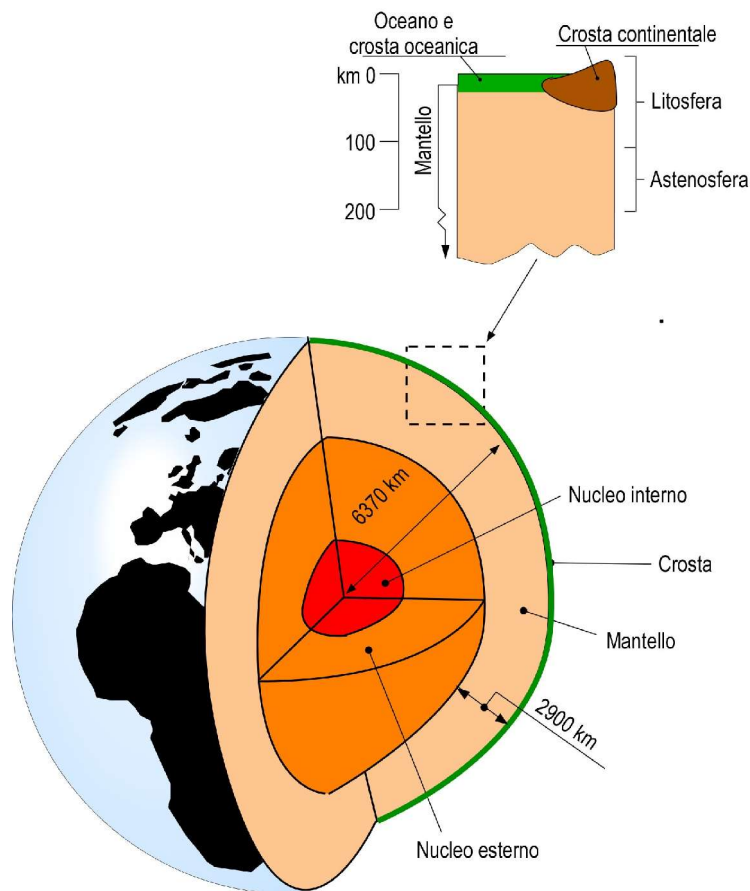


Figura 1

Schema della struttura interna della Terra: crosta, mantello e nucleo. A destra in alto, un dettaglio della crosta e della parte superiore del mantello.

In numerosi settori, soprattutto in passato, la pratica ha spesso preceduto la teoria. Molte risorse, tra queste anche quelle geotermiche, sono state sfruttate, all'inizio, senza conoscerne esattamente la natura e solo in un secondo momento sono state studiate scientificamente e ne è stata sviluppata la tecnologia. I fluidi geotermici erano già utilizzati,

per il loro contenuto energetico, nella prima parte del diciannovesimo secolo. In quel periodo, nella zona che poi ha avuto il nome di Larderello (Toscana), era stata costruita una piccola industria chimica per estrarre l'acido borico dalle acque calde boriche, che sgorgavano naturalmente dal suolo o erano estratte da pozzi di piccola profondità. L'acido borico era ottenuto facendo evaporare le acque calde ricche di boro in bollitori metallici, usando, come combustibile, il legname ricavato dei boschi vicini. Nel 1827 Francesco Larderel, proprietario di questa industria, ideò un sistema per sfruttare il calore degli stessi fluidi borici nel processo di evaporazione, invece di bruciare il legname dei boschi, che si andavano esaurendo rapidamente. Nello stesso periodo si cominciò anche ad utilizzare l'energia meccanica del vapore naturale. Questo venne usato per sollevare l'acqua in semplici sistemi a "gas lift" e, in seguito, per il funzionamento di pompe ed argani impiegati nelle operazioni di perforazione o nell'industria dell'acido borico. L'industria chimica di Larderello detenne, tra il 1850 ed il 1875, il monopolio della produzione dell'acido borico in Europa. Nella medesima area geotermica, tra il 1910 ed il 1940, si avviò, ampliandosi progressivamente, l'utilizzazione del vapore a bassa pressione per il riscaldamento di edifici residenziali ed industriali, e di serre. Mentre questo accadeva in Italia, anche in altri paesi si sviluppava l'utilizzazione industriale dell'energia geotermica: nel 1892 a Boise (Idaho, USA) veniva inaugurato il primo sistema di riscaldamento urbano; nel 1928 l'Islanda, un altro paese all'avanguardia nell'utilizzazione di questa fonte energetica in Europa, cominciò a sfruttare i fluidi geotermici, soprattutto acqua calda, per il riscaldamento di edifici.

Il primo tentativo di produrre elettricità dall'energia contenuta nel vapore geotermico è stato fatto a Larderello nel 1904 (Figura 3). Il successo di questo esperimento mostrò il valore industriale dell'energia geotermica e segnò l'inizio di una forma di sfruttamento, che è ora diffuso in molti paesi.

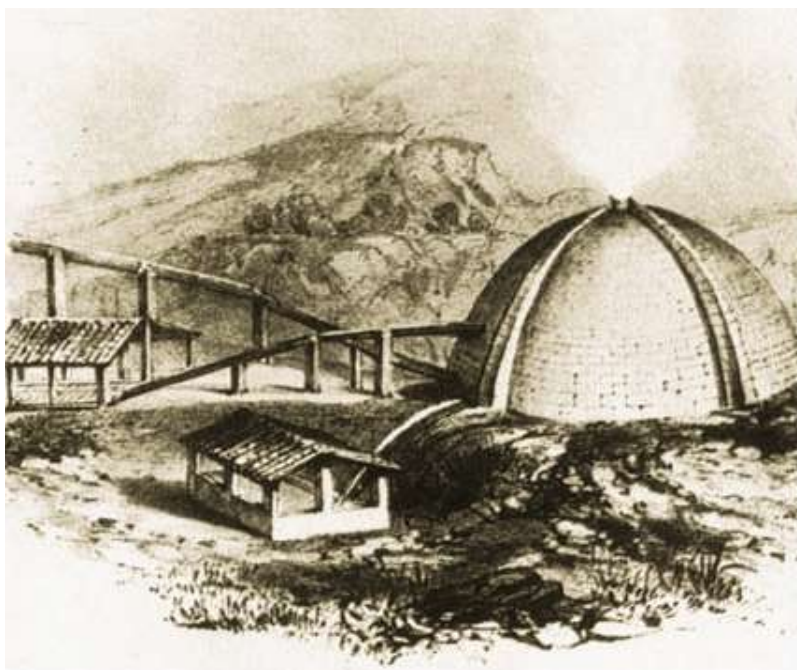


Figura 2

“Lagone coperto” a Larderello. All’interno di queste strutture in mattoni erano raccolte e fatte evaporare le acque boriche.



Figura 3

Larderello 1904. La prima macchina (un motore alternativo accoppiato ad una dinamo), che ha prodotto elettricità sfruttando il vapore geotermico. A fianco, il Principe Piero Ginori Conti, succeduto a Francesco Larderel nella proprietà dell’industria boracifera.

La produzione di elettricità a Larderello fu un successo commerciale, oltre che della tecnica, tanto che, nel 1942, la potenza geotermoelettrica installata aveva raggiunto 127.650 kW. L'esempio italiano fu seguito da numerosi altri paesi. Nel 1919 venne perforato il primo pozzo geotermico in Giappone, a Beppu, e, nel 1921, negli Stati Uniti, a The Geysers in California. Nel 1958 un primo impianto geotermoelettrico entrò in esercizio in Nuova Zelanda, nel 1959 in Messico, nel 1960 negli Stati Uniti e negli anni seguenti in molti altri paesi.

Utilizzazione attuale dell'energia geotermica

Dopo la seconda Guerra Mondiale, molti paesi furono attirati dall'energia geotermica, considerandola competitiva rispetto ad altre forme di energia. Il suo costo è inferiore a quello di altre, è un'energia "indigena", in numerose aree è l'unica localmente disponibile. Le nazioni che utilizzano l'energia geotermica per *produzione di elettricità* sono elencate nella Tabella 1, che mostra la potenza geotermoelettrica installata nel mondo nel 1995 (6.833 MW_e), nel 2000 (7.974 MW_e) e l'aumento tra il 1995 ed il 2000 (Huttrer, 2001). La stessa tabella dà anche la potenza elettrica installata al 2003 (8402 MW_e). Nei paesi in via di sviluppo, la potenza geotermoelettrica installata nel 1995 era il 38% di quella mondiale ed il 47% nel 2000. In questi paesi l'utilizzazione dell'energia geotermica, negli ultimi decenni, ha avuto uno sviluppo considerevole: nei cinque anni tra il 1975 ed il 1979, la potenza geotermoelettrica installata è cresciuta da 75 a 462 MW_e ed alla fine dei cinque anni successivi (1984) ha raggiunto 1495 MW_e, con un incremento, in questi due periodi, del 500 e del 233 per cento (Dickson e Fanelli, 1988). Nei sedici anni seguenti, dal 1984 al 2000, vi è stato un ulteriore aumento di quasi il 150 per cento. In alcuni paesi l'energia geotermica svolge un ruolo significativo nel bilancio energetico nazionale: nel 2001 l'elettricità prodotta da risorse geotermiche rappresentava il 27% dell'elettricità totale prodotta nelle Filippine, il 12,4% in Kenya, l'11,4% in Costa Rica e il 4,3% in El Salvador.

Tabella 1 Potenza elettrica di fonte geotermica installata nel mondo nel 1995 e 2000 (da Hutterer, 2001) e nel 2003.

Paese	1995 (MW _e)	2000 (MW _e)	1995-2000 (aumento in MW _e)	% aumento (1995-2000)	2003 (MW _e)
Argentina	0.67	-	-	-	-
Australia	0.15	0.15	-	-	0.15
Austria	-	-	-	-	1.25
Cina	28.78	29.17	0.39	1.35	28.18
Costa Rica	55	142.5	87.5	159	162.5
El Salvador	105	161	56	53.3	161
Etiopia	-	7	7	-	7
Francia	4.2	4.2	-	-	15
Germania	-	-	-	-	0.23
Guatemala	-	33.4	33.4	-	29
Islanda	50	170	120	240	200
Indonesia	309.75	589.5	279.75	90.3	807
Italia	631.7	785	153.3	24.3	790.5
Giappone	413.7	546.9	133.2	32.2	560.9
Kenya	45	45	-	-	121
Messico	753	755	2	0.3	953
Nuova Zelanda	286	437	151	52.8	421.3
Nicaragua	70	70	-	-	77.5
Papua Nuova Guinea	-	-	-	-	6
Filippine	1227	1909	682	55.8	1931
Portogallo	5	16	11	220	16
Russia	11	23	12	109	73
Tailandia	0.3	0.3	-	-	0.3
Turchia	20.4	20.4	-	-	20.4
USA	2816.7	2228	-	-	2020
Totale	6833.35	7972.5	1728.54	16.7	8402.21

Per quanto riguarda gli *usi non elettrici* dell'energia geotermica (o usi diretti del calore geotermico), la Tabella 2 dà la potenza installata (15.145 MW_t) e l'energia utilizzata (190.699 TJ/anno) nel mondo nel 2000. Attualmente si conoscono usi non elettrici dell'energia geotermica in 58 paesi, mentre nel 1995 il loro numero era limitato a 28 e a 24 nel 1985. L'uso non elettrico più diffuso nel mondo (come potenza installata) è rappresentato dalle pompe di calore (34,80%), seguito da balneologia (26,20%), riscaldamento di ambienti (21,62%), serre (8,22%), acquacoltura (3,93%) e impieghi industriali diversi (3,13%) (Lund e Freeston, 2001).

Tabella 2 Usi non elettrici dell'energia geotermica nel mondo (2000): potenza termica installata (MW_t) e energia utilizzata (TJ/anno) (Lund e Freeston, 2001).

Paese	Potenza (MW _t)	Energia (TJ/anno)
Algeria	100	1586
Argentina	25.7	449
Armenia	1	15
Australia	34.4	351
Austria	255.3	1609
Belgio	3.9	107
Bulgaria	107.2	1637
Canada	377.6	1023
Caraibi	0.1	1
Cile	0.4	7
Cina	2282	37 908
Colombia	13.3	266
Croazia	113.9	555
Repubblica Ceca	12.5	128
Danimarca	7.4	75
Egitto	1	15
Finlandia	80.5	484
Francia	326	4895
Georgia	250	6307
Germania	397	1568
Grecia	57.1	385
Guatemala	4.2	117
Honduras	0.7	17
Ungheria	472.7	4086
Islanda	1469	20170
India	80	2517
Indonesia	2.3	43
Israele	63.3	1713
Italia	325.8	3774
Giappone	1167	26933
Giordania	153.3	1540
Kenya	1.3	10
Corea	35.8	753
Lituania	21	599
Macedonia	81.2	510
Messico	164.2	3919
Nepal	1.1	22
Olanda	10.8	57
Nuova Zelanda	307.9	7081
Norvegia	6	32
Perù	2.4	49
Filippine	1	25
Polonia	68.5	275
Portogallo	5.5	35
Romania	152.4	2871

Russia	308.2	6144
Serbia	80	2375
Repubblica Slovacca	132.3	2118
Slovenia	42	705
Svezia	377	4128
Svizzera	547.3	2386
Tailandia	0.7	15
Tunisia	23.1	201
Turchia	820	15756
Gran Bretagna	2.9	21
USA ¹	3766	20302
Venezuela	0.7	14
Yemen	1	15
Totale	15145	190699

¹ Nel 2003 le cifre riferite agli USA sono salite a 4350 MW_t e 22,250 TJ/a (Lund 2003)

NATURA DELLE RISORSE GEOTERMICHE

La Terra: un motore termico

Il *gradiente geotermico* dà la misura dell'aumento di temperatura con la profondità. Sino alle profondità raggiungibili con le moderne tecniche di perforazione, il gradiente geotermico medio è 2,5°-3°C/100 m. Di conseguenza, se la temperatura nei primi metri sotto la superficie, che corrisponde, con buona approssimazione, alla temperatura media annua dell'aria esterna, è 15°C, si può prevedere che la temperatura sia 65°-75°C a 2000 m di profondità, 90°-105°C a 3000 m e via di seguito per alcune migliaia di metri. Vi sono, comunque, vaste regioni nelle quali il valore del gradiente geotermico si discosta sensibilmente da quello medio. In aree in cui il basamento rigido sprofonda e si forma un bacino che si riempie rapidamente di sedimenti geologicamente “molto giovani”, il gradiente geotermico può essere anche inferiore a 1°C/100 m. Viceversa, in certe “aree geotermiche” il gradiente può raggiungere valori superiori a dieci volte quello normale.

La differenza di temperatura tra le zone profonde, più calde, e quelle superficiali, più fredde, dà origine ad un flusso di calore dall'interno verso l'esterno della Terra, tendente a stabilire condizioni di uniformità, condizioni che non saranno mai raggiunte. Il *flusso di*

calore terrestre medio è 65 mWm^{-2} nelle aree continentali e 101 mWm^{-2} nelle aree oceaniche, con una media ponderale globale di 87 mWm^{-2} (Pollack *et al.*, 1993). Questi valori sono basati su 24.774 misure eseguite in 20.201 siti, che coprono circa il 62% della superficie terrestre. Il flusso di calore delle aree non coperte da misure è stato stimato tenendo conto della distribuzione delle unità geologiche. L'analisi dei dati di flusso di calore terrestre di Pollack *et al.* (1993) è quella pubblicata più di recente. Un data base aggiornato comprendente i valori del flusso di calore delle aree continentali e marine è tuttavia accessibile presso l'University of North Dakota.

