

CORSO DI ETICA  
Anno Accademico 2020-2021



Riscaldarsi: come?



Prof. Massimo ODDONE

Dipartimento di Chimica Generale

Università degli Studi di Pavia

Viale T. Taramelli, 12

27100 Pavia

[@ massimo.oddone@unipv.it](mailto:massimo.oddone@unipv.it)

 0382 – 987334

A questa domanda mi porta alla mente i miei studi giovanili sul fuoco e il mito di Prometeo

*“l fuoco vive della morte della terra e l’aria vive della morte del fuoco; l’acqua vive della morte dell’aria, la terra della morte dell’acqua” (Eraclito)*

Racconta la leggenda che quando Zeus incaricò Prometeo di forgiare l’uomo, egli lo modellò dal fango e lo animò con il fuoco divino.

Tanto era importante per il Titano la sua creazione che fu disposto a sottrarre ad Atena il suo scrigno, in cui erano riposte intelligenza e memoria, perdonarle agli umani.

Zeus preoccupato per tale elargizione agli uomini che con queste qualità sarebbero diventati sempre più capaci e potenti, già pensava di distruggerli.

Il conflitto tra Zeus e il Titano si fece sempre più acuto: Prometeo, con uno sfrontato raggio, riservò la parte immaginabile di un enorme bue agli dei, lasciando agli uomini la parte carnosa; cosa che riempì di ira Zeus, il quale, per rivalsa, tolse il fuoco agli uomini, nascondendolo.

Il Titano allora, con un artificio, rubò il fuoco dall’Olimpo, nascondendolo nel cavo di una canna, per ridarlo agli uomini.

Zeus, quindi oltremodo offeso, inviò sulla Terra Pandora.

Dono tanto affascinante quanto pericolosissimo.

Infatti ella, prima donna del genere umano, porta con sè un vaso sigillato, ma con il divieto assoluto di aprirlo.

Però, si sa, la curiosità è donna: il vaso viene aperto e da esso escono, per sempre, tutti i mali del mondo.

Nel mito, quindi, bene e male si stringono nel fuoco, in un abbraccio fatale.

Nonostante che questa forma di energia abbia per sempre cambiato in meglio le sorti dell'umanità, racchiude in se il mistero: fonte di calore e di luce, elemento dalla materialità domestica, resta però inafferrabile agli uomini, a volte irrefrenabile, spesso temibile e altrettanto seducente.

L'energia è il grande motore della vita vegetale e animale; il Sole fornisce energia per la fotosintesi e scalda la Terra in modo da tenere l'acqua allo stato liquido e da rendere abitabili le terre emerse e gli oceani.

Ma quell'animale speciale che è l'uomo ha bisogno di altre fonti di energia ed è diventato, nel corso dei millenni, capace di utilizzare l'energia del Sole anche per altri fini *economici*.

Qualcuno ha, per esempio scoperto, che sulla riva del mare il Sole faceva evaporare l'acqua lasciando come residuo il prezioso sale, il prototipo della saline solari; qualcuno ha scoperto che gli incendi dei boschi dovuti a fulmini generavano il fuoco che poteva essere conservato e riprodotto e che i vegetali (di origine *solare* anch'essi) erano adatti combustibili per illuminare e scaldare le caverne.

Un ruolo essenziale dell'energia fu rappresentato dalla produzione della luce; le lucerne alimentate con oli e grassi hanno rappresentato la fonte di illuminazione fino al Settecento.

Con il *fuoco* era possibile cuocere e rendere meglio conservabili e digeribili gli alimenti.

Qualcuno ancora ha scoperto che la forza del vento (generato anche lui dal calore solare che scalda diversamente oceani e continenti) poteva essere *raccolta* dalle vele e poteva spingere una barca.

L'energia del lavoro umano era comunque quella, insieme all'energia fornita dagli animali, che ha spinto avanti la "civiltà" fino all'epoca dei grandi imperi.

Del resto l'energia degli schiavi era abbondante e poteva essere usata per scavare e spostare pietre e costruire gli edifici dei re e dei sacerdoti.

A poco a poco ci si è resi conto che il lavoro degli schiavi poteva essere reso più efficiente, oggi la chiamano *produttività*, se erano forniti di strumenti metallici e che alcuni minerali e pietre potevano essere trasformati, con il calore, in metalli duri, dapprima rame e bronzo e più tardi (ma siamo ormai ai *giorni nostri*, tremila anni fa) il ferro.

E poi che il cibo poteva essere conservato in recipienti ottenuti trattando a caldo certe terre che oggi chiamiamo argille.

La più abbondante e comoda fonte di calore per i metalli e per le ceramiche era sempre fornita dalla combustione del legname dei boschi.

Un importante passo avanti si è fatto quando qualcuno, 5000 anni fa, ha osservato che, dopo l'incendio di un bosco, restava del materiale nero che bruciava ancora, anzi bruciava meglio del legno: il carbone di legna prodotto per combustione parziale del legno si prestava meglio del legno per alcune operazioni metallurgiche e nei forni.

Il carbone di legna era in uso comune in Egitto per la produzione di metalli e del vetro.

La successiva importante fonte energetica rinnovabile fu offerta dal moto delle acque, circa 2000 anni fa; ben presto ci si è accorti che quando l'acqua supera un dislivello ha in sé dell'energia che può essere utilizzata per muovere una ruota ed è nata così l'energia idraulica, rinnovabile anche lei perché legata al ciclo naturale dell'acqua.

Molto approssimativamente si può dire che i progressi nel campo dell'energia coincidono con i periodi di grande sviluppo economico, con i grandi imperi, anche se per il primo principio della Termodinamica non tutta energia viene utilizzata per produrre lavoro, ma una parte di essa viene convertita in calore, che è la forma vile, in quanto non è recuperabile.

Quello egiziano, avendo a disposizione grandi quantità di mano d'opera, energia umana praticamente gratuita, non ha avuto grandi progressi nell'uso delle altre fonti di energia.

Una grande svolta si è invece avuta col fiorire quasi contemporaneo (da 2500 a 1800 anni fa) delle civiltà greca e romana nel Mediterraneo, persiana in Asia, cinese con la dinastia Han (dal 202 avanti Cristo al 220 dopo Cristo).

