

Energy from the Earth. From the energy era of fossil sources to a new energy model

Energia dalla Terra. Dall'era energetica delle fonti fossili a un nuovo modello energetico*

Michele Pipan

Abstract

Technological and industrial development in energy consumption have followed a parallel and rapid growth over the past two hundred years. Average per capita energy consumption is estimated to have approximately quadrupled over this period in industrialized countries. The growth in energy consumption has been supported by the use of fossil resources (coal and hydrocarbons) which represent a natural heritage bound to run out. The concern for the environmental effects of the fossil energy era goes together with the study and development of new energy models, based this time on renewable energy sources. The Earth is once again able to provide a solution to the problem, through geothermal heat. The technologies that have allowed the identification and use of fossil resources are the same as those that can foster the transition to the new model, exploiting an energy source internal to the planet but, this time, renewable.

Sviluppo tecnologico e industriale e crescita del consumo energetico hanno seguito un cammino parallelo e di rapida crescita negli ultimi duecento anni. Si stima che il consumo medio procapite di energia sia approssimativamente quadruplicato in questo periodo nei paesi industrializzati. La crescita dei consumi energetici è stata finora sostenuta dall'utilizzo di risorse fossili (carbone e idrocarburi) che rappresentano un patrimonio naturale destinato ad esaurirsi. La preoccupazione per le ricadute sull'ambiente dell'era energetica fossile si accompagna ora allo studio ed allo sviluppo di nuovi modelli energetici, basati questa volta su fonti rinnovabili. La Terra è ancora una volta in grado di fornire una soluzione al problema, attraverso il calore geotermico. Le tecnologie che hanno consentito l'individuazione e l'utilizzo delle risorse fossili sono le stesse che potranno consentire il passaggio al nuovo modello ed all'utilizzo di una fonte di energia interna al pianeta ma, questa volta, rinnovabile.

Keywords

Energy, fossil energy sources, geothermal heat, geophysics for energy

Energia, fonti energetiche fossili, calore geotermico, geofisica per l'energia

* Questo articolo è basato sulla Prolusione presentata il 26 marzo 2021, in occasione dell'inaugurazione dell'Anno Accademico 2021 dell'Università degli Studi di Trieste.

Nel 1937 Raoul Dufy realizza su commissione della *Compagnie parisienne de distribution d'électricité* un monumentale dipinto per promuovere quella forma di energia che, già da tempo uscita dai laboratori, ha iniziato a rivoluzionare la vita quotidiana dell'umanità. La "*Feé électricité*", a lungo il più grande dipinto mai realizzato con i suoi 600 m², è un'opera che esprime l'incanto di fronte ad un'espressione della natura e della scienza umana che si fa fatica a comprendere fino in fondo e che per questo si colora di magia: la "Fata" elettricità appunto. Una magia piena di promesse, di progresso, di benessere e di nuove scoperte, delle quali l'umanità ha sempre un grande bisogno, in particolare nel periodo che precede il secondo conflitto mondiale. Già da tempo – a partire dall'invenzione della lampadina e dalla diffusione dell'illuminazione elettrica a fine '800 – l'elettricità ha cominciato a modificare il tempo e lo spazio della vita dell'uomo.

La luce artificiale cambia i ritmi del lavoro e quindi della vita stessa, rendendola indipendente dal ciclo naturale. Gli edifici e l'ambiente urbano si modificano: dalle ampie vetrate a sviluppo verticale che, fin dalle cattedrali gotiche, cercano di catturare la luce naturale, si passa a costruzioni orizzontali ed a concentrazioni di edifici che possono svilupparsi liberamente senza tener conto della loro esposizione al sole. L'energia elettrica apre nuove prospettive che, all'inizio del secolo breve, sembrano virtualmente illimitate.

