

GIULIO ANTONIO VENZO

IL CALORE INTERNO DELLA TERRA: UNA FONTE GIGANTESCA DI ENERGIA

ABSTRACT - VENZO G.A., 2006 - Heat from the Earth: A giant Source of Energy.

Atti Acc. Rov. Agiati, a. 256, 2006, ser. VIII, vol. VI, B: 15-30.

The physical properties, mineralogical composition, temperature of the concentric shells composing the interior of the Earth; the origin and surface manifestations of its heat, geothermal energy resources, hydrothermal and «hot dry rock» fields are described.

KEY WORDS - Interior of the Earth, Geothermy, Geothermal fields.

RIASSUNTO - VENZO G.A., 2006 - Il calore interno della Terra: una fonte gigantesca di energia.

Sono descritte e illustrate le proprietà fisiche, la composizione mineralogica e la temperatura degli involucri concentrici costituenti l'interno della Terra; l'origine e le manifestazioni superficiali del suo calore interno, la geotermia come risorsa energetica, i campi geotermici idrotermali e quelli artificiali («rocce calde secche»).

PAROLE CHIAVE - Interno della terra, Geotermia, Campi geotermici.

1. PREMESSA

Per soddisfare il bisogno di energia in continua ascesa, investire la tendenza al peggioramento ambientale e con l'auspicio di una seria riconsiderazione a livello mondiale dei modelli di sviluppo, il problema da risolvere è dove e come reperire fonti energetiche di grande potenzialità, economicamente competitive, rinnovabili e non inquinanti, quale alternativa ai combustibili fossili tradizionali (carbone, petrolio, gas naturali) che non sono rinnovabili e per giunta inquinano. Le fonti energetiche finora sperimentate: eolica, pannelli solari, moto di maree, moto

ondoso, da biomasse, possono valere come fonti integrative, non certo alternative a quelle tradizionali.

Un caso particolare è quello della energia idroelettrica, il cosiddetto «carbone bianco», che negli anni immediatamente successivi alla seconda guerra mondiale è stata il principale motore della straordinaria ripresa del nostro Paese: nel 1960 su una produzione nazionale complessiva di 56 miliardi di kWh, oltre 46 miliardi di kWh venivano dagli impianti idroelettrici. L'idroelettrica è una energia che per essere direttamente dipendente dal ciclo dell'acqua ha il pregio di essere rinnovabile e non inquina; ma anche a prescindere dagli impatti ambientali negativi che la diversione dei corsi d'acqua e la costruzione di serbatoi artificiali comporta, la sua ulteriore espansione ha limiti ben precisi, se non altro perché la maggior parte dei siti adatti alla costruzione di grandi impianti idroelettrici, sia a deflusso che a serbatoio, è già stata utilizzata.

E allora, cosa hanno fatto i Paesi più evoluti e industrializzati? Hanno deciso tutti, tranne il nostro, di ricorrere all'energia termonucleare, la sola fonte sulla quale, almeno per ora, si possa fare seriamente assegnamento come alternativa a quelle tradizionali.

La preoccupante situazione energetica italiana discende in primo luogo dall'esito del referendum del 1987. Emotivamente condizionata dal gravissimo incidente accaduto alla centrale nucleare di Chernobyl in Ucraina, l'opinione pubblica italiana a grande maggioranza optò per il no alle centrali nucleari, che a quell'epoca erano due in fase avanzata di realizzazione. Conseguenza di quella decisione referendaria popolare è che oggi importiamo l'82% (di cui il 65% sono idrocarburi) delle fonti energetiche necessarie al nostro fabbisogno. Per quanto riguarda in specifico l'energia elettrica, siamo dipendenti dall'estero per l'84%; e per la quota che produciamo in Italia noi bruciamo più idrocarburi di quanto se ne brucino per lo stesso scopo in tutti gli altri Paesi europei messi assieme. Ed è soprattutto per queste ragioni che agli italiani l'elettricità costa il doppio di quella che si paga in Francia, il triplo di quella della Svezia.

Un tale impiego di combustibili fossili per produrre energia è anche la causa principale di inquinamento dell'ambiente, al punto che in Italia gli obiettivi di riduzione progressiva delle emissioni inquinanti indicati dai protocolli di Kyoto sembrano praticamente irraggiungibili.

C'è però una fonte naturale di energia che è di durata illimitata e con certe precauzioni anche pulita, ancora poco considerata e praticamente ignorata dalla opinione pubblica: è l'energia geotermica, il calore interno della Terra, «un gigante che dorme e che attende di essere svegliato».

2. L' INTERNO DELLA TERRA

Le conoscenze dirette di come all'interno è il nostro pianeta avvolto dalla sua atmosfera gassosa e sotto la idrosfera costituita degli oceani e dei mari, sono limitate alla sua crosta per uno spessore che è veramente esiguo rispetto alla lunghezza del raggio terrestre.