In questo periodo, grazie al flusso di informazioni portate attraverso l'Asia da mercanti e viaggiatori, si osserva il fiorire di *macchine* alimentate dalle varie fonti di energia principalmente il calore ottenuto con la combustione del legno, l'energia idrica, l'energia del vento e del Sole.

La leggenda (o storia ?) di Archimede (287-212 a. C.) che concentra i raggi solari sulle vele delle navi di Marcello che assediava Siracusa, dove Archimede era ospite del re Gerone, sta ad indicare l'attenzione per il fatto che alcuni corpi potevano concentrare l'energia solare.

In particolare le sfere, di vetro o piene d'acqua, e le parabole concentravano il calore solare in un *fuoco* così chiamato perché qualsiasi corpo vi si trovasse si incendiava.

Forse la prima opera sugli specchi *incendiari*, proprio col titolo *Sugli specchi ustori*, si deve al matematico greco Diocle (circa 240-180 a. C.).

I greci erano affascinanti dalla scoperta di equazioni che descrivessero le proprietà delle parabole e delle sfere, un esempio delle interazioni fra scienza *pura* e applicazioni tecniche.

Ma dobbiamo ricordarci che quando si fa una qualunque reazione di combustione, ossia si brucia qualcosa, si libera diossigeno di carbonio, schematicamente:



I processi di combustione sino fonti non rinnovabili: le fonti destinate ad esaurirsi

Se è indubbio che l'energia rinnovabile è l'energia del futuro, è altrettanto vero che le principali fonti d'energia del mondo contemporaneo restano le fonti non rinnovabili, risorse limitate che possono essere utilizzate solo una volta e che nel breve periodo non si riproducono naturalmente.

Devono ricondursi a queste forme di energia non rinnovabili i combustibili fossili (petrolio, carbone e gas naturale) e le fonti nucleari (uranio e plutonio).

Con una produzione di circa 3,5 miliardi di tonnellate annue, il petrolio è la principale fonte d'energia, ma l'oro nero non è inesauribile tant'è vero che si prevede l'esaurimento dei giacimenti intorno al 2050.

Seconda fonte d'energia, il carbone è il combustibile fossile più diffuso con una produzione che supera ogni anno i 4 milioni di tonnellate.

Caratterizzato da bassi costi energetici e dalla possibilità di essere convertito in combustibili liquidi e gassosi ad alto rendimento energetico, il carbone presenta elevati tassi d'inquinamento riconducibili alle emissioni di anidride carbonica e di ossidi di zolfo che derivano dalla sua combustione.

Terza fonte d'energia, i gas naturali vantano una produzione annua che oltrepassa di buona misura i 2300 miliardi di metri cubi: il gas naturale presenta elevati costi di trasporto, in considerazione del fatto che può essere distribuito a pressione attraverso gasdotti oppure trasferito liquido a basse temperature attraverso navi metaniere.

Le prime tre vanno ad aumentare l'effetto serra con gravi conseguenze sull'ambiente.

Passando alle fonti nucleari, la fissione è la modalità di produzione energetica attualmente utilizzata: partendo dagli atomi di uranio e plutonio, un nucleo pesante viene scisso in due nuclei più leggeri e la differenza di massa viene liberata come energia.

Ma da dove derivano le fonti non rinnovabili?

La risposta è dal Sole in senso indiretto che è la principale fonte energetica di l'energia rinnovabile.

Il Sole è l'unico reattore nucleare che funziona!

Buckminster Fuller (1895-1983), "The Grunch of Giants", New York, St.Martin's Press, 1983,

*Oggi siano in grado di assicurare, in maniera duratura, a ogni abitante della Terra un benessere da miliardario, usando soltanto meno dell'uno per cento dell'energia che ci arriva ogni giorno dal nostro reattore nucleare cosmico, il Sole, posto a 150 milioni di chilometri di distanza, del tutto sicuro, che trattiene al suo interno le scorie, capace di assicurarci la fotosintesi, la pioggia, il moto ondoso e tutte le altre ricchezze offerte dalla natura.*

Quando si parla di energia solare il pensiero corre subito alle distese di pannelli fotovoltaici che si stanno diffondendo in tanti paesi.

In Italia, ma dicono che la Cina sia la più grande produttrice di elettricità dal Sole, e anche la più grande produttrice e esportatrice di pannelli solari e di macchinari che utilizzano fonti energetiche rinnovabili, fra cui motori eolici che producono elettricità utilizzando la forza del vento che deriva, anche lei, dal modo in cui il Sole scalda diversamente i vari continenti.

E poi si pensa alle grandi centrali con specchi piani o parabolici che concentrano la radiazione solare in modo da ottenere vapore a temperatura sufficientemente alta, in grado di alimentare turbine elettriche.

Il calore solare, infine può essere utilizzato per riscaldamento a bassa temperatura di acqua per usi igienici e di edifici.

Senza contare che l'energia idroelettrica, prodotta nel mondo (nel 2013) in ragione di circa 3.600 miliardi di chilowattora all'anno (rispetto ad una produzione mondiale annua di elettricità di circa 18.000 miliardi di chilowattora), deriva dal moto delle acque, anche lui derivato dal ciclo di evaporazione e condensazione dell'acqua planetaria, alimentato dal Sole.

Ma ancora di più, guardando al futuro, il Sole rappresenta la grande speranza per liberare le società industriali dalla dipendenza dallo scarso petrolio e dall'inquinante carbone; col Sole è quindi possibile alleggerire anche l'immissione nell'atmosfera dei gas serra che alterano il clima.

A dire la verità il Sole ha rappresentato sempre, anche prima dei pannelli fotovoltaici, la fonte di energia per l'umanità fino al Seicento.

In Italia, ma dicono che la Cina sia la più grande produttrice di elettricità dal Sole, e anche la più grande produttrice e esportatrice di pannelli solari e di macchinari che utilizzano fonti energetiche rinnovabili, fra cui motori eolici che producono elettricità utilizzando la forza del vento che deriva, anche lei, dal modo in cui il Sole scalda diversamente i vari continenti.

Innanzitutto il Sole è la fonte di energia che produce la biomassa vegetale che sta alla base dell'unica irrinunciabile *merce* costituita dagli alimenti umani e animali.

Ancora oggi la biomassa vegetale da cui ricavare *merci economiche* come alimenti e legname, assorbe ogni anno una quantità di energia corrispondente a quella *contenuta* in circa 5 miliardi di tonnellate di petrolio, una quantità superiore a quella di tutto il petrolio estratto ogni anno dai pozzi.