Meno di 40 anni dopo, la visione promessa ha già ceduto il passo a nuove preoccupazioni. La riflessione sulla scienza e sul progresso tecnologico a doppio taglio si è fatta strada a partire dalla terribile conclusione della guerra e, senza arrivare alle estreme conseguenze dei possibili utilizzi dell'energia nucleare, tocca ormai tutti i settori delle attività umane. La consapevolezza degli effetti collaterali della tecnologia e della possibilità dell'uomo di incidere sull'ambiente e sulla vita sul nostro pianeta cresce rapidamente. La fine del Proibizionismo negli Stati Uniti (1933), ad esempio, coincide con l'invenzione e la rapidissima diffusione di uno dei primi esempi di *disposable packaging*, la lattina di birra. Ma, al primo entusiasmo per l'affrancamento dalla catena del vetro – con la necessità di conservazione, gestione e pagamento delle spese del contenitore – subentra rapidamente l'osservazione della presenza di un nuovo rifiuto che non risparmia nemmeno i luoghi più incontaminati del Paese e nascono le prime associazioni ambientaliste (per ironia, una delle prime, Keep America Beautiful, viene finanziata proprio dagli stessi produttori di lattine, realizzando in questo modo uno dei primi esempi di *greenwashing*).

Aurelio Peccei, nella sua prefazione per lo studio che il Club di Roma commissiona al System Dynamics Group del MIT e che viene pubblicato nel 1972 col titolo *I limiti dello sviluppo*, fornisce una sintesi dei problemi legati alle nuove prospettive:

L'umanità non può continuare a proliferare a ritmo accelerato, considerando lo sviluppo materiale come scopo principale, senza scontrarsi con i limiti naturali del processo, di fronte ai quali essa può scegliere di imboccare nuove strade che le consentano di padroneggiare il futuro, o di accettare le conseguenze inevitabilmente più crudeli di uno sviluppo incontrollato.

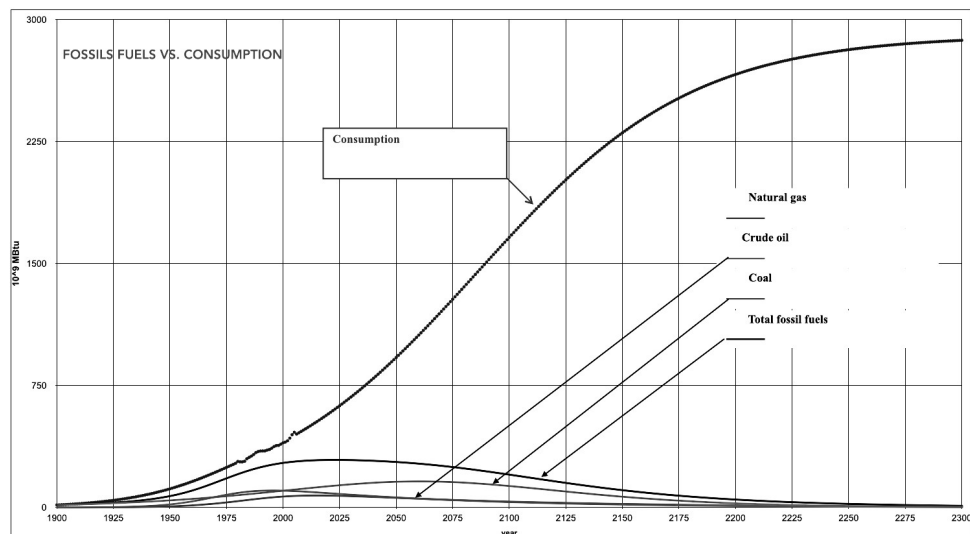
La proliferazione e l'accelerazione di cui parla Peccei sono da un lato quella demografica, oggetto di riflessione già a partire dal '700 (si veda, ad es., Malthus 1798), ma soprattutto quelle legate alla rivoluzione industriale ed all'avvento di una nuova era energetica e di una nuova fase dello sviluppo umano: la civiltà delle fonti fossili (Smil 2021). Il rapporto dell'uomo con l'energia – già profondamente mutato a partire dal XVII secolo, con le prime intuizioni sul possibile utilizzo del vapore per alimentare i macchinari – si trasforma radicalmente negli ultimi duecento anni circa andando ad assumere la forma che caratterizza il nostro presente: un modello di sviluppo che prevede una costante crescita e che è reso possibile da una combinazione di sviluppo tecnologico e parallelo saccheggio di risorse naturali. Il termine saccheggio non è un'esagerazione: alla radice della civiltà delle fonti fossili si trova il letterale saccheggio di un capitale del quale non stiamo consumando gli interessi ma la sostanza stessa. Un patrimonio che il nostro pianeta ha costruito nell'arco di ere geologiche che precedono di molto la comparsa dell'uomo sul pianeta, e che l'uomo sta dilapidando ad un ritmo vertiginoso e con una sottesa giustificazione che è quella del giocatore d'azzardo: spendo i miei soldi, ma uscirà il numero che mi ripagherà di quello che ho perso con gli interessi. Così l'Umanità consuma risorse fossili – che non si riformeranno nemmeno nell'arco di centinaia, migliaia di generazioni – nella speranza di uno sviluppo, di un avanzamento della tecnologia, che la affrancherà da ogni responsabilità e regalerà energia libera, pulita, illimitata, senza conseguenze.