L'aumento della temperatura con la profondità, i vulcani, i geysers, le fumarole, le sorgenti calde sono manifestazioni tangibili e visibili del calore interno della Terra, ma questo calore è all'origine di fenomeni meno percettibili dagli uomini, ma di tale grandezza, che la Terra è stata paragonata ad un enorme “motore termico”. Cercheremo di descrivere in modo semplice questi fenomeni, che rientrano nella teoria della *tettonica a zolle*, e di mostrare quali relazioni vi sono tra essi e le risorse geotermiche.

Il nostro pianeta è formato dalla *crosta*, che ha uno spessore di circa 20-65 km nelle aree continentali e 5-6 km in quelle oceaniche, dal *mantello*, spesso approssimativamente 2900 km, e dal *nucleo*, che ha un raggio di circa 3470 km (Figura 1). Le proprietà fisiche e chimiche di crosta, mantello e nucleo variano andando dalla superficie verso l'interno della Terra. L'involucro esterno del globo, che prende il nome di *litosfera*, è formato dalla crosta e dalla parte più esterna del mantello. La litosfera, che ha uno spessore che va da meno di 80 km nelle aree oceaniche a più di 200 km in quelle continentali, si comporta come un corpo rigido. Sotto la litosfera si trova l'*astenosfera*, formata dalla parte alta del mantello, che, rispetto alla prima, ha un comportamento “meno rigido” o “più plastico”. In altre parole, sulla scala geologica, ove i tempi si misurano in milioni di anni, in certi fenomeni l'*astenosfera* si comporta in modo simile a quello di un fluido viscoso.

Le differenze di temperatura tra le diverse parti dell'astenosfera hanno prodotto moti convettivi nei materiali che la costituiscono, e, qualche diecina di milioni di anni fa, potrebbero essersi innescate vere e proprie celle di convezione. Il loro lentissimo movimento (pochi centimetri l'anno) è sostenuto dal calore prodotto in continuazione dal decadimento degli isotopi radioattivi e da quello che proviene dalle parti profonde del pianeta. Enormi volumi di rocce profonde, allo stato fuso o semifuso, più calde, meno dense e più leggere dei materiali sovrastanti, risalgono verso la superficie, mentre le rocce più vicine alla superficie, più fredde, più dense e più pesanti, tendono a scendere per riscaldarsi e risalire di nuovo, con un meccanismo che assomiglia a quello che si instaura in una pentola quando si riscalda dell'acqua.

Nelle zone dove è più sottile, e soprattutto nelle aree oceaniche, la litosfera è spinta verso l'alto e fratturata dal materiale molto caldo e parzialmente fuso, che risale dall'astenosfera in corrispondenza dei rami ascendenti delle celle convettive. E' questo meccanismo che ha formato, e tuttora forma, le *dorsali*, che si estendono per oltre 60.000 km sotto gli oceani, emergendo in alcune zone (Azzorre, Islanda) e talvolta insinuandosi tra i continenti come nel Mar Rosso. Una frazione relativamente piccola di rocce fuse, che risale dall'astenosfera, emerge dalla cresta delle dorsali e, a contatto con l'acqua marina, solidifica e forma nuova crosta oceanica. La maggior parte del materiale che risale dall'astenosfera, tuttavia, si divide in due rami, che scorrono in direzioni opposte sotto la litosfera. La continua formazione di nuova crosta e l'effetto di trascinamento dovuto ai due flussi, che scorrono in direzioni opposte, fanno in modo che i fondali oceanici, posti sui due lati delle dorsali, si allontanino l'uno dall'altro ad una velocità di pochi centimetri l'anno. Di conseguenza, la superficie dei fondali oceanici (la litosfera oceanica) tenderebbe ad aumentare. Le dorsali sono tagliate perpendicolarmente da enormi fratture, talvolta lunghe qualche centinaio di chilometri, chiamate *faglie trasformi*.

Questi fenomeni portano ad una semplice osservazione: poiché non c'è evidenza di un aumento della superficie della Terra nel tempo, la formazione di nuova litosfera lungo le dorsali e l'espansione dei fondi oceanici devono necessariamente essere compensate da una riduzione (o assorbimento) della litosfera, di pari entità, in altre parti del pianeta. In effetti, questo è quello che avviene nelle *zone di subduzione*, le maggiori delle quali si trovano in corrispondenza delle grandi fosse oceaniche, come quelle che si estendono lungo il margine occidentale dell'Oceano Pacifico e lungo la costa occidentale dell'America Meridionale. Nelle zone di subduzione la litosfera si inflette verso il basso, si immerge sotto la litosfera adiacente e scende nelle zone profonde molto calde, dove è “digerita” dal mantello, e il ciclo ricomincia nuovamente. Durante la discesa, parte del materiale litosferico ritorna allo stato fuso e può risalire alla superficie attraverso fratture della crosta. Come risultato, parallelamente alle fosse, dal lato opposto a quello in cui si allungano le dorsali, si sono formati *archi magmatici* con molti vulcani. Laddove le fosse si trovano nell'oceano aperto, come nel Pacifico occidentale, gli archi magmatici sono formati da catene di isole vulcaniche; dove le fosse si trovano lungo i margini dei continenti, gli archi consistono di catene montuose con numerosi vulcani, come le Ande. La Figura 4 presenta graficamente i fenomeni descritti.

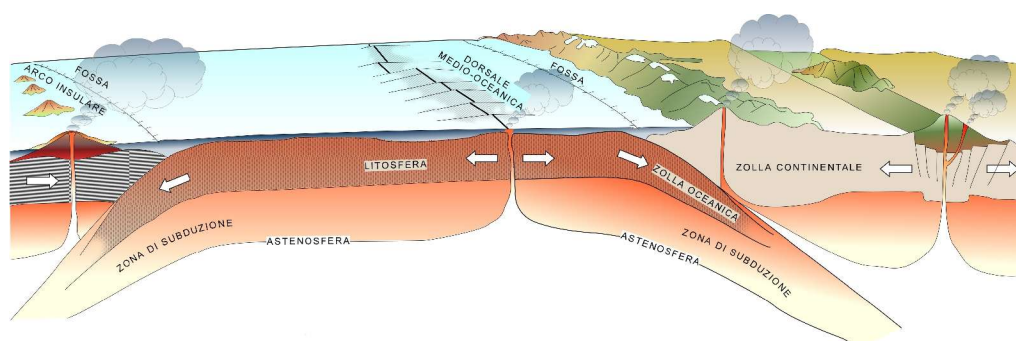


Figura 4

Sezione schematica, che mostra il meccanismo delle tettonica a zolle.

Le dorsali, le faglie trasformi e le zone di subduzione formano un enorme reticolato, che divide la Terra in placche litosferiche o *zolle*, sei di grandi dimensioni e numerose altre più

piccole (Figura 5). A causa delle grandi tensioni prodotte dai fenomeni descritti precedentemente, le zolle si muovono, scivolano lentamente l'una contro l'altra, collidono e cambiano continuamente la loro reciproca posizione. I margini delle zolle corrispondono a zone di fragilità e di forte fratturazione della crosta, caratterizzate da un'elevata sismicità, dalla presenza di molti vulcani e, a causa della risalita di materiali fusi molto caldi verso la superficie, da un flusso di calore terrestre elevato. Come si vede nella Figura 5, le più importanti aree geotermiche si trovano nei pressi dei margini delle zolle crostali.



Figura 5

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.

I sistemi geotermici

Sistemi geotermici possono formarsi in regioni con gradiente geotermico normale o poco più alto e, soprattutto, nelle regioni prossime ai margini delle zolle crostali, dove il valore del gradiente geotermico può essere anche notevolmente superiore a quello medio. Nel

primo caso, questi sistemi hanno temperature basse, di solito non più di 100°C a profondità economicamente utili, mentre nel secondo caso, si può avere una vasta gamma di temperature, da basse sino ad oltre 400°C.

Un *sistema geotermico* può essere definito schematicamente come “un sistema acqueo convettivo, che, in uno spazio confinato della parte superiore della crosta terrestre, trasporta il calore da una sorgente termica al luogo, generalmente la superficie, dove il calore stesso è assorbito (disperso o utilizzato)” (Hochstein, 1990). Un sistema geotermico è formato da tre elementi: la *sorgente di calore*, il *serbatoio* ed il *fluido*, che è il mezzo che trasporta il calore. La sorgente di calore può essere una intrusione magmatica a temperatura molto alta (>600°C), che si è posizionata a profondità relativamente piccola (5-10 km), oppure, come in certi sistemi a bassa temperatura, il normale calore della Terra. Il serbatoio è un complesso di rocce calde permeabili nel quale i fluidi possono circolare assorbendo il calore. Il serbatoio generalmente è ricoperto da rocce impermeabili e connesso a zone di ricarica superficiali dalle quali le acque meteoriche possono sostituire, totalmente o parzialmente, i fluidi perduti attraverso vie naturali (per esempio sorgenti) o che sono estratti mediante pozzi. Il fluido geotermico, nella maggioranza dei casi, è acqua meteorica in fase liquida o vapore, in dipendenza dalla sua temperatura e pressione. Quest’acqua spesso trascina con se sostanze chimiche e gas, come CO₂, H₂S ed altri. La Figura 6 è la rappresentazione schematica e molto semplificata di un sistema geotermico.

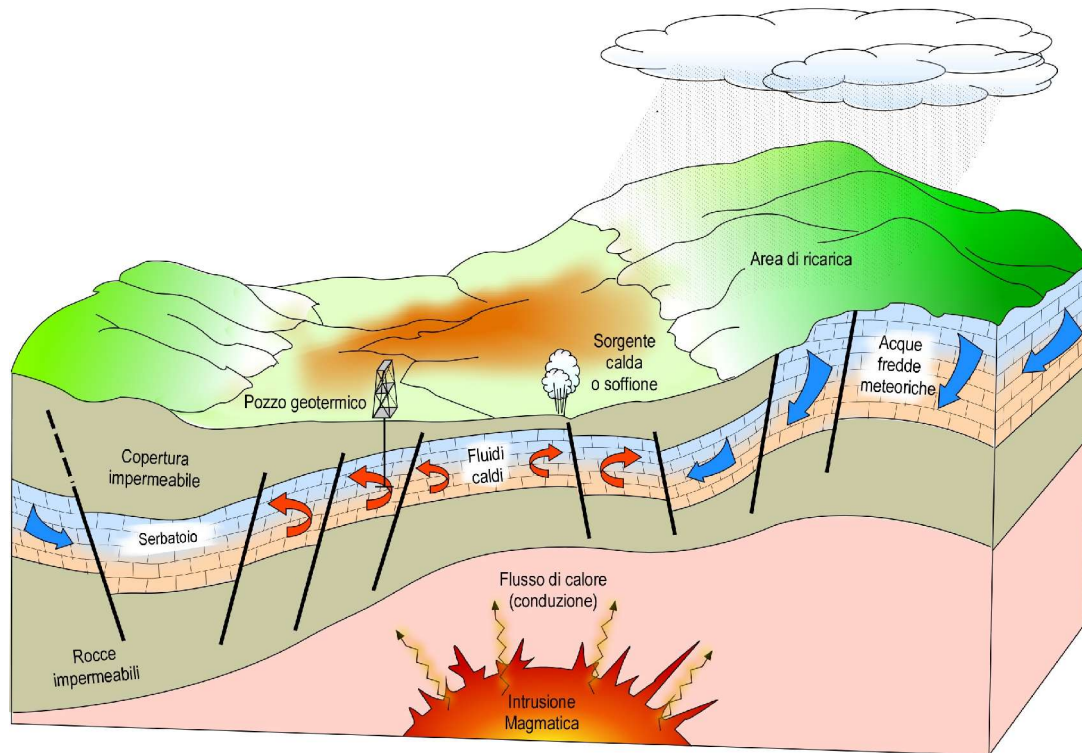


Figura 6

Rappresentazione schematica di un sistema geotermico.

Le leggi che regolano la *convezione* dei fluidi sono alla base del meccanismo dei sistemi geotermici. La Figura 7 descrive schematicamente questo meccanismo, prendendo ad esempio un sistema idrotermale a media temperatura. La convezione si attiva in seguito al riscaldamento ed alla conseguente espansione termica del fluido in un campo gravitazionale; il calore alla base del sistema di circolazione è l'energia che alimenta e muove il sistema. Il fluido caldo e di minor densità tende a salire e ad essere sostituito dal fluido più freddo e di densità maggiore, proveniente dai margini del sistema. La convezione, per sua natura, tende a far aumentare la temperatura delle parti alte del sistema, mentre la temperatura delle parti inferiori diminuisce (White, 1973).

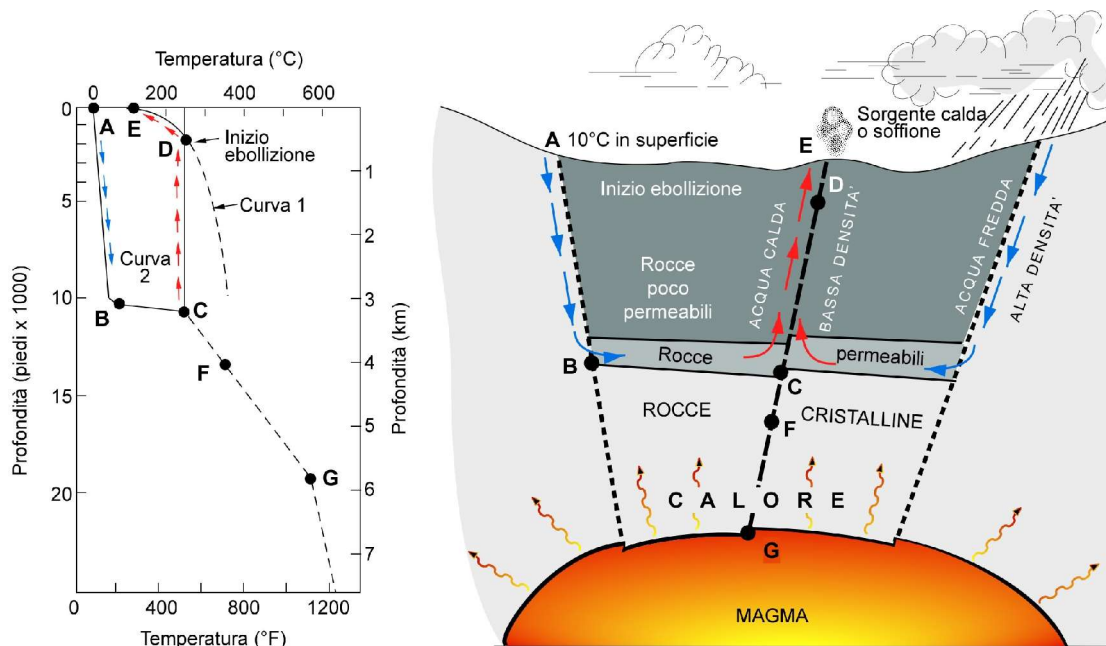


Figura 7

Modello di un sistema geotermico. La curva 1 è la curva di ebollizione dell'acqua; la curva 2 mostra l'andamento della temperatura del fluido lungo il suo percorso dal punto di ingresso A a quello di uscita E.

Il fenomeno descritto può sembrare semplice; in pratica, la costruzione del modello di un sistema geotermico reale non è affatto facile. Essa coinvolge diverse discipline e richiede una vasta esperienza, soprattutto se si ha a che fare con sistemi ad alta temperatura. In natura, inoltre, si possono formare sistemi geotermici in varie combinazioni di situazioni geologiche, fisiche e chimiche, dando origine a tipi diversi di sistemi.