Le informazioni sulle parti più profonde le abbiamo indirettamente, soprattutto dalle indagini geofisiche, in primo luogo dalla sismologia. Sono infatti le variazioni della velocità di propagazione e l'andamento delle traiettorie delle onde sismiche a rivelarci che la Terra al suo interno è formata da 3 involucri principali concentrici: crosta, mantello e nucleo, delimitati da superfici ideali dette «di discontinuità» perché in loro corrispondenza si riconoscono significativi cambiamenti dello stato fisico della materia (Figg. 1 e 2).

La parte superiore della crosta continentale considerata assieme alla sua copertura costituita dal complesso delle rocce in gran parte affioranti in superficie, è chiamata «strato del granito» o anche «sial» per la predominanza dei componenti allumosilicatici delle sue formazioni rocciose. Una probabile superficie di discontinuità di secondo ordine, quella di Conrad (sulla cui esistenza non tutti i geofisici sono però d'accordo), segna il passaggio alla parte inferiore della crosta continentale, detta «strato del basalto» o anche «sima» per la predominanza dei silicati magnesiferi. Lo spessore complessivo della crosta continentale varia dai 30 ai 70 km.

Lo spessore della crosta oceanica è molto minore, massimo di 10 km, perché alla crosta oceanica manca il complesso granitico-gneissico superiore; per cui i sedimenti recenti e attuali che sono depositi sul fondo degli oceani ricoprono direttamente formazioni basaltiche analoghe a quelle dello «strato del basalto» della crosta continentale.

Il limite tra la crosta e il mantello è marcato da una superficie di discontinuità di primo ordine, la *Mobo*, così detta in onore del geofisico Mohorovičić che per primo la individuò. Benchè vi sia la *Mobo* a separarla, la crosta e la parte superiore del mantello di composizione ultrabasica peridotitica, costituiscono la cosiddetta *litosfera* che i geofisici chiamano *lid* perché assieme costituiscono un complesso che è omogeneo per densità e rigidità. Lo spessore della litosfera delle aree continentali è di circa 100 km, quella delle aree oceaniche di circa 70 km.

Al di sotto della *litosfera* fino alla profondità di 250 Km vi è l'*astenosfera*, quella parte del mantello che il comportamento delle onde sismiche indica essere allo stato altamente vischioso («low velocity layer» dei geofisici).

Sotto l'astenosfera segue una zona detta «di transizione» al mantel-

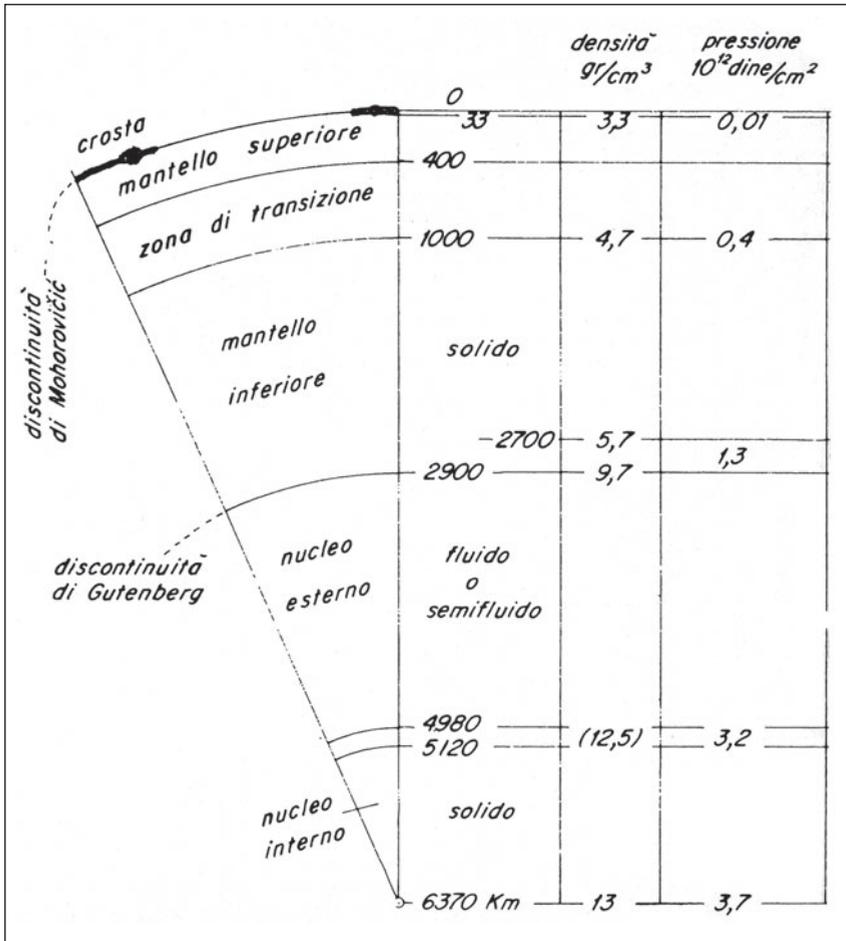


Fig. 1. Superfici di discontinuità, densità e pressioni all'interno della Terra secondo Bullen (1967).

lo inferiore, costituito da silicati ultrabasici la cui rigidità è da 2 a 3 volte maggiore di quella dell'acciaio alla pressione ordinaria.