Dalla biomassa vegetale solare le società del passato hanno tratto legname come combustibile e come materiale da costruzione; il calore solare è stato sfruttato sulle rive del mare per ottenere il prezioso sale, indispensabile per conservare la carne e le pelli; con il vento sono state mosse le navi e, naturalmente, dalla biomassa solare sono stati tratti gli alimenti per gli esseri umani e per gli animali, il cui lavoro ha fornito lavoro meccanico prima dell'invenzione dei trattori a motore.

Senza contare che dal Sole traggono ancora oggi la maggior parte dell'energia utile gli abitanti delle zone povere del pianeta.

Del resto non c'è da meravigliarsi perché è grandissima la quantità di energia irraggiata dal Sole che raggiunge la Terra, messa a girare intorno al Sole ad una distanza *giusta* tale da ricevere dal Sole, tanta, ma non troppa, energia in modo da raggiungere, grazie all'atmosfera gassosa, una temperatura media un pò superiore a quella che chiamiamo zero gradi Celsius, quella giusta per tenere l'acqua allo stato liquido.

Oggi abbiamo motivo di comprendere lo straordinario ruolo del Sole anche se le antiche società umane hanno da sempre studiato attentamente il Sole, il suo moto apparente nel cielo e si sono interrogate su come ricavarne qualcosa di utile per alleviare la fatica del lavoro umano.

Le notizie sulla utilizzazione intenzionale del calore solare si perdono nelle leggende.

Chi sa chi è stato il primo a scoprire che con certe pietre rotonde il calore solare poteva essere concentrato su un corpo scaldandolo fino alla temperatura di accensione del fuoco.

## Energia Nucleare: Un pericolo che non esisterà più ?

Per Energia Nucleare si intendono tutti quei fenomeni a partire dai quali avviene una produzione di energia a seguito di specifiche trasformazioni dei nuclei atomici pesanti.



L'intuizione che l'atomo potesse rappresentare una fonte energetica l'abbiamo all'inizio del secolo grazie a Albert Einstein che, nel 1905, pose le basi per la teoria della relatività.

La ricerca sull'atomo, in più di un secolo di studi, è progredita in modo talmente spedito che oggi, su tutto il pianeta, sono molte le centrali nucleari che producono energia per soddisfare le più svariate richieste energetiche.

Ma in che modo si produce energia a partire da un atomo?

Fondamentalmente le modalità di produzione si ritrovano nella fusione (unione) di nuclei leggeri o dalla fissione (rottura) di un nucleo atomico pesante.

Ad oggi, però, non esistono centrali nucleari in grado di utilizzare la fusione come modalità sicura ed affidabile per la produzione di energia.

Si tratta, infatti, di un procedimento instabile e soprattutto in grado di produrre enormi quantitativi di energia il cui effetto può essere decisamente catastrofico.

Proprio sulla fusione, infatti, si basa la cosiddetta bomba atomica o bomba H.

La fissione, invece, è la modalità di produzione energetica che viene attualmente utilizzata e destinata all'uso umano e industriale.

In particolare si tratta di metodologie che, partendo dagli atomi di uranio e plutonio, vengono portate avanti da circa 50 anni, arrivando oggi a produrre circa il 16% dell'energia elettrica mondiale.

La storia della fissione nucleare è, però, recente: i primi risultati pratici si devono ad un illustre fisico italiano.

Fu Enrico Fermi che, per la prima volta nel 1934, bombardò l'uranio con alcuni neutroni, arrivando così a creare un nuovo tipo di energia.

Una scoperta, oltre a conferirgli il premio Nobel, fu anche il punto di partenza di diverse sperimentazioni che presero il via poi in tutto il mondo.

Un processo che è progredito molto in fretta, se si pensa che neanche un secolo dopo il nucleare rappresenta una realtà energetica affermata.

In termini di storia delle centrali nucleari, i primi veri risultati in termini di utilizzo di energia si ebbero nel 1954, quando la centrale di Obninsk (ex URSS) divenne il primo impianto in grado di generare elettricità.

Tuttavia la prima vera e propria centrale atomica entrò in funzione solo due anni dopo, nel 1956 a Sellafield in Inghilterra.

Realtà energetica affermata, il nucleare è però una continua fonte di dibattito e controversie.

È infatti indubbio che si tratti di una metodologia potenzialmente pericolosa:

il ricordo di Černobyl, nel ex URSS nel 1987 e la memoria delle conseguenze derivate dall'esplosione di uno dei reattori della centrale sono ancora vive nella memoria di tutti e il disastro nucleare alla centrale giapponese di Fukushima nel 2011, fantasma di una nuova contaminazione si rifà vivo a seguito del terribile sisma che ha scosso il Giappone, paese in cui sono presenti e in funzione alcune centrali nucleari.

L'aspetto positivo della produzione energetica tramite il nucleare è quindi controbilanciato dagli svantaggi che la costruzione e la funzione di una centrale del genere porta intrinsecamente con sé.

Vantaggi energia nucleare.

Il vantaggio principale dell'energia nucleare consiste nella produzione di energia elettrica a ciclo continuo per prolungati periodi di tempo.

Complessivamente i vantaggi dell'energia nucleare sono i seguenti:

Non produce gas serra.

L'energia nucleare non produce i gas serra. La produzione di energia dall'atomo, non è basata sulla combustione di risorse fossili o vegetali, non causa l'emissione in atmosfera dei gas responsabili del peggioramento dell'effetto serra (es. anidride carbonica).

Produzione di energia elettrica su vasta scala. Da una piccola quantità di uranio una centrale atomica riesce a produrre una grande quantità di energia elettrica a ciclo continuo.

Ciclo di vita della centrale.

L'impianto nucleare può funzionare ininterrottamente per 40-60 anni. Un periodo di tempo così lungo consente di ammortizzare l'elevato costo iniziale della centrale atomica.

## Approvvigionamento energetico.

L'energia nucleare riduce la dipendenza dall'estero nell'approvvigionamento energetico, in quanto consente di produrre una parte dell'energia elettrica altrimenti prodotta importando gas, carbone o petrolio.

Svantaggi energia nucleare.

Il principale svantaggio dell'energia nucleare sono le conseguenze sull'ambiente e sull'uomo in caso di disastro nucleare.