La sorgente di calore è l'unico dei tre elementi di un sistema geotermico che deve essere naturale. Gli altri due elementi, se esistono le condizioni adatte, possono essere "artificiali". Per esempio, i fluidi geotermici estratti dal serbatoio per alimentare la turbina di una centrale elettrica, dopo averne sfruttato l'energia, possono essere immessi di nuovo nel serbatoio attraverso appositi *pozzi di reiniezione*. In questo modo la ricarica naturale del serbatoio è integrata dalla ricarica artificiale. Da diversi anni, inoltre, la reiniezione dei fluidi sfruttati è stata adottata per ridurre drasticamente l'impatto ambientale degli impianti geotermici.

La ricarica artificiale attraverso pozzi di iniezione può essere anche un mezzo per riattivare campi geotermici vecchi o ‘esauriti’. Per esempio, a The Geysers (California), uno dei più grandi campi geotermici del mondo, la produzione ha cominciato a diminuire rapidamente alla fine degli anni '80 per mancanza di fluidi nel serbatoio. Un primo sistema di ricarica, il ‘Southeast Geysers Effluent Recycling Project’, che trasporta al campo geotermico acque di discarica depurate da una distanza di 48 km, ha permesso di riattivare alcune centrali elettriche che erano state messe fuori esercizio. E’ inoltre previsto che altri 41,5 milioni di litri di acque di discarica trattate siano pompate e trasportati giornalmente a The Geysers, con un sistema di tubazioni lungo 66 km dalla zona di Santa Rosa, per essere iniettati nel serbatoio attraverso pozzi perforati appositamente (Santa Rosa Geysers Recharge Project).

Nel Progetto *Rocce Calde Secche* (HDR Project), avviato negli Stati Uniti nei primi anni '70, sia il fluido che il serbatoio sono artificiali. Attraverso un pozzo appositamente perforato, acqua ad alta pressione viene pompata in una formazione di roccia calda compatta, provocando la sua *fatturazione idraulica*. L’acqua penetra e circola nelle fratture prodotte artificialmente ed estrae il calore dalle rocce all’intorno, che funzionano come un serbatoio naturale. Questo serbatoio viene poi raggiunto ed intersecato da un secondo pozzo usato per estrarne l’acqua, che ha acquistato calore. Questo sistema, quindi, consiste (i) del pozzo usato per la fratturazione idraulica, attraverso il quale acqua fredda è iniettata nel (ii) serbatoio artificiale, e (iii) del pozzo per l’estrazione dell’acqua calda (Figura 8). L’intero sistema, comprendente anche l’impianto di utilizzazione in superficie, forma un circuito chiuso, evitando ogni contatto tra il fluido e l’ambiente esterno (Garnish, 1987).

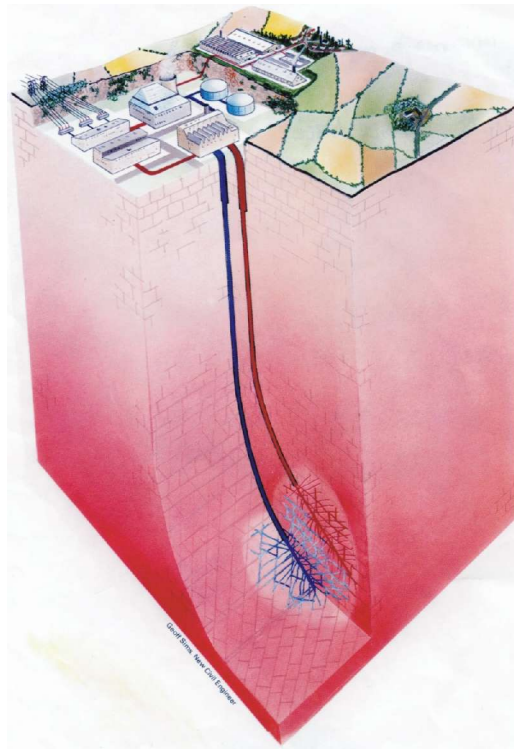


Figura 8

Rappresentazione schematica di un sistema geotermico artificiale (Rocce Calde Secche).

Il progetto HDR di Los Alamos ha aperto la strada ad altri progetti basati su concetti simili, che sono stati sviluppati in Australia, Francia, Germania, Giappone e Gran Bretagna. Dopo un periodo di relativo abbandono, questi progetti hanno avuto nuovo impulso a seguito del riconoscimento che le rocce profonde posseggono un certo grado di fratturazione naturale e che le metodologie e le tecnologie che, di volta in volta, vengono applicate sono strettamente dipendenti dalle condizioni geologiche locali. Ad oggi le ricerche più avanzate sono state svolte in Giappone ed in Alsazia (Francia) nell'ambito del Progetto Europeo. I vari progetti iniziati in Giappone negli anni '80 (a Hijiori, Ogachi e Yunomori), largamente finanziati dal governo giapponese e dalle industrie, hanno dato risultati molto interessanti sia dal punto di vista scientifico che industriale. Il progetto HDR europeo è stato sviluppato in diverse fasi comprendenti anche la perforazione di due pozzi, uno dei quali ha raggiunto la profondità di 5060 metri. Dalla prospezione geofisica e dalle

prove idrauliche sono stati ottenuti risultati molto incoraggianti, ed il progetto europeo sembra essere quello più promettente.

DEFINIZIONI E CLASSIFICAZIONE DELLE RISORSE GEOTERMICHE

Non esiste ancora una terminologia standard adottata in campo internazionale da scienziati e tecnici geotermici. Quelle che seguono sono alcune delle definizioni e classificazioni più diffusamente usate nel settore delle risorse geotermiche.

Quando si parla genericamente di risorse geotermiche, di solito ci si riferisce a quelle che più precisamente dovrebbero essere chiamate *risorse di base accessibili*, intendendo con questo termine tutta l'energia termica contenuta tra la superficie terrestre ed una determinata profondità, in un'area definita e misurata partendo dalla temperatura media annua locale (Muffler e Cataldi, 1978). Le risorse di base accessibili comprendono le *risorse di base accessibili utili* (= *Risorse*) – quella parte delle risorse di base accessibili che potrebbe essere estratta, economicamente in accordo con la legislazione locale, entro un periodo di tempo definito (meno di 100 anni). Questa categoria comprende le *risorse economiche individuate* (= *Riserve*) – quella parte delle risorse di una determinata area, che può essere estratta legalmente ad un costo competitivo con altre fonti commerciali di energia e che è stata confermata da perforazioni o dai risultati dell'esplorazione geologica, geochimica e geofisica. La Figura 9 spiega graficamente questi termini ed altri, che possono essere usati dagli esperti geotermici.

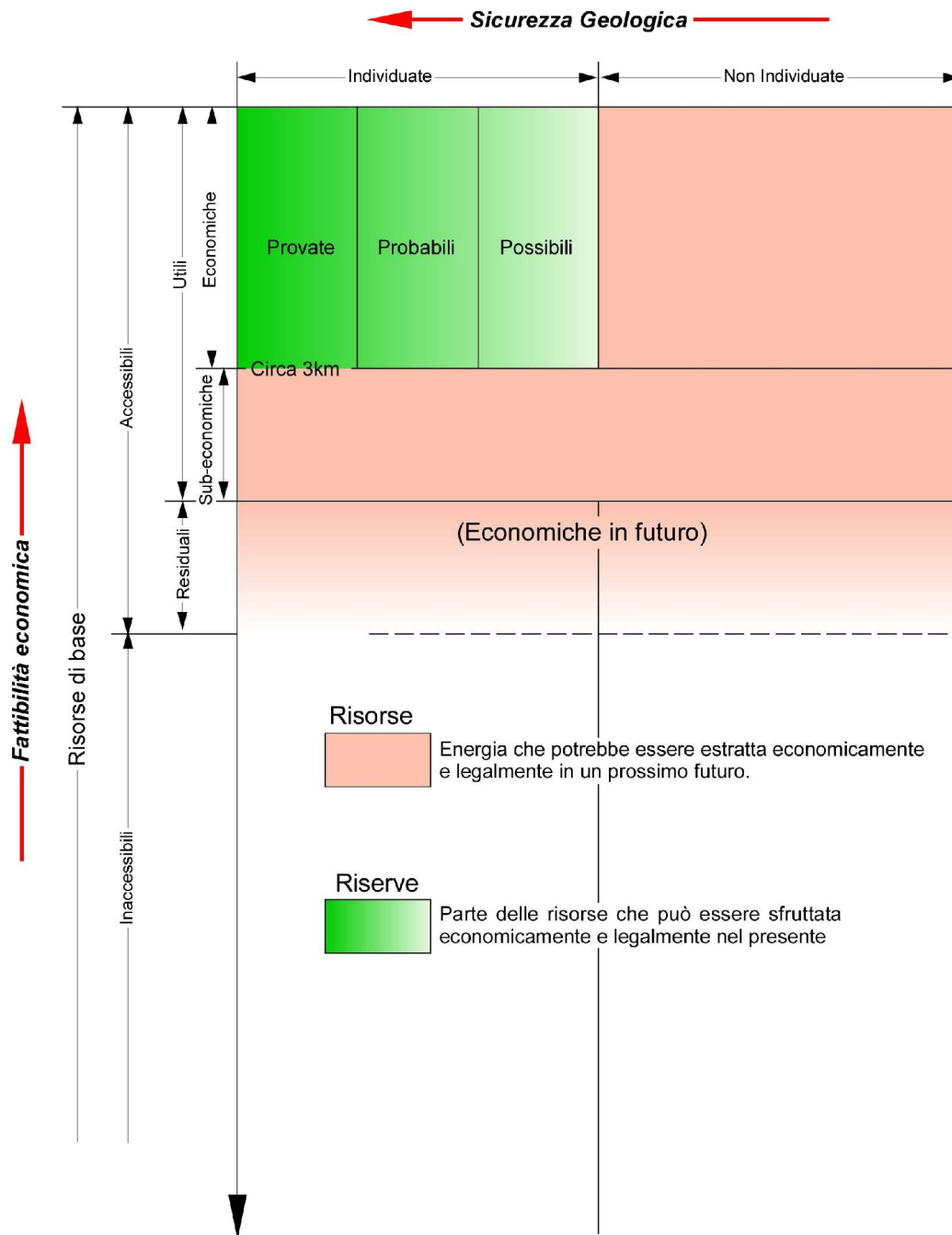


Figura 9

Diagramma con le diverse categorie di risorse geotermiche (da Muffler e Cataldi, 1978). L'asse verticale indica il grado di fattibilità economica; l'asse orizzontale il grado di sicurezza geologica.

Il più comune criterio di classificazione delle risorse geotermiche si basa sull'entalpia dei fluidi, che trasferiscono il calore dalle rocce calde profonde alla superficie. L'entalpia, che può essere considerata più o meno proporzionale alla temperatura, è usata per esprimere il

contenuto termico (energia termica) dei fluidi, e dà un'idea approssimativa del loro “valore”. Le risorse sono divise in risorse a bassa, media ed alta entalpia (o temperatura), secondo diversi criteri. La Tabella 3 riporta le classificazioni proposte da alcuni esperti. Quando si parla di fluidi geotermici è bene, comunque, indicare la loro temperatura, o almeno un intervallo di temperatura, perché i termini bassa, media o alta possono avere significati diversi e creare errori di interpretazione.

Tabella 3 Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura (°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)

Frequentemente viene fatta una suddivisione tra sistemi geotermici ad acqua dominante e sistemi geotermici a vapore dominante (o a vapore secco) (White, 1973). Nei *sistemi ad acqua dominante*, l'acqua liquida è la fase continua, che controlla la pressione. Vapore può essere presente, in forma di bolle. Questi sistemi geotermici, la cui temperatura può andare da <125° a >225°C, sono i più diffusi nel mondo. Essi possono produrre, in funzione dalla loro temperatura e pressione, acqua calda, una miscela di acqua e vapore, vapore umido e, in alcuni casi, vapore secco. Nei *sistemi a vapore dominante* normalmente coesistono nel serbatoio acqua liquida e vapore, che è la fase continua e controlla la pressione. Sono sistemi ad alta temperatura e normalmente producono vapore secco o surriscaldato. I sistemi geotermici di questo tipo sono piuttosto rari; i più conosciuti sono Larderello in Italia e The Geysers in California.

I termini *vapore umido*, *vapore secco* e *vapore surriscaldato*, usati frequentemente, richiedono una spiegazione per i lettori non ingegneri. Per fare le cose semplici, prendiamo

l'esempio di un recipiente riempito con acqua (liquida), che possa essere mantenuto alla pressione costante di 1 atm (101,3 kPa). Se riscaldiamo l'acqua, essa comincerà a bollire una volta raggiunti i 100°C (temperatura di ebollizione alla pressione di 1 atm), passando dalla fase liquida a quella gassosa (vapore). Dopo un certo tempo il recipiente conterrà sia liquido, che vapore. Il vapore che coesiste con il liquido, in equilibrio termodinamico con esso, è vapore umido. Se continueremo a riscaldare il recipiente, mantenendo costante la pressione di 1 atm, il liquido evaporerà totalmente ed il recipiente conterrà soltanto vapore. Questo è vapore secco. Sia il vapore umido che il vapore secco prendono il nome di vapore saturo. Infine, se si aumenta la temperatura sino, per esempio, a 120°C, tenendo sempre la pressione ad 1 atm, avremo vapore surriscaldato, con un surriscaldamento di 20°C, cioè 20° C sopra la temperatura di evaporazione a quella pressione. Ad altre temperatura e pressioni, questi fenomeni si verificano anche nel sottosuolo, che un autore, parecchi anni fa, ha chiamato “la pentola della natura”.

Un'altra suddivisione dei sistemi geotermici è basata sullo *stato di equilibrio del serbatoio* (Nicholson, 1993), che tiene conto della circolazione dei fluidi e dello scambio termico nel serbatoio. Nei *sistemi dinamici* l'acqua ricarica in continuazione il serbatoio, si riscalda ed è poi scaricata alla superficie o nel sottosuolo stesso nelle formazioni rocciose permeabili all'intorno. Il calore è acquisito dal sistema per conduzione e per effetto della circolazione dei fluidi. Questa categoria comprende sistemi ad alta temperatura (>150°C) e a bassa temperatura (<150°C). Nei *sistemi statici* la ricarica del serbatoio è molto ridotta o nulla e lo scambio termico avviene soltanto per conduzione. Questa categoria comprende sistemi a bassa temperatura e i sistemi geopressurizzati. I *sistemi geopressurizzati* possono formarsi nei grandi bacini sedimentari (per esempio, il Golfo del Messico) a profondità di 3–7 km. I serbatoi geopressurizzati sono formati da rocce sedimentarie permeabili, inglobate entro strati impermeabili a bassa conduttività, contenenti acqua calda pressurizzata, che è rimasta intrappolata al momento della deposizione dei sedimenti. La pressione dell'acqua calda è vicina alla pressione litostatica, superando largamente la pressione idrostatica. I

serbatoi geopressurizzati possono contenere anche quantità significative di metano. I sistemi geopressurizzati potrebbero produrre energia termica e idraulica (acqua calda in pressione) e gas metano. Questa risorsa è stata studiata in modo approfondito, ma, sino ad oggi, non è seguito uno sfruttamento industriale.

Il termine *campo geotermico* è una definizione geografica, che generalmente indica una zona della superficie terrestre con attività geotermica. In assenza di manifestazioni geotermiche superficiali, questo termine è usato per indicare un'area corrispondente ad un serbatoio geotermico profondo (Axelsson e Gunlaugsson, 2000).

L'energia geotermica è generalmente definita *rinnovabile e sostenibile*. Il termine rinnovabile si riferisce ad una proprietà della sorgente di energia, mentre il termine sostenibile descrive come la risorsa è utilizzata.