Delimitato dalla discontinuità di Wiechert-Gutenberg alla profondità di 2900 km, sotto il mantello c'è il nucleo esterno costituito da leghe di ferro e nichel, come sono le sideriti. La brusca diminuzione della velocità delle onde P (longitudinali) e la non trasmissione delle onde S (trasversali) rivelano che il nucleo esterno non è rigido, bensì fluido o semifluido (Fig. 2).

Dai 5000 km circa fino ai 6370 km del centro del nucleo interno («nociolo») il nostro pianeta avrebbe composizione mineralogica ana-

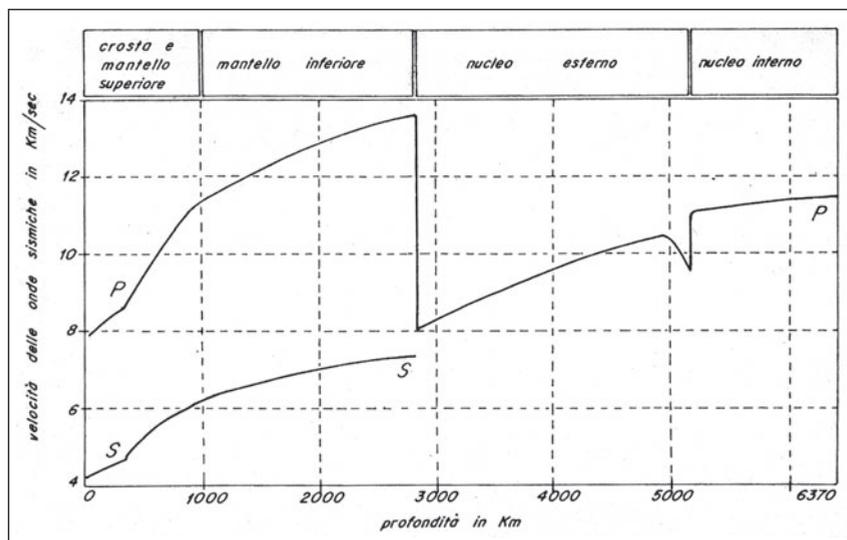


Fig. 2. Variazioni della velocità di propagazione e trasmissione delle onde sismiche P e S all'interno della Terra (da Trevisan e Milia, 1980).

loga a quella del nucleo esterno, dal quale si differenzia per lo stato fisico che è rigido ad altissima densità.

In sintesi, i risultati delle indagini indirette indicano che la Terra è rigida, tranne l'astenosfera ad alta viscosità e il nucleo esterno fluido o semifluido; e che dal raffronto di tali risultati con curve sperimentali (delle variazioni della densità, della rigidità, della compressibilità) si può dire che la composizione mineralogica del mantello è ultrabasica come quella delle peridotiti e duniti, mentre il nucleo è costituito da ferro e nichel.

3. LA TEMPERATURA ALL'INTERNO DELLA TERRA

Il flusso di calore che arriva alla Terra dal sole penetra pochissimo in profondità. Nel sottosuolo le variazioni stagionali della temperatura dell'atmosfera si avvertono man mano attenuate fino a un livello in corrispondenza del quale la temperatura è sempre la stessa («strato neutro»). Nelle regioni equatoriali questo livello è a pochi decimetri sotto la superficie del suolo, in alcune regioni della Siberia a 120 m, in Italia lo strato neutro è a profondità variabili fra i 15 e i 20 m, a seconda della latitudine. A Parigi un termometro posto a 28 metri di profondità (strato neutro locale), dall'anno 1780 segna costantemente la temperatura di 11,8°C.

Che la Terra abbia un suo calore interno indipendente da quello che vi arriva del sole era stato intuito fin dalla antichità. Ovidio nelle *Metamorfosi* lo immagina «un grande fuoco che si manifesta con i vulcani». Dante, in quella grandiosa sintesi della cultura nel Medio Evo quale è la *Divina Commedia*, così lo raffigura nell'VIII canto dell'*Inferno*:

*Versan le vene le umifere acque
per il vapor che la terra ha nel ventre
che d'abisso le tira suso in alto.*

Sotto lo strato neutro la temperatura sale di pari passo con la profondità. L'aumento della temperatura ogni 100 m è il *gradiente geotermico*, che mediamente è di 3°C (30° C/ 1 km); ma è diverso da regione a regione. Dove vi sono coperture laviche di formazione recente il gradiente può arrivare a 14° C; e può essere ancora maggiore in zone di vulcanismo attivo con il serbatoio magmatico prossimo alla superficie,

Fino alle massime profondità accessibili ad osservazioni dirette è stato accertato che la temperatura aumenta come multiplo del gradiente geotermico. Ma estrapolando sic et simpliciter anche solo il suo valore medio, già a 100 km dalla superficie la temperatura verrebbe ad essere di circa 3000°C, di 70.000°C alla base del mantello, di 180.000°C al centro del nucleo. Sono valori troppo alti per essere attendibili; se fossero tali il nostro pianeta, malgrado l'azione antagonista della pressione, dovrebbe essere tutto allo stato fuso.