Complessivamente gli svantaggi dell'energia nucleare sono i seguenti:

Scorie radioattive.

Nel processo di fissione nucleare sono prodotti anche rifiuti radioattivi di vario grado che necessitano d'essere lavorati e/o stoccati in depositi di massima sicurezza per migliaia di anni.

Lo stesso trasporto del materiale radioattivo (scorie) dalla centrale al deposito è un problema sia tecnologico che sociale.

Solo energia elettrica. L'energia nucleare consente di produrre elettricità.

Questo consente di soddisfare la domanda di energia elettrica ma non risolve appieno il problema dell'approvvigionamento energetico di un paese.

Ad esempio, in Italia i consumi elettrici pesano circa  $1/3$  dei consumi di energia primaria.

Il vettore elettrico soddisfa gran parte delle esigenze della società avanzata ma non tutte (es. carburanti per il trasporto, combustibili per il riscaldamento, ecc. ).

Tecnologia *capital intensive*.

Il nucleare è una tecnologia *capital intensive*, ossia necessita di grandi investimenti.

Oltre ad essere caratterizzata da elevati costi iniziali, la tecnologia nucleare richiede anche un *know how* tecnologico nel paese sia per quanto riguarda la gestione delle centrali nucleari e sia per la gestione del ciclo del combustibile nucleare.

Queste caratteristiche rendono più complesso il ricorso all'energia nucleare da parte dei paesi poveri ed a bassa industrializzazione, senza aumentare anche la dipendenza tecnologica dai paesi più sviluppati.

Elevati costi iniziali e finali.

Una centrale nucleare richiede elevati investimenti iniziali per la costruzione dell'impianto e del combustibile.

A questi costi si aggiungono i costi finali necessari per il *decommissioning*, lo smaltimento e la messa in sicurezza delle scorie al termine del ciclo di vita dell'impianto.

Sicurezza centrali nucleari.

Le centrali nucleari richiedono un livello di sicurezza maggiore rispetto alle altri centrali elettriche poiché maggiori sono le conseguenze ambientali in caso di disastro o di incidente.

Proliferazione nucleare.

Il ritrattamento del combustibile irraggiato negli impianti civili consente di produrre il plutonio tramite il quale si possono produrre le armi nucleari e la bomba atomica.

Per tali ragioni il settore dell'energia nucleare è sottoposto a rigidi controlli da parte della comunità internazionale.

Da questo punto di vista il nucleare è un importante argomento sui tavoli dell'adipplomazia e della politica internazionale (es. nucleare in Iran).

*In sostanza, le teorie su un futuro senza centrali nucleari sono destinate a diventare realtà, in quanto gli aspetti negativi superano nettamente quelli positivi, indipendentemente dalla prospettiva con la quale si analizzano???*

## L'energia geotermica: Calore terrestre

L'esistenza di un'energia termica all'interno della Terra è un fatto certo e ben conosciuto.

Vulcani, sorgenti termali, soffioni, geysir e le elevate temperature presenti nelle miniere e nei pozzi documentano in modo inequivocabile la presenza di un calore interno.

Le cause che hanno prodotto alla formazione del calore attualmente presente all'interno della terra sono molteplici.

Gran parte di esso deriva dal decadimento degli isotopi radioattivi presenti nelle rocce, in particolare quelle acide della crosta terrestre, che contengono uranio, torio e potassio, con tempo di dimezzamento molto lungo, e sarebbero responsabili del 40% delle emissioni termiche della superficie.

Gli elementi radioattivi avrebbero determinato inoltre la fusione dei metalli, in particolare del ferro.

Quest'ultimo spostandosi verso il centro della Terra a causa della gravità, avrebbe liberato grandi quantità di energia gravitazionale sotto forma di calore, alzando ulteriormente la temperatura.

Infine, va aggiunto il calore primordiale della Terra, che si aggirerebbe attorno ai  $1000^{\circ}\text{C}$ , dovuto alla pressione prodotta dalla compattazione delle particelle e dal loro attrito.

Una possibilità di misurare direttamente la quantità di uranio presente nel nostro pianeta, e quindi il suo contributo radiogenico al calore terrestre, è rappresentata dai geoneutrini, ovvero gli antineutrini prodotti dai decadimenti beta dei nuclei radioattivi naturali contenuti nella Terra, fra cui i più importanti sono quelli che costituiscono la catena di decadimento dell'uranio-238.

Nel 2005 i geoneutrini sono stati osservati per la prima volta dall'esperimento Kamlandin Giappone e quindi confermati dall'esperimento Borexino, presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

La bassissima probabilità di interazione tra gli antineutrini e i nuclei di idrogeno degli idrocarburi liquidi utilizzati per la loro rivelazione (Borexino misura un geoneutrino circa ogni quattro mesi) rendono queste misure ancora troppo incerte per poter porre dei vincoli stringenti ai modelli che stimano il calore radiogenico prodotto dall'uranio in un intervallo compreso tra 5 TW e 13 TW.

Con l'integrazione dei dati raccolti dai rivelatori Sno+ (Canada) e Juno (Cina), attesi per il prossimo decennio, la possibilità di stimare la massa di uranio presente sulla Terra diventerà più concreta.

Oltre a innescare una catena di decadimenti, il nucleo di uranio può rompersi spontaneamente in due parti, dando origine alla cosiddetta "fissione spontanea".

Sebbene sia un evento molto raro (la probabilità per un nucleo di uranio-238 è inferiore a uno su 100 milioni) è possibile osservarne le tracce in alcuni minerali come gli zirconio.

Il processo di fissione può innescare una reazione a catena che produce una notevole quantità di energia: in prossimità del fiume Oklo (Gabon) nel 1972 è stato ritrovato l'unico reattore nucleare naturale al mondo.

Che si è attivato circa 2 miliardi di anni fa, ha funzionato per qualche centinaia di anni scaldando la roccia circostante fino a circa 450 °C.

Nel 1934 i “ragazzi di via Panisperna”, guidati da Enrico Fermi, realizzarono la prima fissione artificiale di nuclei di uranio utilizzando neutroni.

Questi pionieristici esperimenti segnarono l'inizio dell'era della fissione nucleare per la produzione di energia elettrica e di armamenti nucleari.

Nel 2016 i 451 reattori nucleari operativi in tutto il mondo hanno prodotto circa 0,4 TW di potenza elettrica, sufficiente per il fabbisogno di circa 400 milioni di persone.