La ricarica di energia è il fattore critico della *rinnovabilità* di una risorsa geotermica. Quando si sfrutta un sistema geotermico naturale, la ricarica energetica avviene attraverso l'apporto al sistema di fluidi caldi contemporaneamente (o in tempi comparabili) allo sfruttamento. Questo permette di classificare l'energia geotermica come risorsa energetica rinnovabile. Nel caso delle rocce calde secche e di certi acquiferi caldi in bacini sedimentari (geopressurizzati), la ricarica energetica avviene solo per conduzione termica; a causa della lentezza di questo fenomeno, le rocce calde secche ed alcuni serbatoi sedimentari dovrebbero essere considerati risorse energetiche limitate (Stefansson, 2000).

La *sostenibilità dell'utilizzazione* di una risorsa dipende dalla sua quantità iniziale, dalla velocità con cui si rigenera e dalla velocità con cui si consuma. Ovviamente, l'utilizzazione può essere sostenuta per tutto il tempo che si vuole, purché la risorsa si rigeneri ad una velocità maggiore di quanto non sia sfruttata. Il termine *sviluppo sostenibile* è usato dalla Commissione Mondiale per l'Ambiente e lo Sviluppo per descrivere lo sviluppo che "soddisfa le necessità della presente generazione senza compromettere le necessità delle generazioni future". In questo quadro, lo sviluppo sostenibile non richiede che tutte le risorse energetiche debbano essere usate in modo completamente sostenibile, ma, più

semplicemente, che ad una data risorsa, che si esaurisce, se ne possa sostituire un'altra in grado di far fronte alle necessità delle generazioni future. Ne segue che un particolare campo geotermico non deve necessariamente essere sfruttato in modo sostenibile. I programmi per realizzare la sostenibilità dell'energia geotermica dovrebbero tendere a raggiungere, e poi sostenere, un certo livello di produzione, a livello nazionale o regionale, sia nel settore elettrico sia in quello dell'uso diretto del calore, per un dato periodo, ad esempio 300 anni, mettendo in produzione nuovi sistemi geotermici, man mano che altri si esauriscono (Wright, 1998).

L'ESPLORAZIONE GEOTERMICA

Obbiettivi dell'esplorazione

Gli obbiettivi dell'*esplorazione geotermica* sono (Lumb, 1981):

1. Identificare i fenomeni geotermici.
2. Accertare l'esistenza di aree con produzione geotermica sfruttabile.
3. Valutare la dimensione delle risorse.
4. Determinare il tipo dei campi geotermici.
5. Localizzare le zone produttive.
6. Determinare il contenuto termico dei fluidi.
7. Compilare una base di dati, che possa servire di riferimento per i futuri monitoraggi.
8. Determinare, prima di iniziare lo sfruttamento, i parametri sensibili per l'ambiente.
9. Individuare le caratteristiche che potrebbero creare problemi durante lo sfruttamento del campo.

L'importanza relativa di ogni obiettivo dipende da numerosi fattori, la maggior parte dei quali è collegata alla risorsa. Questi fattori comprendono la forma di utilizzazione prevista, la tecnologia disponibile, gli aspetti economici, ed anche la situazione locale, il sito, ed il

periodo, tutti elementi che influiscono sul programma di esplorazione. Per esempio, il riconoscimento preliminare delle manifestazioni geotermiche ha un'importanza molto maggiore in un'area remota e non esplorata di quanto abbia in un'area conosciuta; valutare le dimensioni di una risorsa può avere un'importanza minore, se questa sarà usata per un piccolo impianto richiedente molto meno energia termica di quanta ne viene fornita per vie naturali; se si prevede di utilizzare il calore per il riscaldamento di ambienti o per altre forme d'uso, che richiedono basse temperature, la ricerca di fluidi ad alta entalpia può essere esclusa dagli obbiettivi (Lumb, 1981).

Per raggiungere questi obbiettivi sono disponibili numerosi metodi e tecnologie, molti dei quali sono di uso comune e sono stati ampiamente sperimentati in altri settori della ricerca. E' necessario tener presente, comunque, che le tecniche e le metodologie che si sono dimostrate utili nella ricerca mineraria o per idrocarburi non sono necessariamente la miglior soluzione per l'esplorazione geotermica. D'altra parte, tecniche di scarso impiego nella ricerca petrolifera, sono, in certi casi, strumenti ideali nell'esplorazione geotermica (Combs e Muffler, 1973).

Metodi di esplorazione

Gli *studi geologici ed idrogeologici* sono il punto di partenza di ogni programma di esplorazione. Il loro scopo principale è quello di definire la posizione e l'estensione delle aree da investigare con maggiore dettaglio e di suggerire i metodi di esplorazione più adatti per queste aree. Gli studi geologici ed idrogeologici hanno una grande importanza per tutte le fasi successive della ricerca geotermica, sino alla localizzazione dei pozzi esplorativi e di produzione. Essi inoltre forniscono le informazioni di base per interpretare i dati forniti dagli altri metodi di esplorazione e, infine, per costruire un modello realistico del sistema geotermico e valutare il potenziale della risorsa. I dati ottenuti dagli studi geologici ed idrogeologici sono utili anche nella fase di sfruttamento perché forniscono informazioni utilizzabili dagli ingegneri del serbatoio e di produzione. La durata ed il costo di questa fase

dell'esplorazione possono essere sensibilmente ridotti da un programma ben organizzato e da un efficiente coordinamento della ricerca.

La *prospezione geochimica* (comprendente la geochimica isotopica) rappresenta un ottimo mezzo per stabilire se un sistema geotermico è ad acqua o a vapore dominante, per prevedere la temperatura minima del serbatoio, per stimare l'omogeneità dell'apporto di acqua, per determinare le caratteristiche chimiche del fluido profondo e per individuare l'origine dell'acqua di ricarica. Possono anche ricavarsi utili informazioni sui problemi che possono verificarsi nella fase di reiniezione e durante l'utilizzazione (per esempio, variazioni nella composizione del fluido, fenomeni di corrosione ed incrostazione nei tubi e negli impianti, impatto sull'ambiente) e sul modo di evitare o ridurre questi problemi. La prospezione geochimica comporta il campionamento e l'analisi chimica e/o isotopica delle acque e dei gas prodotti dalle manifestazioni geotermiche (sorgenti termali, fumarole, ecc.) o dai pozzi che si trovano nell'area in studio. La prospezione geochimica fornisce anche dati utili per programmare le successive fasi dell'esplorazione ed ha un costo relativamente basso in confronto ad altri metodi più sofisticati, come quelli geofisici; per questa ragione, essa dovrebbe essere impiegata, per quanto possibile, prima di altri metodi più costosi.

La *prospezione geofisica* ha lo scopo di ottenere indirettamente, dalla superficie o da intervalli di profondità vicini alla superficie, i parametri fisici delle formazioni geologiche profonde. Questi parametri fisici comprendono la temperatura (prospezione termica), la conducibilità elettrica (metodi elettrici ed elettromagnetici), la velocità di propagazione delle onde elastiche (prospezione sismica), la densità (prospezione gravimetrica) e la suscettibilità magnetica (prospezione magnetica). Alcuni di questi metodi, come quelli sismici, gravimetrici e magnetici, che sono di uso normale nella ricerca petrolifera, possono dare molte informazioni sulla forma, dimensioni, profondità e altre importanti caratteristiche delle strutture geologiche profonde, che potrebbero costituire un serbatoio geotermico, ma danno poche, o nessuna, indicazioni sulla presenza all'interno di queste strutture dei fluidi, che costituiscono l'obiettivo della ricerca geotermica. Essi sono pertanto i più utili per definire i

dettagli nelle fasi finali dell'esplorazione, prima che siano posizionati i pozzi esplorativi. Informazioni sull'esistenza di fluidi geotermici nelle strutture geologiche si possono ottenere dalle prospezioni elettriche ed elettromagnetiche, che sono più sensibili di altri metodi alla presenza di questi fluidi ed alle variazioni di temperatura; queste tecniche sono state ampiamente applicate con soddisfacenti risultati. In particolare, il metodo magnetotellurico (MT), che sfrutta le onde elettromagnetiche generate dalle tempeste solari, è stato notevolmente perfezionato negli ultimi anni e attualmente offre una vasta gamma di applicazioni, anche se richiede una strumentazione sofisticata ed è sensibile al rumore di fondo nelle aree abitate. Il principale vantaggio del metodo magnetotellurico sta nella sua capacità di definire strutture più profonde di quelle raggiungibili con i metodi elettrici e gli altri elettromagnetici. Più recentemente è stato messo a punto il metodo audiomagnetotellurico a sorgente controllata (CSAMT), che utilizza onde elettromagnetiche prodotte artificialmente anziché quelle naturali. Con questo metodo si raggiungono profondità inferiori a quelle raggiungibili con il classico metodo MT, ma esso è più veloce, meno costoso e fornisce maggiori dettagli. I metodi termici (misure di temperatura, determinazione del gradiente geotermico e del flusso di calore terrestre) spesso possono dare con buona approssimazione la temperatura della parte superiore del serbatoio geotermico.

La perforazione dei *pozzi esplorativi* è la fase finale di ogni programma di esplorazione ed è il solo metodo che permette di definire con certezza le caratteristiche di un serbatoio geotermico e di valutarne il potenziale (Combs e Muffler, 1973). I dati forniti dai sondaggi esplorativi hanno lo scopo di verificare le ipotesi ed i modelli elaborati con i risultati dell'esplorazione di superficie. Essi inoltre devono confermare che il serbatoio è produttivo e contiene fluidi in quantità adeguata e con caratteristiche adatte all'utilizzazione prevista. Posizionare i pozzi esplorativi è pertanto un'operazione molto delicata.

Programma d'esplorazione

Prima di definire un programma d'esplorazione geotermica è necessario raccogliere tutti i dati geologici, geofisici e geochimica già esistenti. I dati geotermici devono essere integrati con quelli derivanti dalle ricerche idriche, minerarie e petrolifere effettuate nell'area in studio ed in quelle vicine. Le informazioni raccolte in questa fase preliminare sono importanti per ben individuare gli obiettivi del programma d'esplorazione geotermica e talvolta consentono una significativa riduzione dei costi.

Un programma d'esplorazione si sviluppa normalmente in fasi successive: *riconoscimento*, *prefattibilità* e *fattibilità*. Durante ciascuna di queste fasi, sono gradualmente eliminate le aree meno interessanti, mentre la ricerca si concentra in quelle più promettenti. I metodi di investigazione applicati, inoltre, diventano progressivamente più sofisticati e forniscono maggiori dettagli man mano che il programma procede. La dimensione e l'impegno finanziario dell'intero programma devono essere proporzionati ai suoi obiettivi, all'importanza delle risorse ipotizzabili ed alla forma di utilizzazione prevista. Il programma d'esplorazione deve essere flessibile e essere ridefinito man mano che si rendono disponibili i risultati delle ricerche svolte nelle varie fasi; nello stesso modo, i modelli geologici e geotermici devono essere progressivamente aggiornati e ottimizzati. Questi riesami periodici del programma dovrebbero eliminare tutte le azioni non più necessarie ed eventualmente avviarne altre, suggerite dai risultati ottenuti nelle varie fasi. Naturalmente, ogni riduzione del numero e delle dimensioni delle operazioni di prospezione ha per effetto una diminuzione dei costi, ma anche un aumento del rischio di errori o di fallire l'obiettivo. D'altra parte la diminuzione del rischio minerario comporta un aumento generalizzato dei costi. Il successo economico di un programma d'esplorazione sta appunto nel trovare un buon equilibrio tra le due opposte esigenze di ridurre i costi e di diminuire i rischi.

UTILIZZAZIONE DELLE RISORSE GEOTERMICHE

La produzione di elettricità è la forma di utilizzazione più importante delle risorse geotermiche ad alta temperatura ($>150^{\circ}\text{C}$). Le risorse a temperatura medio – bassa ($<150^{\circ}\text{C}$) sono adatte a molti tipi di impiego. Il classico diagramma di Lindal (Lindal, 1973), che mostra i possibili usi dei fluidi geotermici alle varie temperature, è sempre attuale (Figura 10, derivata dall'originale e con l'aggiunta della generazione di elettricità con cicli binari).

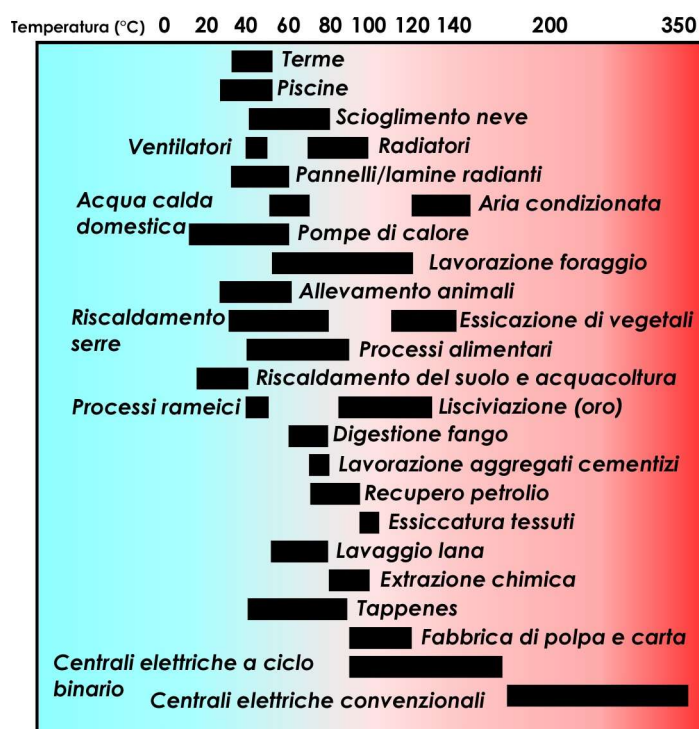


Figura 10

Diagramma con l'utilizzazione dei fluidi geotermici (derivato da Lindal, 1973).

I fluidi con temperatura inferiore a 20°C sono usati raramente ed in casi particolari oppure per il funzionamento di pompe di calore. Il diagramma di Lindal mette in evidenza due aspetti importanti dell'utilizzazione delle risorse geotermiche (Gudmundsson, 1988): (a) con progetti a cascata o combinati è possibile estendere lo sfruttamento delle risorse e (b) la temperatura dei fluidi costituisce il principale fattore limitante la possibile utilizzazione. L'ingegneria degli impianti industriali già esistenti, che utilizzano processi termici, può, in

alcuni casi, essere modificata ed adattata ai fluidi geotermici, estendendone le possibili applicazioni.

La produzione di energia elettrica

L'energia elettrica è prodotta in impianti convenzionali o a ciclo binario, secondo le caratteristiche delle risorse geotermiche disponibili.

Gli *impianti convenzionali* richiedono fluidi con una temperatura di almeno 150°C e sono disponibili nel tipo a contropressione (con scarico diretto nell'atmosfera) e a condensazione. Gli impianti a contropressione sono più semplici e meno costosi. Il vapore, proveniente direttamente dai pozzi, se questi producono vapore secco, oppure dopo la separazione della parte liquida, se i pozzi producono vapore umido, passa attraverso la turbina ed è poi scaricato nell'atmosfera (Figura 11). Con questo tipo di impianto il consumo di vapore (alla stessa pressione di ingresso) per kilowattora prodotto è circa il doppio di quello di un impianto a condensazione. Gli impianti a contropressione, tuttavia, sono molto utili come impianti pilota, come impianti temporanei collegati a pozzi isolati di portata modesta, e per produrre elettricità da pozzi sperimentali durante lo sviluppo di un campo geotermico. Essi sono utilizzati anche quando il vapore ha un contenuto elevato di gas incondensabili (>12% in peso). Le unità a contropressione possono essere costruite ed installate molto rapidamente e messe in servizio 13–14 mesi dopo la data dell'ordine o poco più. Questi impianti sono generalmente di piccole dimensioni (2,5–5 MW_e).