Il tema della sostenibilità dello sviluppo, un tema ambizioso a fronte della impossibilità di uno sviluppo illimitato basato sulle risorse limitate che il pianeta può offrire, è al centro della riflessione generale ed alla base degli obiettivi globali fissati dalle Nazioni Unite per "...porre un termine alla povertà estrema, ridurre la disuguaglianza, e proteggere il pianeta entro il 2030".¹

Intrecciato in maniera indissolubile al tema della sostenibilità è quello dell'energia. Al numero 7 tra i 17 obiettivi di sviluppo sostenibile individuati dalle Nazioni Unite, essa sottende in realtà a tutti gli altri, con la sola eccezione forse della giustizia. Perfino la parità di genere (numero 5) affonda le sue radici in una suddivisione di compiti che, storicamente, è legata all'energia disponibile per effettuare determinati lavori e può essere raggiunta anche grazie a nuove tecnologie che implicano alti consumi energetici.

¹ Si veda <https://unfoundation.org/what-we-do/issues/sustainable-development-goals>.

FIGURA 1 – Rappresentazione della curva dei consumi e delle disponibilità di fonti di energia fossili nel periodo 1900-2300



Fonte: U.S. Energy Information Administration

L'energia, in sintesi, è il fattore che meglio può descrivere la peculiarità della nostra specie nel suo rapporto con l'ambiente, particolarmente negli ultimi duecento anni. Se infatti i bisogni essenziali dell'essere umano, in termini di aria, acqua e cibo, sono confrontabili con quelli delle altre specie e proporzionali alla consistenza numerica della popolazione, non c'è dubbio che in termini di energia quella umana sia una specie famelica e senza rivali, con tutte le conseguenze che ne derivano in termini di approvvigionamento e ricadute sull'ambiente e sulla salute del pianeta.

L'attenzione nei confronti dello sviluppo sostenibile è spesso concentrata sugli aspetti economici e sugli effetti delle attività umane sull'ambiente e sulle condizioni di salute e benessere. C'è tuttavia un punto di vista che riguarda la radice di questa era energetica e la possibile evoluzione dalle fonti fossili a quelle rinnovabili. Ed è il punto di vista delle Scienze della Terra.

La Terra, nelle sue componenti inanimate, rappresenta normalmente uno sfondo che conquista il primo piano principalmente in occasioni catastrofiche (terremoti, tsunami, eruzioni) oppure legate agli effetti su salute e condizioni ambientali di alcune

attività umane (ad esempio, l'inquinamento di suoli ed acque). La civiltà delle fonti fossili è tuttavia legata ad un'attività plurimillenaria dell'umanità, quella della coltivazione delle risorse del sottosuolo, che sulla Terra si fonda. Il termine "coltivazione" è proprio ma fuorviante. Lo associamo normalmente ad una pratica che comporta una rigenerazione dell'oggetto della coltivazione. E questo, nel caso del sottosuolo e su un arco di tempo confrontabile con la vita umana, può dirsi corretto solamente per due risorse: l'acqua ed il calore geotermico. Per tutte le altre risorse del sottosuolo è più corretto parlare di un'estrazione che rappresenta un processo irreversibile e incide sulla disponibilità di materiali che hanno richiesto, in alcuni casi, milioni di anni per formarsi: il carbone che estraiamo dal sottosuolo, ad esempio, si è formato circa 350 milioni di anni fa. Per altre risorse come minerali e terre rare, la cui importanza sta crescendo anche in relazione al passaggio a nuove fonti di energia, non si può parlare di una rigenerazione nemmeno su una scala di tempo geologica: la loro quantità è limitata e le possibilità di recuperarle dal sottosuolo sono legate alle tecnologie di individuazione ed estrazione. Come mostrato dalla Fig.1 più sopra, il rapporto tra consumi e disponibilità di fonti fossili è destinato a un progressivo e, secondo molte previsioni, accelerato incremento entro il 2050.²