Tenuto conto dei dati sismologici e delle leggi della termodinamica, temperature ritenute verosimili sarebbero di 3700°C al limite tra nucleo e mantello e di 4300°C nella parte più profonda, al centro del nucleo terrestre (Fig. 3).

4. ORIGINE DEL CALORE DELLA TERRA

È questo un argomento che fa ancora discutere gli scienziati; e verosimilmente continuerà a farlo finché non sarà risolto il problema della origine del sistema solare.

Il convincimento un tempo largamente condiviso era che il calore interno della Terra fosse residuo di quello del pianeta primordiale allo stato fuso. Questa ipotesi è stata superata con la scoperta della radioattività delle rocce, che ha fornito i presupposti alla teoria moderna, secondo la quale, se non tutto, gran parte del calore terrestre viene dalla energia cinetica delle particelle α e degli elettroni emessi dagli isotopi radioattivi, soprattutto l'uranio238, il torio232 e il potassio40, conte-

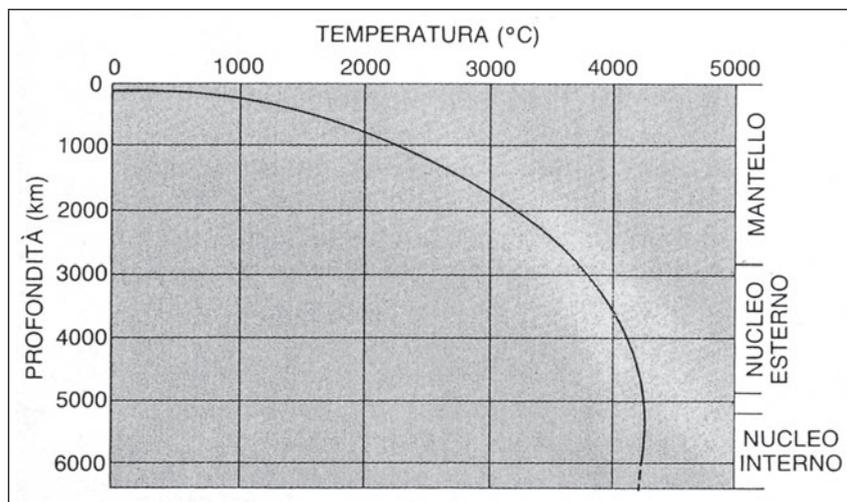


Fig. 3. Curva delle variazioni della temperatura all'interno della Terra (da Marchetti *et alii*, 1986).

nuti nelle rocce granitiche della crosta e, secondo alcuni, anche in quelle basaltiche della parte superiore del mantello. Il dubbio che ancora sussiste è se il calore derivi tutto dalla radioattività oppure se proviene anche dagli involucri terrestri più profondi nei quali sarebbe imprigionato calore primordiale.

Il trasferimento del calore terrestre dall'interno verso la superficie in teoria può avvenire sia per conduzione che per convezione. Ma risultando complessivamente molto bassa la conducibilità della materia costituente il nostro pianeta, è molto probabile che il trasferimento del calore avvenga soprattutto nella astenosfera per convezione. È questa la teoria con la quale si spiega anche il grandioso fenomeno della deriva dei continenti (Fig. 4).

La teoria della circolazione convettiva sembrerebbe improponibile per spiegare il fenomeno della trasmissione del calore anche da maggiori profondità, stante lo stato fisico del mantello che il comportamento delle onde sismiche, di durata brevissima, rivela essere rigido in tutto il suo spessore, tale da non consentire movimenti della materia. Va però detto che secondo alcuni geofisici, per effetto delle sollecitazioni geodinamiche la cui persistenza nel tempo è lunghissima essendo scandita da tempi geologici, anche il resto del mantello e non solo l'astenosfera potrebbe essere in uno stato fisico tale da giustificare il trasferimento di calore per convezione.