L'uranio, pertanto, è una fonte di energia non solo per il pianeta Terra, ma anche per l'umanità che lo abita.

Per queste ragioni dalla fine della seconda guerra mondiale l'uranio è diventato sempre più un elemento strategico da estrarre dalle rocce della crosta terrestre dove abitualmente si trova in concentrazioni di una parte per milione, ma in particolari depositi può raggiungere abbondanze dell'ordine del per cento.

*Una delle tecnologie più utilizzate per individuare giacimenti di uranio consiste nel realizzare misure di spettroscopia gamma a bordo di velivoli.*

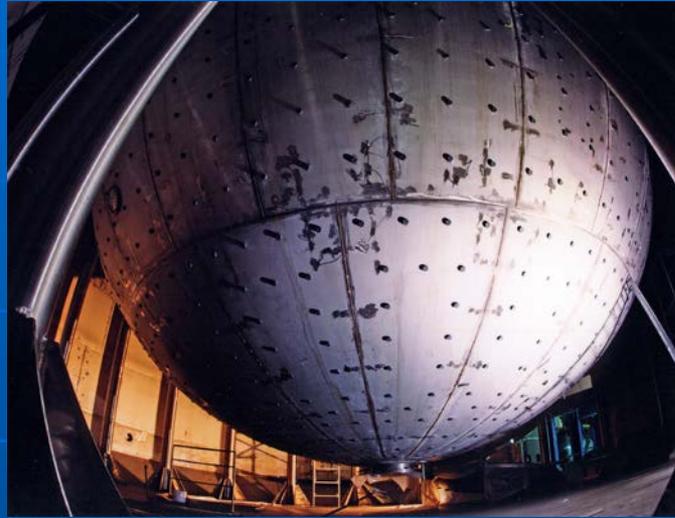
*I raggi gamma prodotti dai decadimenti dei radionuclidi della catena dell'uranio (in particolare dal bismuto) possono essere rivelati volando a un centinaio di metri dal suolo e impiegando spettrometria con rivelatori a ioduro di sodio.*

*Non va dimenticato che circa il 40% della dose efficace di radioattività assorbita da un essere umano che vive in un paese industrializzato è dovuta al radon, un gas radioattivo, inerte, inodore e incolore prodotto nella catena di decadimento dell'uranio.*

*L'esalazione del radon da una roccia, un suolo o un materiale da costruzione, oltre a dipendere dall'abbondanza di uranio, è influenzata dalla porosità e dal contenuto d'acqua del materiale.*

*Indubbiamente una cartografia della distribuzione di uranio nel territorio italiano è uno strumento fondamentale per la prevenzione del rischio radon e una miglior pianificazione territoriale.*

*L'uranio rimane un elemento ricco di fascino, ultimo tra gli elementi naturali della tavola periodica, ma capostipite di una serie di processi radioattivi associati spesso a problemi scientifici interdisciplinari e fortemente legati alla vita dell'uomo.*



La struttura interna dell'esperimento Borexino, grazie al quale è stato possibile misurare i geoneutrini prodotti dall'uranio presente nella Terra

Il gradiente geotermico è l'aumento della temperatura, espressa in °C per ogni 100 metri di profondità.

Ha un valore medio di 2 – 3 °C/100 metri, ma può variare anche notevolmente da località a località, con punte di 0,6°C/100 m e 14°C/100 m, a causa di particolari fenomeni geologici.

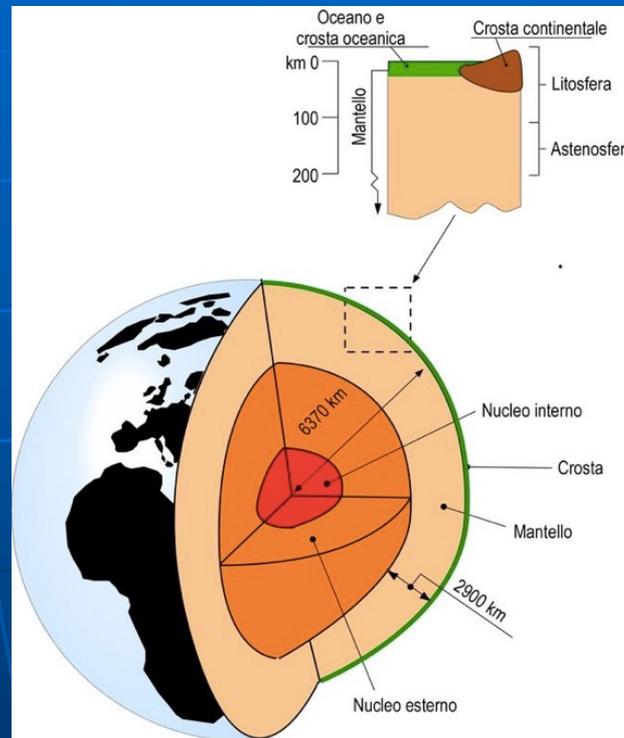
Il grado geotermico è il numero di metri che bisogna scendere sotto la superficie terrestre per avere l'aumento di 1°C. Il grado geotermico è in media circa 39 m.

Applicando questo valore all'intero raggio terrestre, otterremmo una temperatura al centro della Terra di oltre 190000 °C, ma una tale situazione provocherebbe la fusione del nostro pianeta, per cui questo valore deve avere validità solo per la superficie.

Sappiamo, infatti, dalla sismologia che le onde trasversali, che non si trasmettono sui fluidi, attraversano tutto il mantello, vengono bloccate nel nucleo esterno per ricomparire nel nucleo interno; perciò si può dedurre, in base alla composizione mineralogica, che la temperatura del centro della Terra non può superare i 5000°C.

A tale temperatura, le rocce dovrebbero fondere ma, a causa dell'elevatissima pressione, ciò non avviene. Attraverso i dati forniti dalle onde sismiche e dai valori della pressione, è stato calcolato l'andamento delle temperature all'interno della Terra, descritto da una curva chiamata geoterma.

Osservando l'andamento nel grafico, si può vedere che: la litosfera ha una temperatura inferiore a quella di fusione e perciò è rigida; l'astenosfera si presenta plastica perché vicina al punto di fusione; la restante parte del mantello è solida, con la curva di fusione sopra la geoterma; il nucleo esterno ha, invece, una temperatura superiore a quella di fusione e perciò è fluido; il nucleo interno ha la geoterma nuovamente sotto il punto di fusione e quindi è allo stato solido.