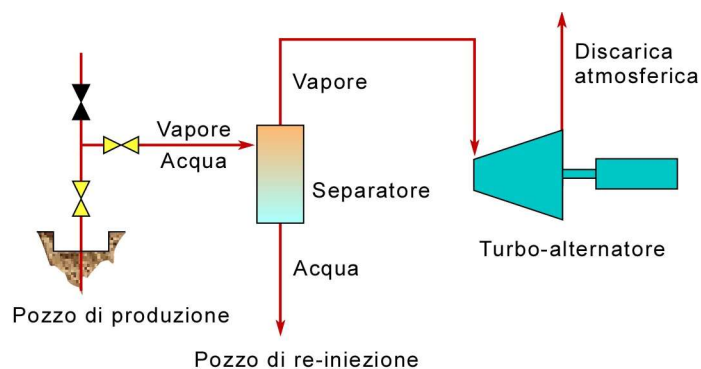


Figura 11

Rappresentazione schematica di un impianto a contropressione per generazione di elettricità. In rosso il circuito del fluido geotermico.

Le unità a condensazione (Figura 12), che richiedono più impiantistica ausiliaria, sono più complesse di quelle a contropressione e, anche per le loro maggiori dimensioni, è necessario un tempo almeno doppio per la loro costruzione ed installazione. Il consumo specifico delle unità a condensazione è, tuttavia, circa la metà di quelle a contropressione. Attualmente sono molto diffusi impianti a condensazione della potenza di 55–60 MW_e, ma recentemente sono state costruite ed installate anche unità da 110 MW_e.

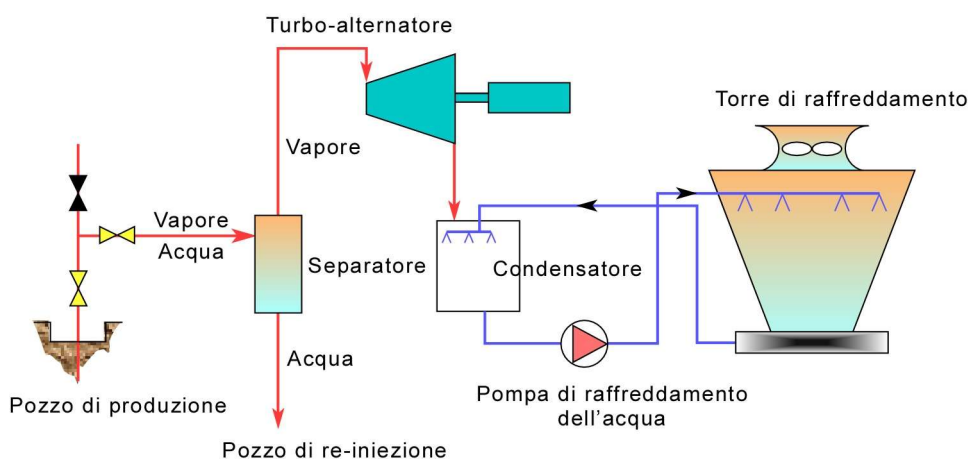


Figura 12

Rappresentazione schematica di un impianto a condensazione per generazione di elettricità. In rosso il circuito del fluido geotermico, in blu il circuito di raffreddamento.

I notevoli progressi, realizzati negli ultimi decenni, nella tecnologia dei cicli binari hanno reso possibile produrre elettricità, sfruttando fluidi geotermici a temperatura medio-bassa ed acque calde di scarico emesse dai separatori nei campi geotermici ad acqua dominante. Gli *impianti binari* utilizzano un fluido secondario di lavoro, di solito un fluido organico (come n-pentano), che ha un basso punto di ebollizione ed un'elevata pressione di vapore a bassa temperatura rispetto al vapore acqueo. Il fluido secondario lavora in un ciclo Rankine convenzionale: il fluido geotermico cede calore al fluido secondario attraverso uno scambiatore di calore, nel quale questo fluido si riscalda e poi vaporizza; il vapore prodotto

aziona una normale turbina a flusso assiale collegata ad un generatore, è poi raffreddato, passando allo stato liquido, ed il ciclo comincia di nuovo.

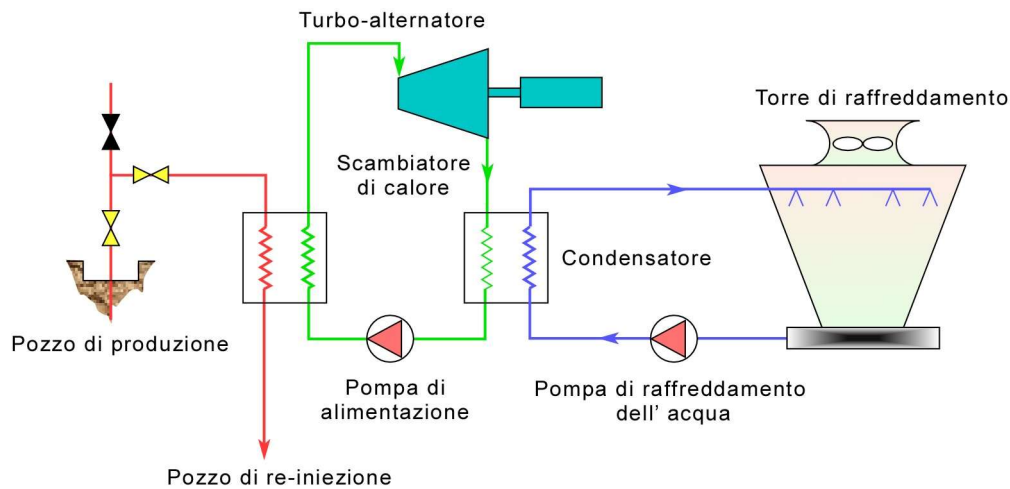


Figura 13

Rappresentazione schematica di un impianto a ciclo binario per generazione di elettricità. In rosso il circuito del fluido geotermico, in verde il circuito del fluido secondario, in blu il circuito di raffreddamento.

Scegliendo opportunamente il fluido secondario, è possibile costruire impianti binari, che sfruttano fluidi geotermici con temperature comprese tra 85° e 170°C. Il limite superiore è imposto dalla stabilità termica dei fluidi organici di lavoro, il limite inferiore da fattori tecnico-economici: sotto questa temperatura, gli scambiatori di calore dovrebbero avere una dimensione talmente grande da rendere il progetto non economico. Gli impianti binari operano in circuiti chiusi: né i fluidi di lavoro, né i fluidi geotermici vengono a contatto con l'esterno. Oltre che con i fluidi geotermici a temperatura medio-bassa e con quelli di scarico, gli impianti binari possono essere impiegati quando si vuole impedire che il fluido geotermico passi, con la diminuzione di pressione, dalla fase liquida a quella di vapore (flashing), ad esempio per evitare fenomeni di incrostazione. In questo caso, il fluido geotermico è mantenuto pressurizzato mediante pompe in pozzo, e l'energia è estratta dall'impianto binario.

Gli impianti binari sono di solito costruiti in unità modulari di potenza compresa tra poche centinaia di kW_e ed alcuni MW_e. Queste unità possono essere collegate l'una con l'altra in modo da formare impianti della potenza di qualche decina di megawatt. Il loro costo dipende da numerosi fattori, ma soprattutto dalla temperatura del fluido geotermico disponibile, che determina le dimensioni della turbina, degli scambiatori di calore e del sistema di raffreddamento. La dimensione totale dell'impianto influisce poco sul costo specifico, dato che più unità modulari standard sono collegate in serie per avere la potenza desiderata. La tecnologia degli impianti binari è stata largamente sperimentata e questi impianti hanno dimostrato di essere un mezzo economico e tecnicamente affidabile per trasformare in elettricità l'energia contenuta nei campi geotermici ad acqua dominante.

Negli anni '90 è stato sviluppato un nuovo sistema binario, il ciclo Kalina, che utilizza, come fluido di lavoro, una miscela di acqua e ammoniaca. Durante il ciclo, il fluido di lavoro è fatto espandere, in condizioni di surriscaldamento, attraverso una turbina ad alta pressione, e poi riscaldato, prima di essere immesso in una turbina a bassa pressione. Dopo la seconda espansione, il vapore saturo passa attraverso un recuperatore di calore ed infine condensa in un condensatore raffreddato ad acqua. Gli impianti a ciclo Kalina sembrano avere un rendimento superiore a quello degli impianti binari ORC, ma, rispetto a questi ultimi hanno una maggiore complessità costruttiva e di funzionamento.

I piccoli impianti mobili, convenzionali o binari, non soltanto possono ridurre il rischio derivante dalla perforazione di nuovi pozzi, ma, cosa ancor più importante, possono contribuire a soddisfare le necessità energetiche di aree isolate. Lo standard di vita di molte comunità può essere apprezzabilmente migliorato, mettendo a loro disposizione una fonte di energia locale. Molte attività, apparentemente banali, ma molto importanti, possono essere agevolate dalla disponibilità di energia elettrica, come il pompaggio di acqua d'irrigazione, la refrigerazione di commestibili per la conservazione, ecc.

La convenienza economica dei piccoli impianti mobili è soprattutto evidente nelle aree che non hanno facile accesso ai combustibili convenzionali, e nel caso delle comunità che

sarebbe troppo costoso connettere alla rete elettrica nazionale, anche in presenza di linee di trasmissione ad alta tensione nelle vicinanze. Le spese di allacciamento sarebbero, infatti, proibitive: i trasformatori necessari per derivare la corrente dalle linee ad alta tensione costano, installati, più di 675.000 US\$ ognuno, e la più semplice linea di distribuzione elettrica locale, a 11 kV con pali di legno, costa un minimo di 20.000 US\$ per chilometro (costi aggiornati al 1994). Per fare un paragone, il costo di un'unità binaria, installata, escludendo il costo dei pozzi, è oggi dell'ordine di 1600-1700 US\$/kW. La potenza elettrica richiesta, per persona, va da 0,2 kW, nelle aree meno sviluppate, a 1,0 kW nelle aree più sviluppate. Un impianto da 1000 kW_e potrebbe fornire energia elettrica a 1000 – 5000 persone (Entingh *et al.*, 1994).

Utilizzazione diretta del calore

L'utilizzazione diretta del calore è la forma di sfruttamento dell'energia geotermica più antica, più diversificata e versatile e più comune (Tabella 2). La balneologia, il riscaldamento urbano e di ambienti, gli usi agricoli, l'acquacoltura ed alcuni impieghi industriali sono le utilizzazioni meglio conosciute, ma le pompe di calore sono la forma d'uso più diffusa (nel 2000 rappresentavano il 12,5% dell'energia totale impiegata in usi diretti). Oltre questi, vi sono numerose altre applicazioni del calore geotermico, talvolta del tutto inusuali.

Il *riscaldamento di ambienti e quello urbano* hanno avuto un grande sviluppo in Islanda, dove sono operativi (1999) sistemi di riscaldamento geotermico per una potenza di 1200 MW_t, ma questa forma d'uso è molto diffusa anche in Europa Orientale, negli Stati Uniti, in Cina, Giappone, Francia, ecc.

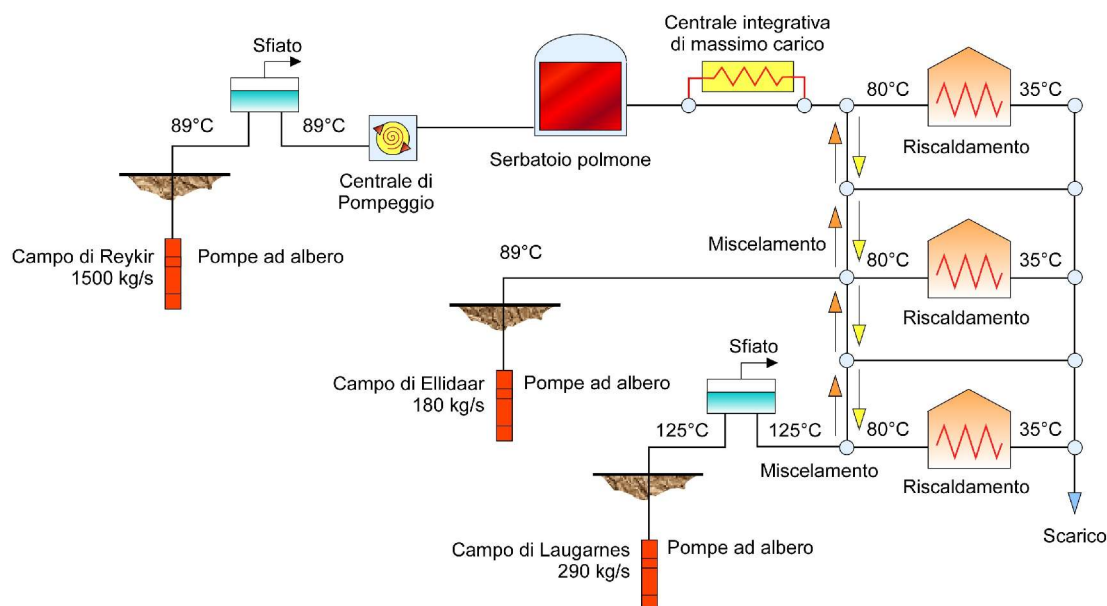


Figura 14

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

Il riscaldamento geotermico di quartieri abitativi richiede un investimento di capitali ingente. I costi maggiori sono quelli iniziali per i pozzi di produzione e di reiniezione, i costi delle pompe in pozzo e di distribuzione, delle condutture e della rete di distribuzione, delle strumentazioni di sorveglianza e di controllo, degli impianti integrativi per i periodi di punta e dei serbatoi-polmone (serbatoi di riserva). In confronto ai sistemi convenzionali, però, i costi operativi sono più bassi e derivano dall'energia per il pompaggio, dalla manutenzione, dal sistema di controllo e dalla direzione tecnica e commerciale. Un fattore critico nel valutare il costo di un sistema di riscaldamento geotermico è la densità del carico termico, cioè la domanda di calore divisa per la superficie dell'area servita dal sistema. Un'elevata densità del carico termico favorisce la fattibilità economica di un progetto di riscaldamento, perché la rete di distribuzione è costosa. In regioni dove il clima lo permette, si possono avere vantaggi economici combinando i sistemi di riscaldamento e raffreddamento degli ambienti. Il fattore di carico di un sistema combinato riscaldamento/raffreddamento è più

alto del fattore di carico di un sistema di solo riscaldamento e, di conseguenza, il prezzo unitario dell'energia diminuisce (Gudmundsson, 1988).

Il *raffreddamento di ambienti* è realizzabile quando impianti ad assorbimento possono essere adattati al funzionamento con i fluidi geotermici disponibili. Questi impianti dispongono di una tecnologia ben conosciuta e sono reperibili sul mercato senza difficoltà. Essi funzionano seguendo un ciclo che utilizza il calore invece dell'elettricità come sorgente di energia. Il raffreddamento è ottenuto utilizzando due fluidi: un refrigerante, che circola, evapora (assorbendo calore) e condensa (cedendo calore), e un fluido secondario o assorbente. Per usi sopra 0°C (soprattutto condizionamento di ambienti e processi industriali), il ciclo usa bromuro di litio come assorbente ed acqua come refrigerante. Per usi sotto 0°C, si adotta un ciclo ammoniaca/acqua, con l'ammoniaca come refrigerante e l'acqua come assorbente. I fluidi geotermici possono fornire l'energia termica necessaria al funzionamento di questi impianti, il cui rendimento, però, diminuisce con temperature dei fluidi sotto 105°C.