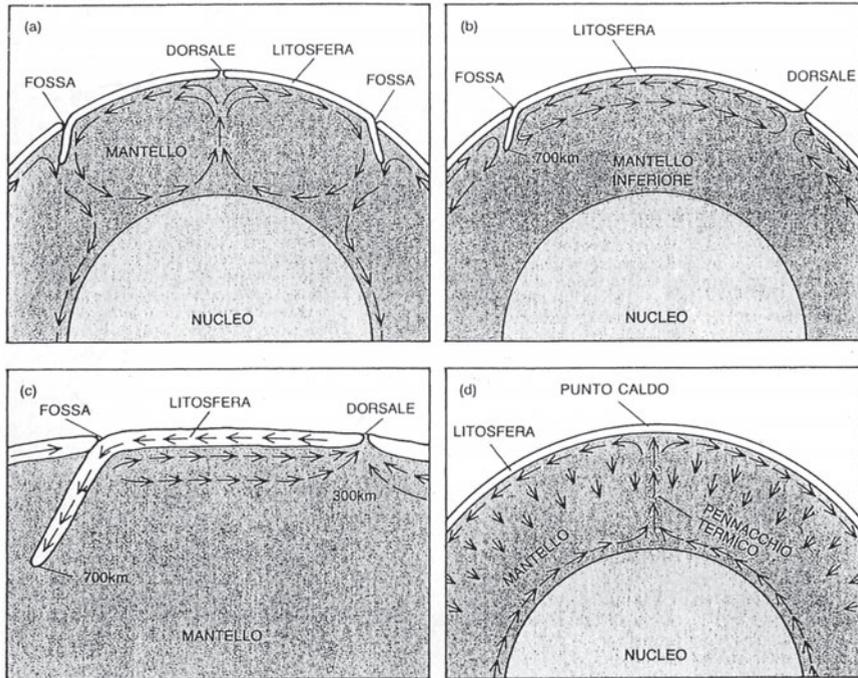


Fig. 4. Modelli teorici di circolazione convettiva del calore nel mantello terrestre (da Marchetti *et alii*, 1986).

5. MANIFESTAZIONI SUPERFICIALI DEL CALORE TERRESTRE

Il calore interno della Terra si manifesta in modo molto evidente con i vulcani e le manifestazioni post vulcaniche, dette anche tardo vulcaniche (sorgenti calde, geysir, fumarole, mofete, soffioni boraciferi); ma anche, impercettibilmente, attraverso il «flusso di calore», che è la perdita di energia termica che si libera ovunque nell'atmosfera per unità di area e di tempo.

Il flusso di calore è massimo ai margini dei continenti in movimento, che sono le zone dove il vulcanismo è attivo e alta la sismicità; minimo all'interno delle aree continentali stabili.

6. LE SORGENTI DI ACQUA CALDA

Si può dar per certo che l'uomo primitivo conosceva e in diversi modi traeva beneficio dalle acque naturali calde fin dai tempi più remoti della

preistoria. In epoca storica lo facevano su larga scala gli Etruschi, i quali trasmisero la consuetudine dei bagni termali ai Romani, che poi la diffusero pressoché ovunque arrivarono con le loro conquiste.

Nel Medio Evo furono i Turchi a esportare o ripristinare le balneazioni termali nei Paesi da loro conquistati; in Ungheria, ad esempio, i cosiddetti bagni turchi sono fra i pochi ricordi non sgradevoli della dominazione ottomana.

I bagni termali li ritroviamo abitudinari e tradizionali anche presso molte popolazioni dell'Estremo Oriente. In Giappone riti di purificazione si celebrano in templi costruiti nei luoghi delle scaturigini naturali di acque calde, frequentissime in quel Paese. E delle acque calde termali beneficiano da sempre popolazioni dell'Africa, dell'America e dell'Australia.

In Italia, nel Medio Evo e ancor più nel Rinascimento le acque termali, in particolare quelle del Volterrano che il popolino vedeva come manifestazioni sataniche, bocche dell'inferno da evitarsi come pericolose, le troviamo descritte in trattati di balneo terapia fin dal secolo XI, decantate e raccomandate dai medici del tempo come panacea quasi universale.

7. I CAMPI O GIACIMENTI GEOTERMICI

Campi o giacimenti geotermici si definiscono quelle zone della superficie terrestre dove, per il gradiente geotermico notevolmente superiore a quello medio di $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$, temperature molto alte sono a profondità raggiungibili con pozzi trivellati.

Essendo sistemi rinnovabili, i giacimenti geotermici sono praticamente inesauribili. La loro ubicazione è in prossimità delle fosse tettoniche (*rift*), degli archi insulari e dei margini dei continenti in movimento, secondo la teoria mobilistica delle correnti convettive subcrosali. Ma anche all'interno dei continenti vi sono zone a gradiente geotermico anormalmente alto per la presenza di vulcani isolati, detti «di punto caldo» (*hot spots*), alimentati da «pennacchi» (*plumes*), configurabili come correnti cilindriche ascensionali di materiale incandescente proveniente dal mantello.

I campi geotermici attualmente utilizzati industrialmente per produrre energia sono quelli idrotermali; recentemente sono stati avviati studi e ricerche dirette per l'utilizzo anche di quelli detti di rocce calde secche. Su altri due tipi di campi, quelli geopresurizzati e quelli magmatici, le indagini sono ancora in una fase molto iniziale.

8. I CAMPI GEOTERMICI IDROTERMALI

Sono detti anche naturali o tradizionali perché i primi ad essere utilizzati industrialmente sono stati quelli dei soffioni boraciferi del Volterrano, che ne sono l'esempio classico.

Il primo tentativo di produrre elettricità dal calore della Terra fu fatto nel 1904 in Italia, quando si accesero 5 lampadine da una piccola dinamo azionata dalla pressione del vapore proprio di uno dei soffioni boraciferi di Larderello. Un anno dopo, nel 1905, entrò in funzione il primo impianto geotermico generatore di elettricità, di 20kW. E sempre a Larderello nel 1913, otto anni dopo il primo esperimento, fu costruita la prima centrale elettrica con turbogeneratore da 250 kW.

Negli anni successivi la produzione geotermoelettrica in Italia ha avuto un incremento notevole, fino a 4.700.000.000 kWh nell'anno 2000. In assoluto è un quantitativo modesto, poco più dell'1,5% del nostro fabbisogno di energia elettrica; ma è significativo e soprattutto incoraggiante, perché pone il nostro Paese al quarto posto al mondo per la produzione di elettricità dalla geotermia (Fig. 5).