Il gradiente e il grado geotermico

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.

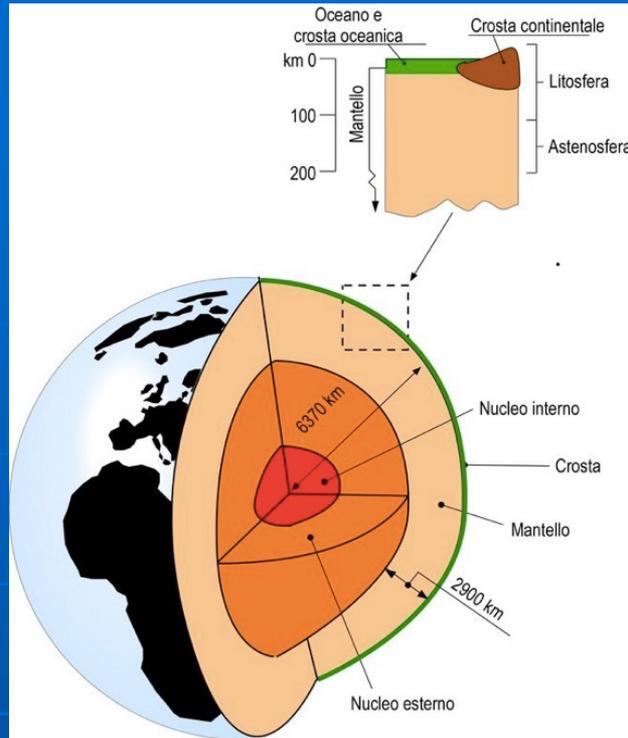
Tutti i moderni modelli termici della Terra, infatti, devono tener conto del calore prodotto in continuazione dal decadimento degli isotopi radioattivi a lunga vita dell'uranio ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ), del torio ( $^{232}\text{Th}$ ) e del potassio ( $^{40}\text{K}$ ), presenti nell'interno 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  $42 \times 10^{12}$  W (conduzione, convezione e radiazione).

Di questa grandezza,  $8 \times 10^{12}$  W provengono dalla crosta terrestre, che rappresenta soltanto il 2% del volume totale della Terra, ma è ricca di isotopi radioattivi,  $32,3 \times 10^{12}$  W derivano dal mantello, che è l'82% del volume totale della Terra, e  $1,7 \times 10^{12}$  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  $22 \times 10^{12}$  W, il raffreddamento di questa parte della Terra è  $10,3 \times 10^{12}$  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.



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

Il raffreddamento del pianeta, comunque, è molto lento.

La temperatura del mantello è scesa, al più, di  $300^{\circ}\text{C}$ - $350^{\circ}\text{C}$  in tre miliardi di anni e, alla sua base, è di circa  $4000^{\circ}\text{C}$ .

È stato stimato che il calore totale contenuto nella Terra, assumendo una temperatura superficiale media di 15°C, sia dell'ordine di  $12,6 \times 10^{24}$  MJ e che quello contenuto nella crosta sia dell'ordine di  $5,4 \times 10^{21}$  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.

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, 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.

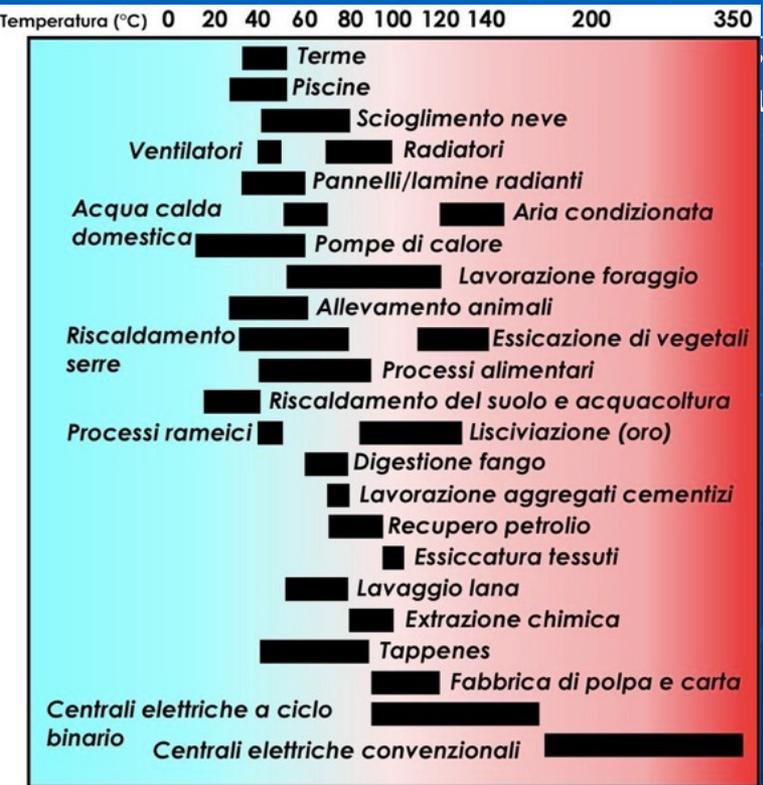
Mentre questo accadeva in Italia, anche in altri paesi si sviluppava l'utilizzazione industriale dell'energia geotermica: nel 1892 a Boise (Idaho, USA) veniva inaugurato il primo sistema di riscaldamento urbano; nel 1928 l'Islanda, un altro paese all'avanguardia nell'utilizzazione di questa fonte energetica in Europa, cominciò a sfruttare i fluidi geotermici, soprattutto acqua calda, per il riscaldamento di edifici.

# Utilizzazione delle risorse geotermiche

La produzione di elettricità è la forma di utilizzazione più importante delle risorse geotermiche ad alta temperatura (>150°C).

Le risorse a temperatura medio – bassa (<150°C) sono adatte a molti tipi di impiego.

Il classico diagramma di Lindal (Lindal, 1973), alle varie temperature, è sempre attuale (Figura generazione di elettricità con cicli binari).



geotermici  
unta della

Figura 10: diagramma con l'utilizzazione dei fluidi geotermici (derivato da Lindal, 1973).