Il *condizionamento di ambienti* (riscaldamento e raffreddamento) con l'energia geotermica si è diffuso notevolmente a partire dagli anni '80, a seguito dell'introduzione nel mercato e della diffusione delle *pompe di calore*. I diversi sistemi di pompe di calore disponibili permettono di estrarre ed utilizzare economicamente il calore contenuto in corpi a bassa temperatura, come terreno, acquiferi poco profondi, masse d'acqua superficiali, ecc. (Sanner, 2001) (per un esempio, vedere la Figura 15).

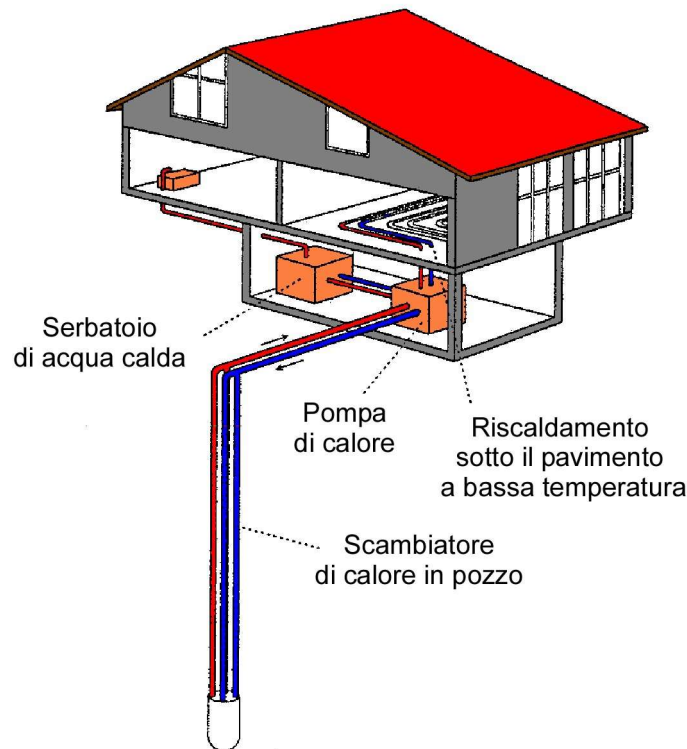


Figura 15

*Esempio di sistema di riscaldamento domestico con pompa di calore connessa al terreno
(da Sanner et al., 2003)*

Come è noto ad ogni ingegnere, le pompe di calore sono macchine che spostano il calore in direzione opposta a quella in cui tenderebbe a dirigersi naturalmente, cioè da uno spazio o corpo più freddo verso uno più caldo. In realtà, una pompa di calore non è niente di più di un condizionatore (Rafferty, 1997). Tutti gli apparecchi refrigeranti (condizionatori d'aria, frigoriferi, freezers, ecc.) estraggono calore da uno spazio (per mantenerlo freddo) e lo scaricano in un altro spazio più caldo. L'unica differenza tra una pompa di calore e un'unità refrigerante sta nell'effetto desiderato, il raffreddamento per l'unità refrigerante, ed il riscaldamento per la pompa di calore. Molte pompe di calore sono reversibili ed il loro funzionamento può essere invertito, potendo operare alternativamente come unità riscaldanti o raffreddanti. Le pompe di calore richiedono energia elettrica per funzionare, ma, in condizioni climatiche adatte e con un buon progetto, il bilancio energetico è positivo. Sistemi con pompe di calore connesse al suolo o a masse d'acqua sono attualmente presenti

in almeno trenta paesi e, nel 2003, la potenza termica totale installata era stimata a più di 9500 MW_t. Il maggior numero di impianti si trova negli Stati Uniti (500.000 impianti installati per un totale di 3730 MW_t), in Svezia (200.000 per 2000 MW_t), in Germania (40.000 per 560 MW_t), in Canada (36.000 per 435 MW_t), in Svizzera (25.000 per 440 MW_t) e in Austria (23.000 per 275 MW_t) (Lund *et al.*, 2003). Per realizzare questi sistemi sono stati utilizzati terreni e masse idriche con temperature tra 5° e 30°C.

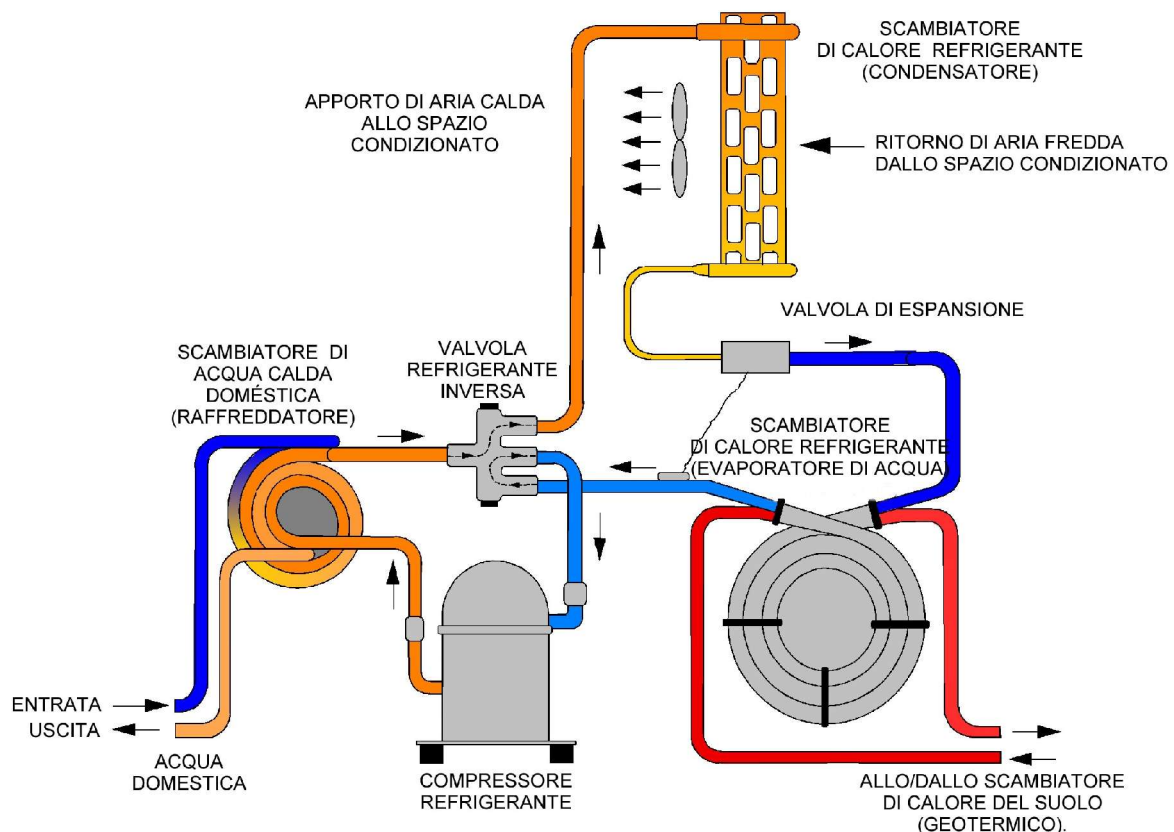


Figura 16

Schema di pompa di calore in posizione di riscaldamento (per cortesia del Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, USA).

Gli *usi agricoli* dei fluidi geotermici comprendono le coltivazioni a cielo aperto ed il riscaldamento di serre. L'acqua calda può essere usata nelle coltivazioni a cielo aperto per irrigare e/o riscaldare il terreno. Il maggior problema dell'irrigazione con acqua calda sta nel fatto che, per ottenere una variazione utile della temperatura del terreno, è necessaria una quantità talmente grande di acqua, a temperatura sufficientemente bassa da non danneggiare

le piante, che il terreno ne può essere allagato. Un possibile modo per aggirare questo inconveniente consiste nell'adottare un sistema di irrigazione subsuperficiale accoppiato con un sistema di tubi riscaldanti inseriti nel terreno. Riscaldare il terreno con tubi sepolti, senza un sistema di irrigazione parallelo, potrebbe ridurre la conducibilità del terreno stesso, a causa della diminuzione di umidità intorno ai tubi, e dare origine ad un isolamento termico. La miglior soluzione sembra quindi quella di combinare il riscaldamento del terreno e l'irrigazione. La composizione chimica delle acque geotermiche usate per l'irrigazione deve essere sempre controllata attentamente per evitare effetti dannosi sulle piante. Nelle coltivazioni a cielo aperto, il controllo della temperatura può consentire: (a) di prevenire i danni derivanti dalle basse temperature ambientali, (b) di estendere la stagione di coltivazione, di aumentare la crescita delle piante ed incrementare la produzione, e (c) di sterilizzare il terreno (Barbier e Fanelli, 1977).

L'utilizzazione più comune dell'energia geotermica in agricoltura è, comunque, il *riscaldamento di serre*, che è stato sviluppato su larga scala in molti paesi. La coltivazione di verdure e fiori fuori stagione o in climi diversi da quelli originari può essere realizzata avendo a disposizione una vasta gamma di tecnologie. Sono disponibili molte soluzioni per avere ottime condizioni di crescita, basate sulla miglior temperatura di sviluppo di ciascuna pianta (Figura 17), e sulla quantità di luce, sulla concentrazione di CO₂ nell'ambiente della serra, sull'umidità del terreno e dell'aria, e sul movimento dell'aria.

Le pareti delle serre possono essere fatte di vetro, fibre di vetro, pannelli di plastica rigida, teli di plastica. Le pareti di vetro, rispetto ai pannelli di plastica, sono più trasparenti e lasciano passare molta più luce, ma danno un minor isolamento termico, sono meno resistenti agli urti e sono più pesanti e costosi. Le serre più semplici sono ricoperte da un unico telo di plastica, ma recentemente sono stati adottati in alcune serre due teli di plastica separati da uno strato d'aria.

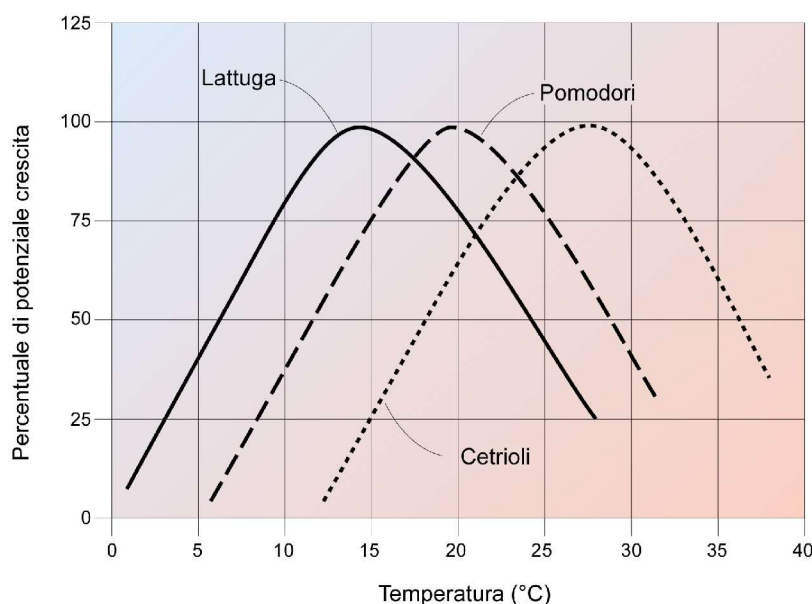


Figura 17

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

Quest'ultimo sistema riduce la perdita di calore attraverso le pareti del 30-40%, migliorando notevolmente il rendimento complessivo. Il riscaldamento delle serre può essere (a) a circolazione forzata d'aria in scambiatori di calore, (b) a circolazione d'acqua calda in tubi posti sopra o nel terreno, o anche in condotte alettate situate lungo le pareti o sotto i pancali, e (c) con una combinazione di questi sistemi (Figura 18). L'uso dell'energia geotermica per il riscaldamento delle serre può ridurre significativamente i costi operativi, che in alcuni casi rappresentano il 35% del costo dei prodotti (verdure, fiori, piante da appartamento, piantine da sviluppo).

Gli animali da fattoria e le specie acquatiche, come anche i vegetali, possono migliorare in qualità e quantità, se sono cresciuti in ambienti a temperatura controllata (Figura 19). In molti casi le acque geotermiche possono essere sfruttate convenientemente combinando l'allevamento di animali con il riscaldamento di serre. L'energia richiesta per riscaldare un impianto di allevamento è circa il 50% di quella necessaria ad una serra della stessa superficie, rendendo possibile la costruzione di un sistema a cascata.

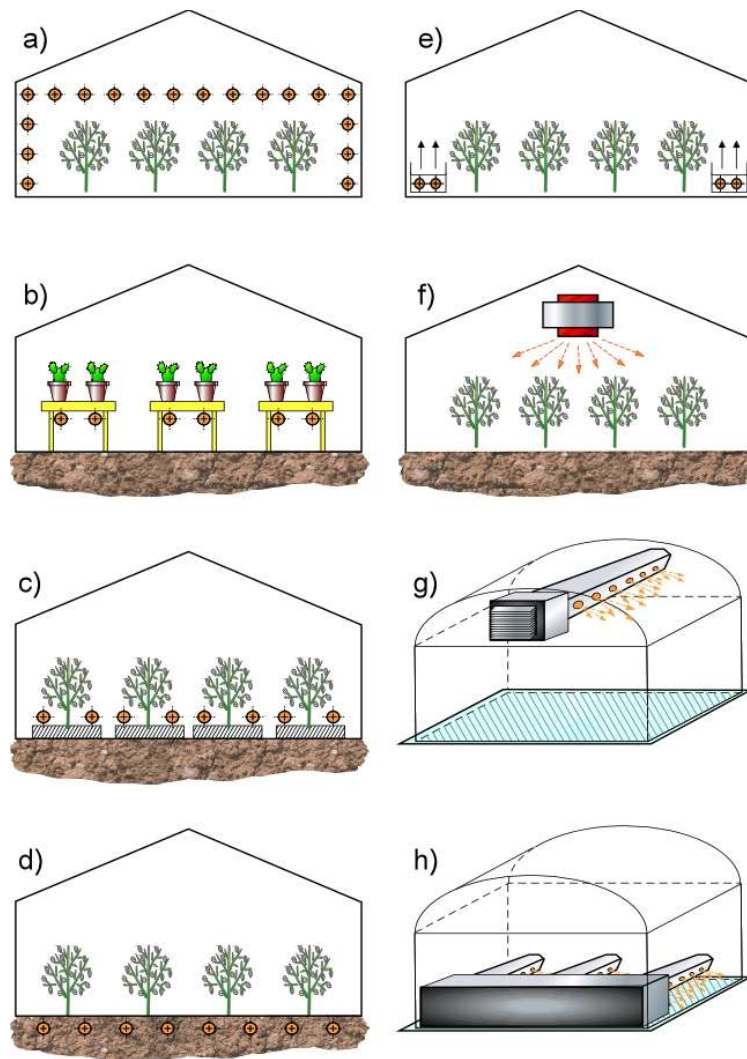


Figura 18

Sistemi di riscaldamento delle serre geotermiche. Riscaldamento a convezione naturale: (a) tubi sospesi, (b) pancali riscaldati, (c) tubi posizionati in basso.

Riscaldamento del terreno (d). Riscaldamento ad aria forzata: (e) convettori laterali, (f) ventilatori sospesi, (g) convettori posizionati in alto, (h) convettori posizionati in basso.

L'allevamento a temperatura controllata migliora le condizioni sanitarie degli animali; inoltre, i fluidi caldi possono essere utilizzati per pulire, sterilizzare e deumidificare gli ambienti e per trattare i rifiuti (Barbier e Fanelli, 1977).