I campi geotermici idrotermali hanno caratteristiche stratigrafiche e strutturali, di temperatura e di composizione chimica dei fluidi le più diverse; per cui si può dire che nessun giacimento idrotermale è eguale a un altro. Hanno però in comune:

- a) alte temperature a poca profondità sotto la superficie terrestre, per gradienti geotermici anormalmente alti;
- b) un fluido per lo più costituito da acqua di circolazione sotterranea alimentata dalle precipitazioni meteoriche in regioni finitime;
- c) una roccia fratturata permeabile quale serbatoio di raccolta del fluido;
- d) una copertura di formazioni geologiche impermeabili che impediscono al fluido caldo di salire dal serbatoio ed espandersi in superficie.

Il fluido può essere:

- 1) vapore surriscaldato, definito anche «vapore secco», a temperature di 250°-350° C;
- 2) vapore frammisto ad acqua calda («vapore umido»), a temperatura superiore a 100°C, il cui impiego richiede la separazione dalla frazione liquida prima di immetterlo nelle turbine;
- 3) acqua calda a temperatura inferiore a 100° C, la cui utilizzazione ottimale è per riscaldamento.

Uno schema di giacimento idrotermale è alla Fig. 6.



Fig. 5. Vapore solforoso nel campo geotermico idrotermale di Larderello. Sullo sfondo l'impianto refrigerante della centrale di Monterotondo (foto F. Tosi).

9. I CAMPI GEOTERMICI ARTIFICIALI O «ROCCE CALDE SECCHE»

Per l'impermeabilità generale del sistema questi campi sono caratterizzati dalla mancanza di fluidi naturali e di una roccia permeabile che faccia da serbatoio. Da ciò la definizione di «hot dry rock».

È stato già stato dimostrato che anche le grandi risorse geotermiche di questi campi sono utilizzabili a scopo energetico creando artificialmente il serbatoio di accumulo e immettendovi, sempre artificialmente, un fluido dall'esterno.

Il primo esperimento è stato fatto nel 1977 a Fenton Hill Nuovo Messico dal Los Alamos Scientific Laboratory (LASL) con il progetto HDR, pompando attraverso pozzi trivellati acqua a forte pressione nella roccia calda secca fino a frantumarla, realizzando in tal modo il serbatoio. Il fluido (acqua dolce) immesso, riscaldatosi nel serbatoio artificiale è riportato in superficie attraverso pozzi paralleli a quelli di immissione (Fig. 7). Successivi esperimenti in USA, Europa e Giappone hanno avuto esito positivo per quanto riguarda la messa a punto delle tecniche di esecuzione e gestione degli impianti; ma produrre energia da campi di rocce calde secche è ancora molto costoso, tanto che al

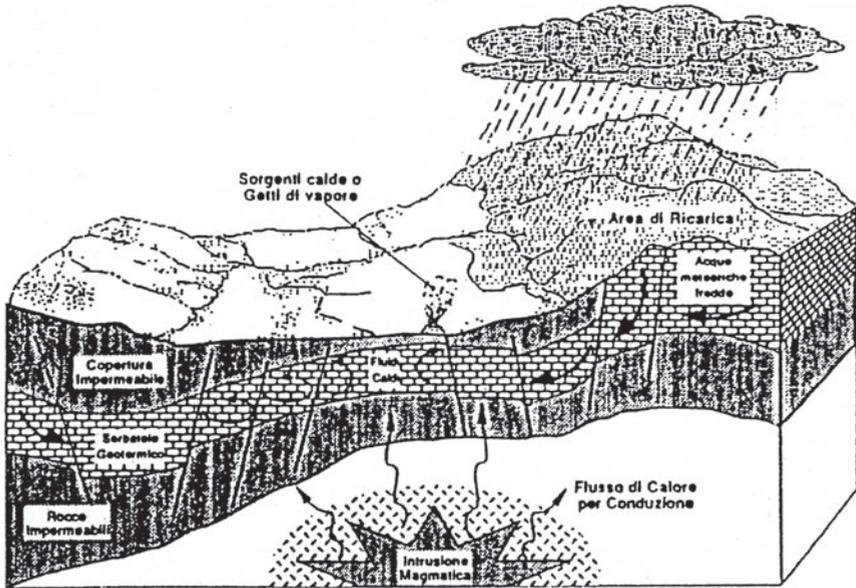


Fig. 6. Schema di sistema geotermico idrotermale (da Barbier e Santoprete, 1985).

presente non è conveniente passare dalla fase sperimentale a quella industriale.

10. SISTEMI ACQUIFERI TERMALI

Oggidi in varie parti del mondo sono ormai numerosissimi gli impianti che utilizzano la geotermia per riscaldamento in tutte le sue applicazioni e impieghi. A questo scopo si può utilizzare non solo il calore dei campi geotermici a bassa temperatura, ma anche quello di qualunque sistema acquifero sotterraneo con temperature relativamente molto basse (anche meno di 30°C), tramite scambiatori che trasmettono il calore del fluido geotermico a un fluido all'esterno.