I fluidi con temperatura inferiore a  $20^{\circ}\text{C}$  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  $150^{\circ}\text{C}$  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).



Figura 11: rappresentazione schematica di un impianto a contropressione per generazione di energia elettrica. 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. I

Il consumo specifico delle unità a condensazione è, tuttavia, circa la metà di quello delle unità a contropressione.

Attualmente sono molto diffusi impianti a condensazione della potenza di 55–60 MWe, ma recentemente sono state costruite ed installate anche unità da 110 MWe.

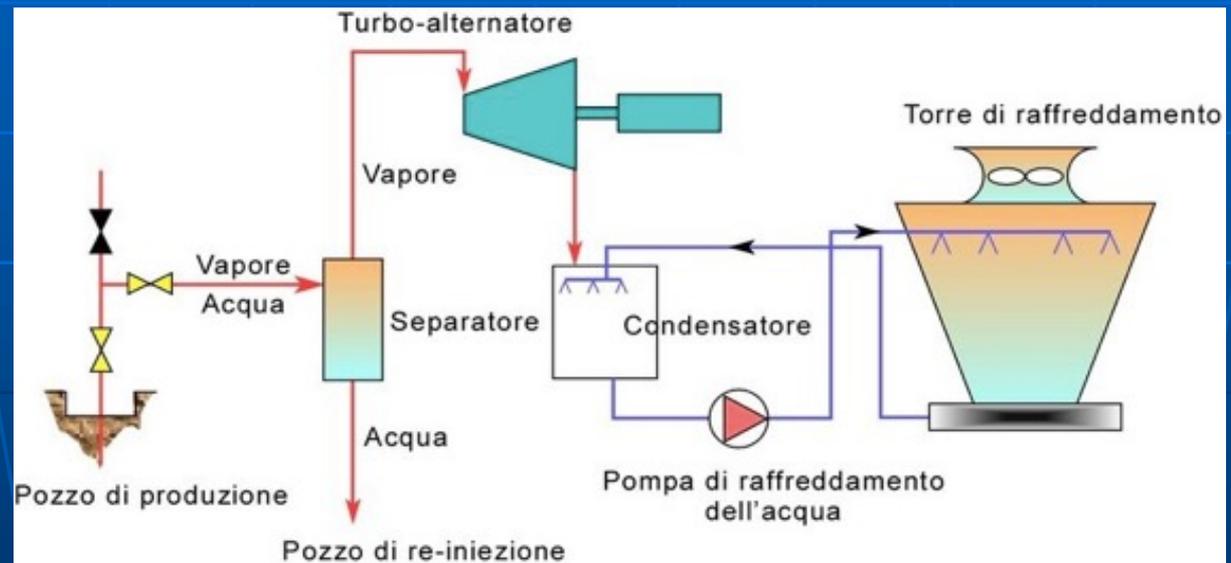
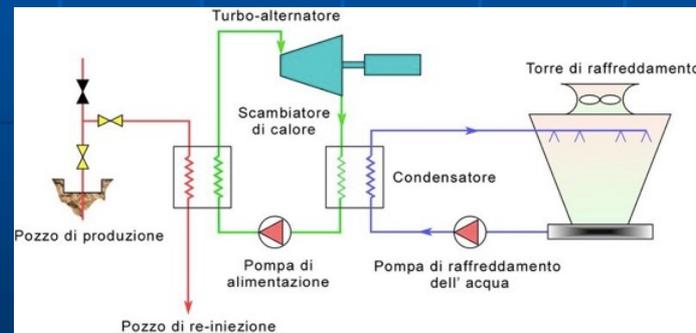


Figura 12: rappresentazione schematica di un impianto a condensazione per generazione di elettricità. In rosso il circuito del fluido geotermico, in blu il circuito di raffreddamento.

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.



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 kWe ed alcuni MWe.

Queste unità possono essere collegate l'una con l'altra in modo da formare impianti della potenza di qualche diecina 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 ammoniacca.

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.

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<sub>e</sub> 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 MWt, ma questa forma d'uso è molto diffusa anche in Europa Orientale, negli Stati Uniti, in Cina, Giappone, Francia, ecc.

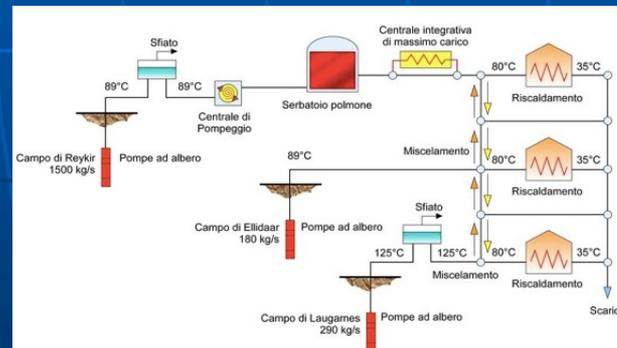


Figura 14: Schema semplificato del sistema di riscaldamento geotermico di un complesso di edifici a Reykjavik, Islanda (da Gudmundsson, 1988).

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  $0^{\circ}\text{C}$  (soprattutto condizionamento di ambienti e processi industriali), il ciclo usa bromuro di litio come assorbente ed acqua come refrigerante.

Per usi sotto  $0^{\circ}\text{C}$ , si adotta un ciclo ammoniac/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)



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 MWt.

Il maggior numero di impianti si trova negli Stati Uniti (500.000 impianti installati per un totale di 3730 MWt), in Svezia (200.000 per 2000 MWt), in Germania (40.000 per 560 MWt), in Canada (36.000 per 435 MWt), in Svizzera (25.000 per 440 MWt) e in Austria (23.000 per 275MWt) (Lund et al., 2003).

Per realizzare questi sistemi sono stati utilizzati terreni e masse idriche con temperature tra 5° e 30°C.