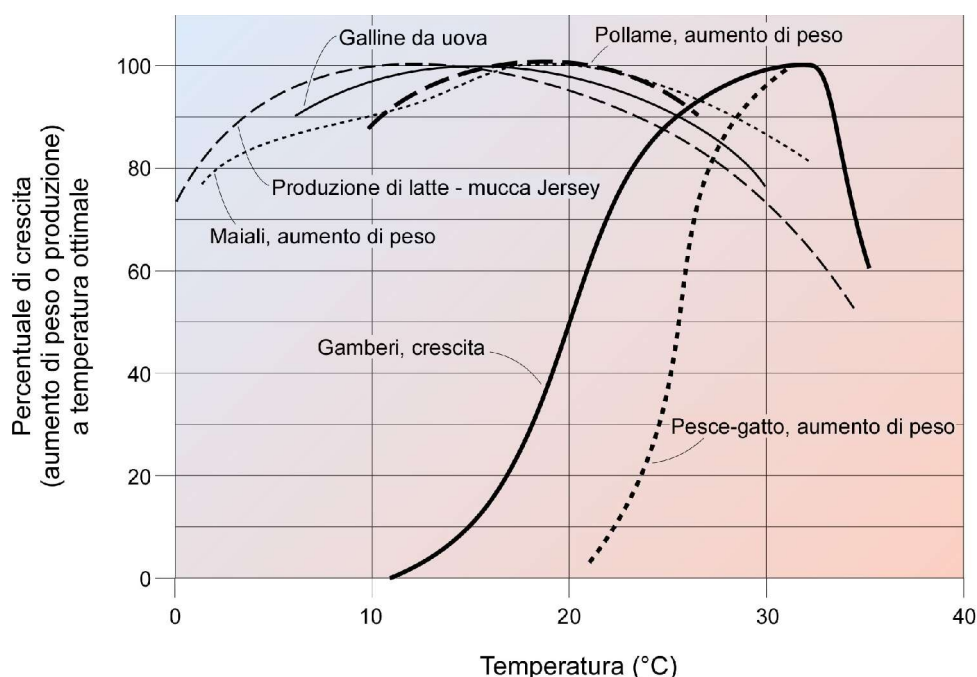


Figura 19

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

L'*acquacoltura*, vale a dire l'allevamento controllato di forme di vita acquatiche, in questi ultimi tempi si è diffuso notevolmente in campo mondiale, a seguito dell'ampliamento del mercato. Il controllo della temperatura di crescita per le specie acquatiche è molto più importante che per le specie terrestri, come si può osservare nella Figura 19, che mostra che l'andamento della curva di crescita per forme acquatiche è molto diverso da quello delle forme terrestri. Mantenendo artificialmente la temperatura ottimale, si possono allevare specie esotiche, aumentare la produzione e anche, in qualche caso, raddoppiare il ciclo riproduttivo (Barbier e Fanelli, 1977). Le specie allevate più comunemente sono carpa, pesce gatto, branzino, tilapia, muggine, anguilla, salmone, storione, gambero, aragosta, gambero d'acqua dolce, granchio, ostrica, e mitilo.

L'*acquacoltura* include anche l'allevamento di alligatori e coccodrilli, sia come attrazione turistica, sia per utilizzarne il pellame. Le esperienze fatte negli Stati Uniti hanno mostrato che un alligatore, allevato ad una temperatura costante intorno ai 30°C, raggiunge una

lunghezza di circa 2 m in tre anni, mentre raggiunge 1,2 m, se è allevato in condizioni naturali. Questi rettili sono allevati da alcuni anni negli Stati Uniti in Colorado ed in Idaho, ma è considerato anche l'allevamento in regioni più fredde.

L'allevamento delle specie acquatiche generalmente richiede una temperatura compresa tra 20° e 30°C. Le dimensioni degli impianti dipendono dalla temperatura della risorsa geotermica disponibile, dalla temperatura che deve essere mantenuta nella vasca di allevamento e dalle perdite di calore di quest'ultima.

Anche la coltivazione di *Spirulina* può essere considerata una forma di acquacoltura. Questa microalga unicellulare a spirale, di colore verde-azzurro, è spesso chiamata 'super-alimento' per il suo alto contenuto nutritivo ed è stata considerata una possibile soluzione per risolvere il problema della fame nei paesi più poveri del mondo. Attualmente, tuttavia, è commercializzata come integratore alimentare e venduta ad alto prezzo nelle erboristerie. La *Spirulina* è coltivata in numerosi paesi tropicali e sub-tropicali, in laghi o in bacini artificiali, dove esistono le condizioni migliori per la sua crescita (un ambiente alcalino caldo, ricco di CO₂). L'energia geotermica è già usata per coltivare della *Spirulina* durante tutto l'anno anche in regioni a clima temperato.

Tutto l'intervallo di temperatura dei fluidi geotermici, vapore o acqua, può essere sfruttato in *usi industriali*, come si vede nella Figura 10. Le diverse possibili forme di utilizzazione comprendono processi a caldo, evaporazione, essiccamento, distillazione, sterilizzazione, lavaggio, decongelamento ed estrazione di sostanze chimiche. Il calore geotermico ha applicazioni industriali in almeno diciannove paesi (Lund e Freeston, 2001), e l'utilizzazione tende ad estendersi. Esempi di utilizzazione sono la produzione di elementi in cemento, l'imbottigliamento di acqua e bibite effervescenti, la produzione di carta, l'estrazione di petrolio dal sottosuolo, la pastorizzazione del latte, l'industria del pellame, l'estrazione di minerali e della CO₂, l'uso in lavanderia, l'essiccamento di terre diatomitiche, il trattamento della cellulosa e la produzione di borati e di acido borico. Vi sono anche

progetti per utilizzare acqua geotermica a bassa temperatura allo scopo di eliminare il ghiaccio dalle strade e per disperdere la nebbia da alcuni aeroporti. In Giappone, una fabbrica di tessuti ha trovato il modo di sfruttare le proprietà decoloranti dell' H_2S per produrre stoffe molto apprezzate nella confezione di abiti femminili. Sempre in Giappone è stato prodotto un 'legno geotermico' molto leggero, particolarmente adatto ad un certo tipo di costruzioni. Durante il trattamento con l'acqua calda di sorgenti termali, i polisaccaridi del legno originale subiscono un processo di idrolisi e sono asportati rendendo il materiale poroso e più leggero.

Considerazioni economiche

Gli elementi che debbono essere presi in considerazione per ogni stima economica, sia che essa riguardi il costo degli impianti o i costi operativi, sia il prezzo dei 'prodotti' dell'energia geotermica, sono più numerosi e più complessi che per le altre forme di energia. Prima di avviare un progetto geotermico, tutti gli elementi debbono essere valutati accuratamente. In un breve spazio, si possono dare soltanto alcune indicazioni di carattere molto generale, che, insieme con le informazioni sulla situazione locale e sul valore dei fluidi geotermici disponibili, potrebbero essere di aiuto nel decidere se investire o no in un progetto.

Un sistema di sfruttamento geotermico (risorsa – impianto) è formato dai pozzi geotermici, dai tubi che trasportano i fluidi geotermici, dall'impianto di utilizzazione e, in molti casi, dai pozzi di reiniezione. L'interazione di tutti questi elementi influisce molto sul costo del progetto e, pertanto, devono essere analizzati con grande cura. Per fare un esempio nel settore della generazione di elettricità, un impianto a contropressione è costruttivamente più semplice, e quindi meno costoso, di un impianto a condensazione della stessa potenza. Un impianto a contropressione, però, richiede, per il suo funzionamento, rispetto ad un impianto a condensazione, almeno il doppio del vapore e, di conseguenza, un numero doppio di pozzi per la sua alimentazione. Poiché i pozzi sono molto costosi, in realtà gli impianti a condensazione sono economicamente più convenienti di quelli a contropressione. In effetti, questi ultimi sono prescelti, di solito, per ragioni diverse da quelle economiche.

I fluidi geotermici possono essere trasportati a distanze relativamente grandi, se si impiegano tubazioni con isolamento termico. In condizioni ottimali, le tubazioni possono essere lunghe fino a 60 km. Comunque, tubazioni, apparecchiature ausiliarie (pompe, valvole, ecc.) e loro manutenzione sono costosi e pesano in modo sensibile sul costo iniziale degli impianti e su quelli operativi. Per questa ragione, la distanza tra una risorsa geotermica e la località di utilizzazione dovrebbe essere la più ridotta possibile.

Il costo di un impianto geotermico è più alto, spesso notevolmente più alto, di quello di un impianto dello stesso tipo alimentato con combustibili convenzionali. D'altro canto, il costo dell'energia utilizzata da un impianto geotermico è molto più basso di quello dell'energia fornita dai combustibili tradizionali e corrisponde soprattutto ai costi di manutenzione degli elementi dell'impianto (tubazioni, valvole, pompe, scambiatori di calore e così via). I risparmi dovuti al minor costo dell'energia dovrebbero permettere di recuperare la maggior spesa iniziale dovuta all'elevato costo dell'impianto. Il sistema risorsa-impianto, di conseguenza, dovrebbe essere progettato per avere una vita abbastanza lunga da recuperare l'investimento iniziale e, possibilmente, anche di più.

Economie apprezzabili possono essere realizzate con l'adozione di sistemi integrati, che permettono un più alto fattore di utilizzo (per esempio, l'accoppiamento di riscaldamento e refrigerazione di ambienti), o sistemi a cascata, dove gli impianti sono allacciati in serie, e ciascun impianto sfrutta il calore residuo nell'acqua scaricata dal precedente (per esempio, generazione di elettricità + riscaldamento di serre + allevamento di animali) (Figura 20).

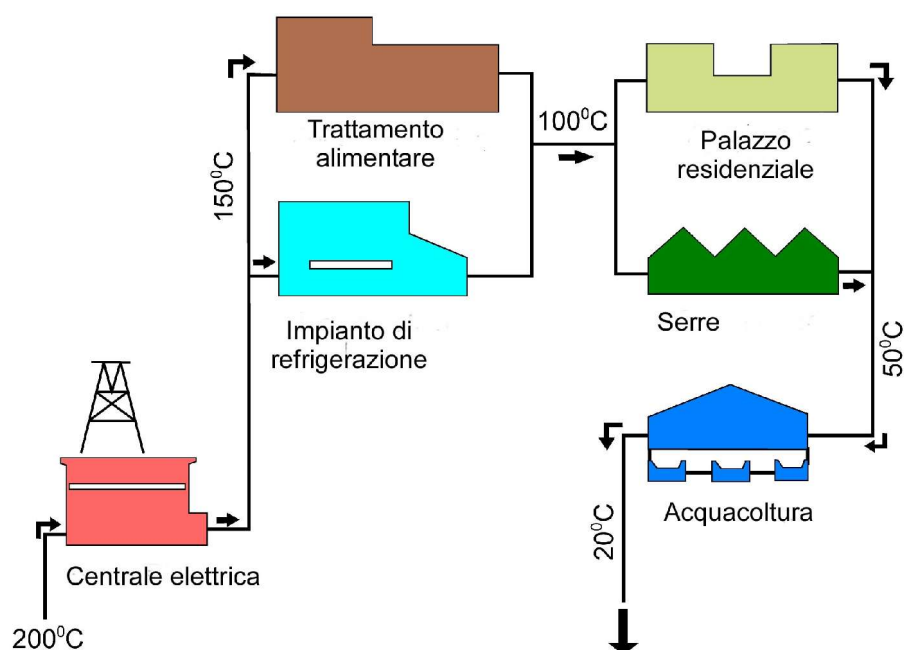


Figura 20

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

Per ridurre i costi di manutenzione e la durata delle soste per eventuali riparazioni, la tecnologia degli impianti dovrebbe essere, per quanto possibile, ad un livello accessibile al personale locale o di esperti rapidamente disponibili. L'intervento di personale altamente specializzato o dei fabbricanti dovrebbe essere necessaria soltanto per le operazioni di grande manutenzione o in caso di gravi incidenti.

Infine, se un impianto geotermico deve produrre merce destinata al consumo, è necessario che il progetto sia preceduto da un'accurata analisi di mercato per assicurare uno sbocco al prodotto. E' inoltre essenziale che esistano, o che siano previste, le infrastrutture necessarie per assicurare il trasporto economico della merce.

Le indicazioni che precedono sono applicabili ad ogni tipo di utilizzazione dell'energia geotermica ed a tutte le situazioni locali; hanno perciò un carattere semplicemente qualitativo. Per avere indicazioni quantitative sugli investimenti e sui costi si può fare riferimento al *World Energy Assessment Report*, preparato da UNDP, UN-DESA e World Energy Council, e pubblicato nel 2000. I dati WEA sono riportati nelle Tabelle 4 e 5, che permettono anche un confronto tra l'energia geotermica e le altre forme di energia rinnovabile.

Tabella 4 Generazione di elettricità. Costo dell'energia prodotta e costi d'impianto (Fridleifsson, 2001).

	Costo attuale dell'energia US¢/kWh	Potenziiale costo futuro dell'energia US¢/kWh	Costi d'impianto chiavi in mano US\$/kW
Biomasse	5 - 15	4 - 10	900 - 3000
Geotermia	2 - 10	1 - 8	800 - 3000
Eolico	5 - 13	3 - 10	1100 - 1700
Solare (fotovoltaico)	25 - 125	5 - 25	5000 - 10 000
Solare (termico)	12 - 18	4 - 10	3000 - 4000
Maree	8 - 15	8 - 15	1700 - 2500

Tabella 5 Usi diretti del calore. Costo dell'energia e costi d'impianto (Fridleifsson, 2001).

	Costo attuale dell'energia US¢/kWh	Potenziiale costo futuro dell'energia US¢/kWh	Costi d'impianto chiavi in mano US\$/kW
Biomasse (compreso etanolo)	1 - 5	1 - 5	250 - 750
Geotermia	0.5 - 5	0.5 - 5	200 - 2000
Eolico	5 - 13	3 - 10	1100 - 1700
Solare a bassa temperatura	3 - 20	2 - 10	500 - 1700

EFFETTI SULL'AMBIENTE

Negli anni '60, quando l'ambiente in cui viviamo era in condizioni migliori di quelle attuali e si poneva minore attenzione alla salute della Terra, l'energia geotermica era ancora considerata un'energia 'pulita'. In realtà, non v'è modo di produrre o trasformare energia in

una forma utilizzabile dall'uomo senza causare un impatto, diretto od indiretto, sull'ambiente. Anche la forma più semplice ed antica di produrre energia termica, bruciare il legname, ha effetti dannosi, e la deforestazione, uno dei maggiori problemi degli anni recenti, è iniziata quando i nostri antenati hanno cominciato a tagliare gli alberi per cuocere i loro cibi e riscaldare le loro abitazioni. A sua volta, lo sfruttamento dell'energia geotermica produce un impatto sull'ambiente, anche se si può dire che questa forma di energia è una delle meno inquinanti.

Cause di inquinamento

In molti casi l'entità degli effetti sull'ambiente prodotti dallo sfruttamento dell'energia geotermica è proporzionale alla scala dell'utilizzazione (Lunis e Breckenridge, 1991). La Tabella 6 riassume la probabilità e l'importanza relativa dell'impatto ambientale derivante dagli usi diretti dei fluidi geotermici. La produzione di elettricità con impianti a ciclo binario produce effetti simili a quelli degli usi diretti. L'impatto sull'ambiente è potenzialmente maggiore nel caso di centrali elettriche convenzionali, specialmente per ciò che riguarda la qualità dell'aria, ma può essere in ogni caso mantenuto entro limiti accettabili.

Tabella 6 Potenziale impatto sull'ambiente degli usi diretti dell'energia geotermica.