Il primo tentativo riuscito di riscaldare una abitazione con acqua calda termale fu fatto nel 1890 negli Stati Uniti d'America. Oggidi acque sotterranee a bassa temperatura riscaldano reti urbane in molti Paesi. Ad esempio, a Reykiavik, capitale dell'Islanda, l'isola oceanica che è l'affioramento più esteso della dorsale medio atlantica, il riscaldamento è assicurato da fluidi geotermici, integrati da combustibili tradizionali solo nei periodi di freddo eccezionale.

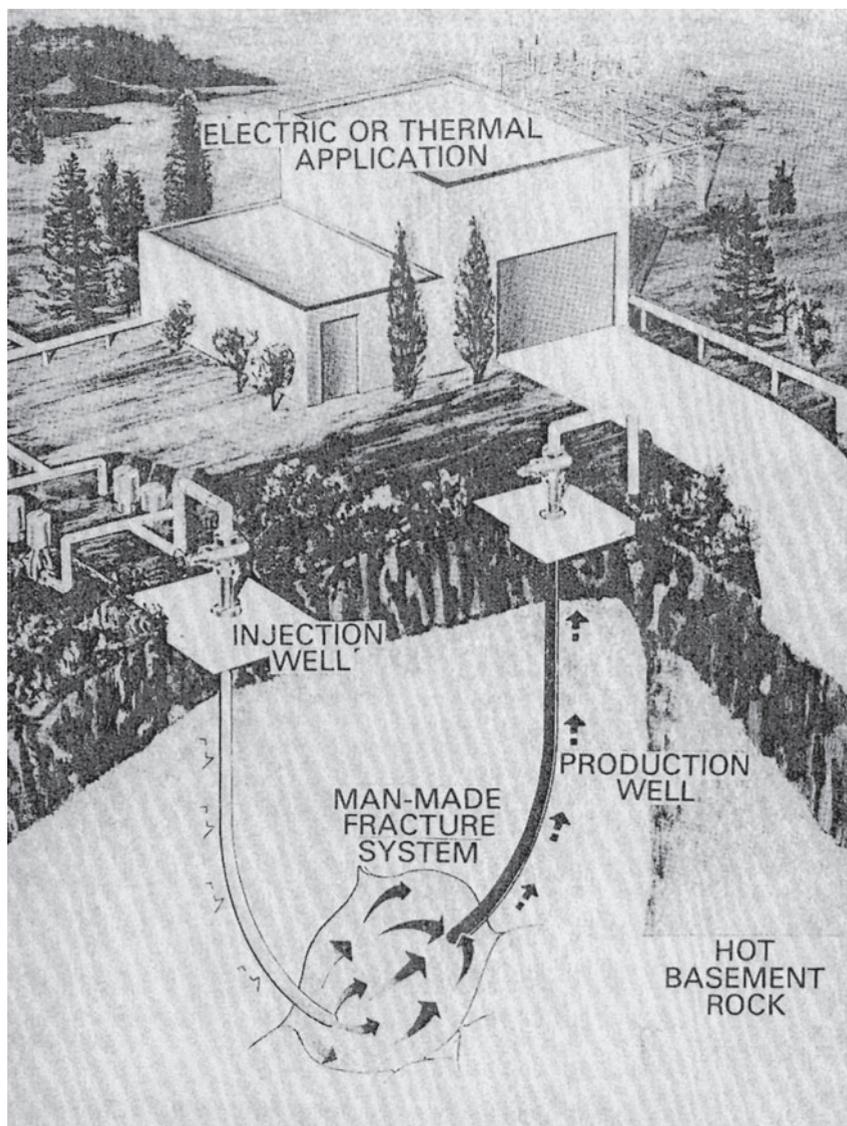


Fig. 7. Schema di impianto per lo sfruttamento energetico di un campo geotermico artificiale *hot dry rock* (da Nunz, 1980).

Un esempio emblematico è quello della Svizzera. Benché non vi siano campi geotermici in senso stretto, in quel Paese già si utilizzano nelle più svariate applicazioni del riscaldamento (abitazioni private, uffici pubblici, agricoltura e stabilimenti industriali) acquiferi caldi, anche a

temperatura di soli 30° C, esistenti a profondità che siano economicamente raggiungibili con trivellazioni.

In Italia sono soprattutto la Toscana e il Lazio le regioni dove fluidi geotermici a bassa temperatura sono utilizzati per riscaldare serre ortofrutticole e allevamenti di pesci in acqua-cultura e capannoni industriali.

11. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Oggidi la geotermia è già una fonte energetica integrativa molto importante, con previsioni di grande sviluppo futuro; ma non è ancora una fonte energetica che possa considerarsi alternativa ai combustibili fossili tradizionali.

Il calore terrestre per produrre energia elettrica per ora proviene quasi totalmente da campi geotermici idrotermali, dove le temperature sono sufficientemente elevate (minimo 150° C) a profondità economicamente accessibili (max. 2000-2500 m).