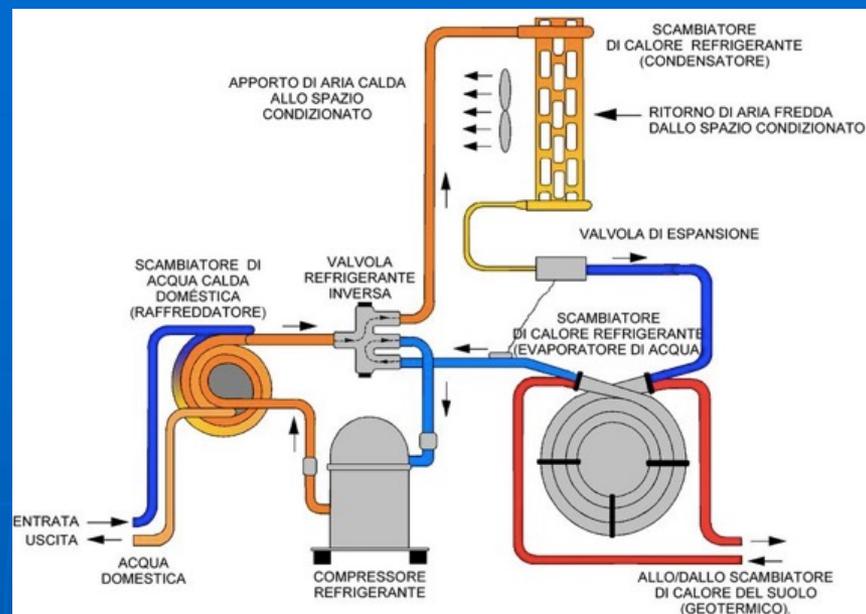


Figura 16: Schema di pompa di calore in posizione di riscaldamento (per cortesia del Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, USA).

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 e sulla quantità di luce, sulla concentrazione di CO<sub>2</sub> 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.

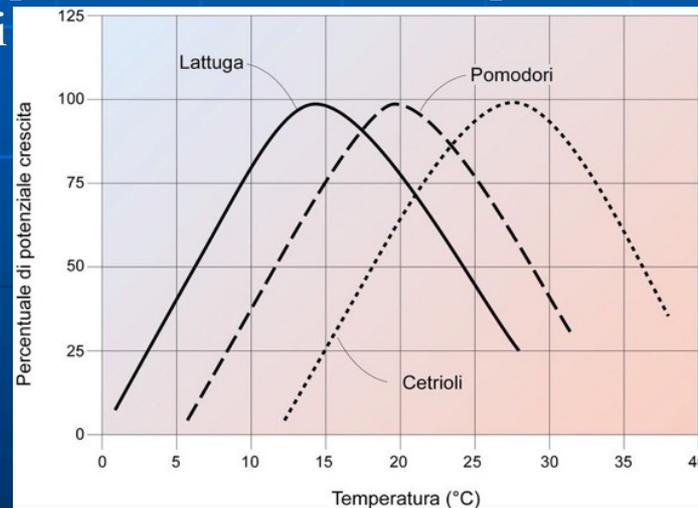


Figura 17: Curve di accrescimento di alcune verdure (da Beall e Samuels, 1971).

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.

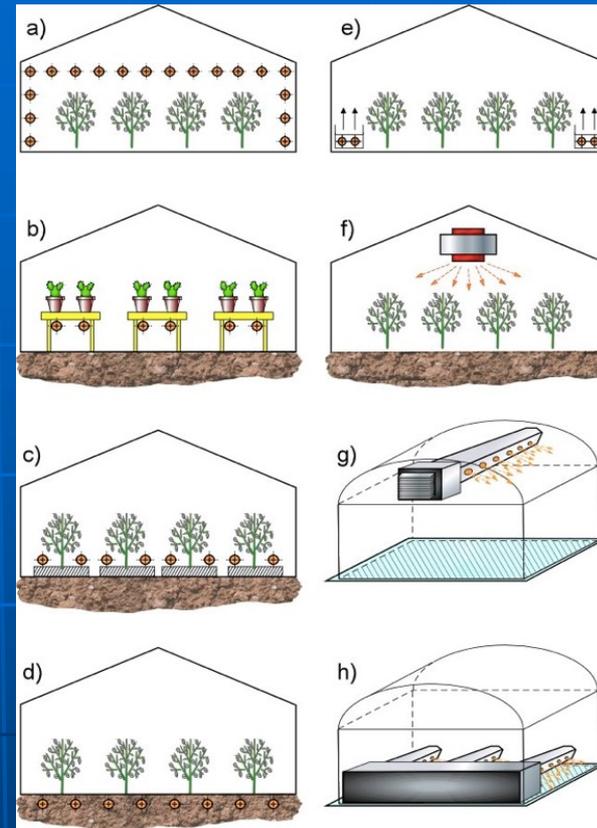


Figura 18: Sistemi di riscaldamento delle serre geotermiche. Riscaldamento a convezione naturale: (a) tubi sospesi, (b) pancali riscaldati, (c) tubi posizionali in basso. Riscaldamento, del terreno (d). Riscaldamento ad aria forzata: (e) convettori laterali, (f) ventilatori sospesi, (g) convettori posizionali in alto, (h) convettori posizionali in basso.

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.

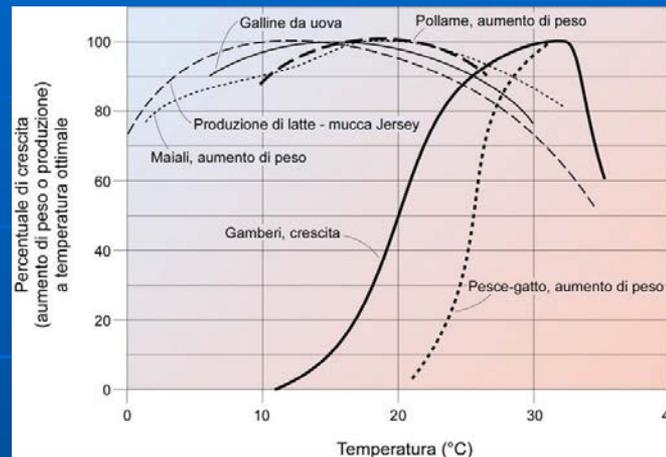


Figura 19: Effetti della variazione di temperatura sulla crescita e produzione animale.

In molti casi le acque geotermiche possono essere sfruttate convenientemente combinando l'allevamento di animali con il riscaldamento di 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.

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

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 CO<sub>2</sub>).

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.

Le diverse possibili forme di utilizzazione comprendono processi a caldo, evaporazione, essiccamento, distillazione, sterilizzazione, lavaggio, scongelamento 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 CO<sub>2</sub>, l'uso in lavanderia, l'essiccamento di terre diatomitiche, il trattamento della cellulosa e la produzione di borati e di acido bórico.

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<sub>2</sub>S 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.