Impatto	Probabilità	Intensità
Inquinamento atmosferico	B	M
Inquinamento delle acque superficiali	M	M
Inquinamento delle acque sotterranee	B	M
Subsidenza	B	B - M
Inquinamento acustico	E	B - M
Eruzione di pozzi	B	B - M
Danni all'ambiente culturale o archeologico	B - M	M - E
Problemi socio-economici	B	B
Inquinamento chimico o termico	B	M - E
Produzione di residui solidi	M	M - E

B = Bassa; M = Moderata; E = Elevata

(Lunis e Breckenridge, 1991)

Ogni cambiamento che si verifica nell'ambiente deve essere valutato con attenzione, non soltanto per non violare le leggi ed i regolamenti locali, che spesso sono molto restrittivi, ma soprattutto perché una modificazione apparentemente insignificante dell'equilibrio preesistente può dare avvio ad una catena di eventi il cui effetto finale è difficilmente valutabile in anticipo. Per esempio, l'aumento di temperatura di una massa d'acqua (come un lago) di soli 2°-3°C, causato dallo scarico di un impianto geotermico, può danneggiare l'ecosistema esistente. Gli organismi animali e vegetali più sensibili alle variazioni termiche possono gradualmente scomparire, lasciando una o più specie di pesci senza la loro fonte di alimentazione. Un aumento della temperatura dell'acqua potrebbe impedire lo sviluppo delle uova di altre specie di pesci. Se questi pesci sono commestibili e permettono di lavorare ad una comunità di pescatori, la loro scomparsa potrebbe mettere in crisi questa comunità e quella che gli vive intorno.

Il primo effetto avvertibile sull'ambiente è quello prodotto dalla *perforazione*, sia dei pozzi superficiali eseguiti per misure di gradiente geotermico, sia dei pozzi d'esplorazione o di produzione. L'installazione di un impianto di perforazione e degli equipaggiamenti accessori comporta la costruzione di strade d'accesso e di una piazzola di perforazione. Quest'ultima copre una superficie che va da 200-500 m² per un piccolo impianto automontato, in grado di raggiungere una profondità di 300-700 m, a 1200-1500 m² per un impianto medio-piccolo, in grado di raggiungere i 2000 m. Queste operazioni modificano la morfologia dell'area e possono danneggiare l'ecosistema. Improvvise eruzioni del pozzo possono inquinare le acque superficiali; per evitare questo inconveniente, vengono installate speciali valvole di sicurezza, in particolare quando sono perforati pozzi previsti ad alta pressione e temperatura (Lunis e Breckenridge, 1991). Inoltre, durante la perforazione e le prove di portata dei pozzi, possono essere emessi nell'atmosfera gas inquinanti. Gli effetti

sull'ambiente dovuti alla perforazione scompaiono quasi totalmente una volta che la perforazione è terminata.

L'installazione delle tubazioni per il trasporto dei fluidi geotermici e la costruzione degli *impianti di utilizzazione*, che costituiscono la fase dello sviluppo successiva alla perforazione, sono anch'esse operazioni che hanno un impatto sulla vita animale e vegetale e sulla morfologia superficiale. Il panorama è alterato, sebbene in alcune zone, come Larderello in Toscana, la rete di tubazioni che attraversa la campagna e le torri di raffreddamento delle centrali elettriche facciano ormai parte dello scenario e siano divenute quasi un'attrazione turistica.

Problemi ambientali si possono verificare anche quando gli impianti sono operativi. I fluidi geotermici (vapore o acqua calda) di solito contengono *gas*, come anidride carbonica (CO_2), idrogeno solforato (H_2S), ammoniaca (NH_3), metano (CH_4), e piccole quantità di altri gas, ed anche *sostanze in soluzione*, la cui concentrazione generalmente aumenta con l'aumentare della temperatura. Il cloruro di sodio (NaCl), il boro (B), l'arsenico (As) ed il mercurio (Hg) sono causa di inquinamento, se sono dispersi nell'ambiente. Alcuni fluidi geotermici, come quelli utilizzati in Islanda per il riscaldamento, sono privi di inquinanti chimici, ma si tratta di un'eccezione alla regola. Le acque di scarico degli impianti geotermici hanno, inoltre, una temperatura generalmente superiore a quella dell'ambiente circostante e costituiscono potenziali inquinanti termici.

L'inquinamento atmosferico può essere un problema quando si produce elettricità con impianti convenzionali. L'idrogeno solforato è uno dei principali inquinanti. La soglia di percezione olfattiva nell'aria per l'idrogeno solforato è circa 5 parti per miliardo in volume e leggeri effetti fisiologici possono essere avvertiti a concentrazioni di poco più alte (Weres, 1984). Si possono adottare, comunque, diversi sistemi per ridurre l'emissione di questo gas. Anche l'anidride carbonica è presente nei fluidi geotermici utilizzati dagli impianti per generazione di elettricità; tuttavia, la quantità di anidride carbonica emessa da questi

impianti è inferiore a quella rilasciata dagli impianti alimentati da combustibili fossili: 13–380 g per ogni kWh di elettricità prodotta nelle centrali geotermiche, in confronto con 1042 g/kWh nelle centrali a carbone, 906 g/kWh nelle centrali ad olio combustibile, e 453 g/kWh nelle centrali a gas naturale (Fridleifsson, 2001). La produzione di elettricità con impianti a ciclo binario ed il riscaldamento urbano sono anch'essi potenziali cause di problemi minori, che possono essere superati semplicemente adottando sistemi a circuito chiuso, che impediscono ogni emissione gassosa (Willard *et al.*, 1979).

L'*emissione di acque di scarico* è una fonte potenziale di inquinamento. I fluidi geotermici già sfruttati, se hanno elevate concentrazioni di sostanze chimiche, come boro, fluoruri o arsenico, dovrebbero essere trattati, reiniettati nel serbatoio o entrambe le cose. Comunque, i fluidi geotermici a temperatura medio-bassa, sfruttati nella maggior parte degli usi diretti, generalmente contengono piccole quantità di sostanze chimiche e raramente le acque di scarico creano problemi importanti. In molti casi queste acque possono essere scaricate nelle acque superficiali dopo averle lasciate raffreddare (Lunis e Breckenridge, 1991). La diminuzione di temperatura può essere ottenuta in appositi bacini di raffreddamento oppure in serbatoi per evitare di disturbare in qualche modo l'ecosistema.

L'estrazione di grandi quantità di fluido dal serbatoio geotermico può causare fenomeni di *subsidenza*, vale a dire il graduale abbassamento della superficie del suolo. Questo è un fenomeno irreversibile, ma non catastrofico, perché è un processo lento e distribuito su aree vaste. Su lunghi periodi, tuttavia, l'abbassamento della superficie può essere sensibile, dell'ordine di alcune decine di centimetri ed anche di metri, e deve essere monitorato sistematicamente per evitare danni alle strutture geotermiche ed agli edifici civili circostanti. In molti casi la subsidenza può essere prevenuta o ridotta reiniettando nel serbatoio i fluidi scaricati dagli impianti geotermici.

L'estrazione e/o la reiniezione dei fluidi geotermici può stimolare o aumentare, in aree particolari, la frequenza di *eventi sismici*. Si tratta, in ogni modo, di microsismicità, che in

genere può essere percepita soltanto dagli strumenti. E' molto improbabile che lo sfruttamento delle risorse geotermiche possa dare origine a fenomeni sismici di qualche importanza, e, sino ad ora, non si ha notizia che questo sia avvenuto.

Il *rumore* può essere un problema negli impianti geotermici per generazione di elettricità. Nella fase di produzione di un campo geotermico, un certo rumore può essere causato dallo scorrimento del vapore nelle tubazioni e, occasionalmente, dallo scarico di qualche pozzo. Nelle centrali elettriche le maggiori sorgenti di inquinamento acustico sono i ventilatori delle torri di raffreddamento, gli eiettori del vapore ed il 'rombo' delle turbine (Brown, 2000). Il rumore prodotto dagli impianti che usano direttamente il calore geotermico è generalmente trascurabile.

PICCOLO QUADRO FINALE

La quantità di energia termica esistente nel sottosuolo è enorme. Un gruppo di esperti ha stimato il potenziale geotermico di ciascun continente (Tabella 7), distinguendo le risorse ad alta e bassa temperatura (International Geothermal Association, 2001).

Tabella 7 Potenziale geotermico mondiale (International Geothermal Association, 2001)

	Risorse ad alta temperatura adatte per generazione di elettricità		Risorse a bassa temperatura adatte per usi diretti del calore TJ/a x 10 ⁶ (limite inferiore)
	Tecnologia convenzionale TWh/a di elettricità	Tecnologia convenzionale e binaria TWh/a di elettricità	
Europa	1830	3700	> 370
Asia	2970	5900	> 320
Africa	1220	2400	> 240
Nord America	1330	2700	> 120
America Latina	2800	5600	> 240
Oceania	1050	2100	> 110

Potenziale mondiale	11 200	22 400	> 1400
---------------------	--------	--------	--------

L'energia geotermica, se è sfruttata correttamente, può certamente assumere un ruolo significativo nel bilancio energetico di numerosi paesi. In alcune situazioni, anche risorse geotermiche di dimensioni modeste sono in grado di risolvere numerosi problemi locali e di migliorare lo standard di vita di piccole comunità isolate.

Per quanto riguarda la posizione dell'energia geotermica nei confronti delle altre energie rinnovabili, una idea è data dai dati riportati in un recente articolo di I.B. Fridleifsson (2003). Di tutta l'elettricità prodotta nel 1998 con le energie rinnovabili (2826 TWh), il 92% derivava dall'idroelettrica, il 5,5% dalle biomasse, l'1,6% dalla geotermia, lo 0,6% dall'eolica, lo 0,05% dal solare e lo 0,02% dalle maree. Le biomasse hanno fornito il 93% del calore totale per usi diretti, la geotermia il 3% ed il solare il 2%.

BIBLIOGRAFIA

- ARMSTEAD, H.C.H., 1983. *Geothermal Energy*. E. & F. N. Spon, London, 404 pp.
- AXELSSON, G. and GUNNLAUGSSON, E., 2000. Background: Geothermal utilization, management and monitoring. In: *Long-term monitoring of high- and low enthalpy fields under exploitation*, WGC 2000 Short Courses, Japan, 3-10.
- BARBIER, E. and FANELLI, M., 1977. Non-electrical uses of geothermal energy. *Prog. Energy Combustion Sci.*, **3**, 73-103.
- BEALL, S. E. and SAMUELS, G., 1971. The use of warm water for heating and cooling plant and animal enclosures. *Oak Ridge National Laboratory*, ORNL-TM-3381, 56 pp.
- BENDERITTER, Y. and CORMY, G., 1990. Possible approach to geothermal research and relative costs. In: Dickson, M.H. and Fanelli, M., eds., *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, New York, pp. 59—69.

- BROWN, K. L., 2000. Impacts on the physical environment. In: Brown, K.L., *ed.*, *Environmental Safety and Health Issues in Geothermal Development*, WGC 2000 Short Courses, Japan, 43—56.
- BUFFON, G.L., 1778. Histoire naturelle, générale et particulière. Paris, Imprimerie Royale, 651 p.
- BULLARD, E.C., 1965. Historical introduction to terrestrial heat flow. In: Lee, W.H.K., *ed.* *Terrestrial Heat Flow*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., **8**, pp.1-6.
- COMBS, J. and MUFFLER, L.P.J., 1973. Exploration for geothermal resources. In : Kruger, P. and Otte, C., *eds.*, *Geothermal Energy*, Stanford University Press, Stanford, pp.95—128.
- ENTINGH, D. J., EASWARAN, E. and McLARTY, L., 1994. Small geothermal electric systems for remote powering. *U.S. DoE, Geothermal Division, Washington, D.C.*, 12 pp.
- FRIDLEIFSSON, I.B., 2001. Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **5**, 299-312.
- FRIDLEIFSSON, I. B., 2003. Status of geothermal energy amongst the world's energy sources. *IGA News*, No.52, 13-14.
- GARNISH, J.D., *ed.*, 1987. Proceedings of the First EEC/US Workshop on Geothermal Hot-Dry Rock Technology, *Geothermics* **16**, 323—461.
- GUDMUNDSSON, J.S., 1988. The elements of direct uses. *Geothermics*, **17**, 119—136.
- HOCHSTEIN, M.P., 1990. Classification and assessment of geothermal resources. In: Dickson, M.H. and Fanelli, M., *eds.*, *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, New York, pp. 31—57.
- HUTTRER, G.W., 2001. The status of world geothermal power generation 1995-2000. *Geothermics*, **30**, 7-27.
- INTERNATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION, 2001. Report of the IGA to the UN Commission on Sustainable Development, Session 9 (CSD-9), New York, April.
- LINDAL, B., 1973. Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H.C.H., *ed.*, *Geothermal Energy*, UNESCO, Paris, pp.135—148.

- LUBIMOVA, E.A., 1968. Thermal history of the Earth. In: *The Earth's Crust and Upper Mantle*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., **13**, pp.63—77.
- LUMB, J. T., 1981. Prospecting for geothermal resources. In: Rybach, L. and Muffler, L.J.P., eds., *Geothermal Systems, Principles and Case Histories*, J. Wiley & Sons, New York, pp. 77—108.
- LUND, J. W., SANNER, B., RYBACH, L., CURTIS, R., HELLSTROM, G., 2003. Ground-source heat pumps. *Renewable Energy World*, Vol.6, no.4, 218-227.
- LUND, J. W., 2003. The USA country update. *IGA News*, No. 53, 6-9.
- LUND, J. W., and BOYD, T. L., 2001. Direct use of geothermal energy in the U.S. – 2001. *Geothermal Resources Council Transactions*, **25**, 57-60.
- LUND, J. W., and FREESTON, D., 2001. World-wide direct uses of geothermal energy 2000. *Geothermics* **30**, 29- 68.
- LUNIS, B. and BRECKENRIDGE, R., 1991. Environmental considerations. In: Lienau, P.J. and Lunis, B.C., eds., *Geothermal Direct Use, Engineering and Design Guidebook*, Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, pp.437—445.
- MEIDAV, T., 1998. Progress in geothermal exploration technology. *Bulletin Geothermal Resources Council*, **27**, 6, 178-181.
- MUFFLER, P. and CATALDI, R., 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, **7**, 53—89.
- NICHOLSON, K., 1993. *Geothermal Fluids*. Springer Verlag, Berlin, XVIII—264 pp.
- POLLACK, H.N., HURTER, S.J. and JOHNSON, J.R., 1993. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* **31**, 267—280.
- RAFFERTY, K., 1997. An information survival kit for the prospective residential geothermal heat pump owner. *Bull. Geo-Heat Center*, **18**, 2, 1—11.
- SANNER, B., KARYTSAS, C., MENDRINOS, D. and RYBACH, L., 2003. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage. *Geothermics*, Vol.32, 579-588.

- STACEY, F.D. and LOPER, D.E., 1988. Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology. *Phys. Earth. Planet. Inter.* **53**, 167 - 174.
- STEFANSSON, V., 2000. The renewability of geothermal energy. *Proc. World Geothermal Energy, Japan*. On CD-ROM
- TENZER, H., 2001. Development of hot dry rock technology. *Bulletin Geo-Heat Center*, **32**, 4, 14-22.
- WERES, O., 1984. Environmental protection and the chemistry of geothermal fluids. *Lawrence Berkeley Laboratory, Calif.* , LBL 14403, 44 pp.
- WHITE, D. E., 1973. Characteristics of geothermal resources. In: Kruger, P. and Otte, C., eds., *Geothermal Energy*, Stanford University Press, Stanford, pp. 69-94.
- WRIGHT, P.M., 1998. The sustainability of production from geothermal resources. *Bull. Geo-Heat Center*, **19**, 2, 9-12.