Da qualche anno sono in corso nel mondo esplorazioni di campi geotermici con sondaggi molto profondi. In Italia a Larderello sono già stati perforati pozzi fino alla profondità di 4500 m e ne è in progetto uno a 5000m da spingere, se sarà possibile, anche oltre. Dalla realizzazione di questo progetto ci si aspetta l'acquisizione di dati geologici di grande interesse sulle caratteristiche della crosta continentale e importanti conoscenze tecniche sul comportamento dei materiali impiegati in ambienti estremi; conoscenze che potrebbero costituire la premessa a progetti di utilizzo di riserve geotermiche estremamente interessanti.

Utilizzare il calore della Terra per produrre energia non è però una operazione semplice. Perché i campi geotermici hanno caratteristiche geologiche, composizione chimica e temperature dei fluidi le più diverse; e la loro attivazione e successiva gestione comportano la risoluzione di problemi che non sono da poco: per la corrosività dei fluidi geotermici, solitamente altamente mineralizzati da sali e da H₂S e per le alte temperature. Il che richiede l'impiego di materiali speciali per condutture e scambiatori di calore. Ed è indispensabile che durante la trivellazione dei pozzi e la successiva gestione del campo gli acquiferi di acqua dolce utilizzati per l'approvvigionamento idrico siano tenuti rigorosamente al riparo da possibili contaminazioni da parte dei fluidi geotermici.

Oggidi dalla geotermia si produce energia elettrica per una potenza ancora modesta in senso assoluto, ma maggiore di quella complessiva di tutte le altre fonti alternative agli idrocarburi finora sperimentate, escluse la nucleare e l'idraulica. E constatazione incoraggiante è che il

costo medio del kWh geotermico dei campi attualmente in produzione nel mondo è già competitivo con quello delle fonti tradizionali.

La utilizzazione dei fluidi geotermici a basse temperature per riscaldamento è già oggi una realtà molto importante e con ottimistiche previsioni di una diffusione sempre più vasta e differenziata. In un futuro non molto lontano per produrre riscaldamento in tutti suoi molteplici impieghi la geotermia potrebbe essere una fonte veramente alternativa ai combustibili naturali, non solo integrativa quale ancora è oggi.

RINGRAZIAMENTO

Al Dott. Franco Tosi geologo dell'ENEL, che per la sua esperienza a Larderello, mi ha cortesemente fornito dati statistici e tecnici importanti nonché informazioni bibliografiche non facilmente reperibili.

BIBLIOGRAFIA

- BARBIER E. e SANTOPRETE G. - L'energia geotermica. Una fonte di energia dall'interno della Terra - Ed. Giappichelli, Torino.
- BARBERI F. e INNOCENTI F., 1985 - Elementi di Geologia geotermica - *Quaderni Ist. di Mineralogia e Petrografia*, Pisa.
- BISOGNI A., DONATI C., PRIAMI F., SANTINI M. e TOSI F., 1993 - Aspetti minerari della ricerca geotermica nell'area toso-laziale: il ruolo del geologo di cantiere - Ed. ENEL S.p.A, Vice Direzione Attività Geotermiche.
- BULLEN K.E., 1967 - Basic evidence for Earth division. In *Earths Mantel* - Ed. Academic Press.
- D'OFFIZI S., 2004 - Geology can solve the main problem humanity has to face with: how to access clean and renewable energy for all - *Special vol. It. Geol. Soc. for the IGC 32*, Florence.
- IPPOLITO F., 1978 - L'energia geotermica nel quadro di una utilizzazione diversificata delle fonti energetiche, in *Saggi di Geologia e Geologia economica* - Ed. Liguori, Napoli.
- MARCHETTI G., PELLEGRINI L., ROSSETTI R., VANOSI M., 1986 - La Terra ieri e oggi - Ed. La Nuova Italia, Scandicci (Firenze).
- NUNZ G.J., 1980 - The D.O.E. Hot Dry Rock programs. In *Proceedings second DOE-ENEL workshop for cooperative research in geothermal energy* - Ed. Berkeley Univ. Earth Sciences Division.
- RAU H., 1980 - Energia geotermica. Lo sfruttamento del calore terrestre in 50 Paesi. Tecniche nuove - Ed. Tecniche Internazionali, Milano.
- SOMMARUGA C. e VERSIANI G., 1995 - Geotermia. Principi, Ricerca, Produzione - NIS - *La Nuova Italia Scientifica*, Roma.
- SPEZIA U., 2005 - Energia: quale futuro? - *Le Scienze n. 442*.

- TREVISAN L. e GIGLIA G., 1980 - Introduzione alla Geologia - *Ed. Pacini*, Pisa.
- UYEDA S., 1988, Handbook of terrestrial heat-flow density determinations. R. Haenel *et alii* - *Kluwer Acc. Publ.*, Dordrecht.
- VENZO G.A., 1992 - Riflessioni di un geologo di Ingegneria al suo commiato dall' insegnamento ufficiale - *Univ. di Trento, Dip. di Ingegneria Civile e Ambientale*.

Indirizzo dell'autore:

Giulio Antonio Venzo - Via O. Rovereti, 18 - I-38100 Trento, Italia