La disponibilità di fonti fossili ha un andamento che dipende da diversi fattori ma che presenta, per ogni risorsa, una crescita, un picco e un declino. Per gli idrocarburi, in particolare per il petrolio, il picco ha trovato una definizione, una previsione ed un nome già nel 1956, quando un geofisico, M.K. Hubbert, presenta la sua teoria ad un Convegno dell'*American Petroleum Institute* (Hubbert 1956). Si tratta di una teoria che si basa in realtà su modelli di previsione della produzione riferibili a qualsiasi risorsa esauribile: la previsione iniziale di Hubbert per la produzione di petrolio negli Stati Uniti colloca il picco intorno agli anni '70 e viene inizialmente confermata dai fatti. In effetti, gli USA raggiungono un picco di produzione di petrolio intorno a 1.620.000 m³/giorno negli anni '70 ed assistono successivamente ad un progressivo declino. La scoperta e lo sfruttamento di estese risorse non-convenzionali, principalmente *shale oil* e *shale gas*, portano ad una vera rivoluzione e ad un'inversione di tendenza. La produzione riprende a salire e nel 2017 supera nuovamente il picco degli anni '70.

Le previsioni di Hubbert rispetto alla posizione nel tempo sono state ripetutamente smentite, ma il declino della produzione rimane un fatto inevitabile ed il suo inizio è semplicemente stato ritardato da nuove tecnologie di esplorazione ed estrazione che non erano prevedibili all'epoca della formulazione della teoria. Probabile, se non inevitabile, appare anche la crescita dei consumi energetici, legata non solo

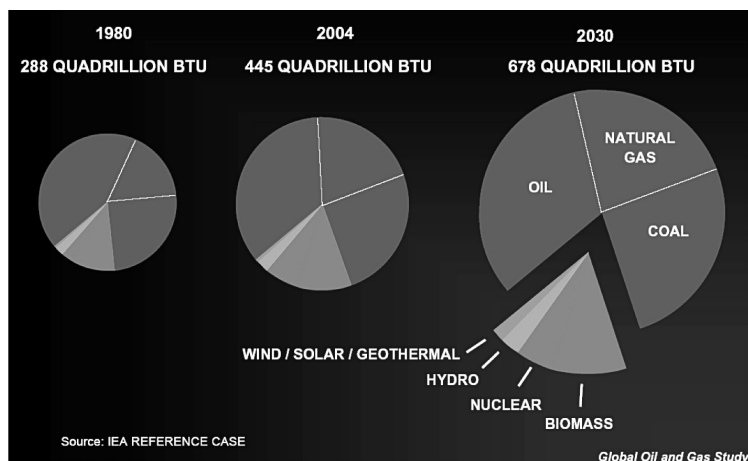
² Si vedano ad es. i *World Energy Outlook* e *International Energy Outlook*, rispettivamente della *International Energy Agency* (IEA) e della *U.S. Energy Information Administration* (EIA).

all'incremento demografico ma anche all'obiettivo di fornire elettricità e possibilità di cucinare con fonti pulite alla consistente frazione della popolazione mondiale che ne è sprovvista (le stime attuali sono rispettivamente di 785 milioni e 2,6 miliardi di persone, fonte IEA).

Spostando l'attenzione dai consumi e dalle disponibilità di fonti energetiche fossili agli effetti del loro utilizzo si ottengono indicazioni che implicano una riduzione indipendente dalla loro abbondanza.

Nel suo rapporto *Net Zero by 2050* (IEA 2021), l'*International Energy Agency* indica la strada per raggiungere l'ambizioso obiettivo di azzerare le emissioni e contenere la crescita della temperatura media globale ad 1.5° C entro il 2050. Un percorso che dovrebbe portare ad un tramonto dell'era energetica fossile e ad un panorama energetico dominato dalle fonti rinnovabili. Disponibilità di risorse e necessità di contenimento degli effetti sull'ambiente convergono quindi nell'indicare un'evoluzione verso una nuova era energetica. La recente evoluzione del bilancio energetico globale e le proiezioni al 2030 sulla base dello *Stated Policies Scenario*³ indicano tuttavia un quadro ancora fortemente dominato dalle risorse fossili, come mostrato più sotto dalla Fig. 2.

FIGURA 2 – Dati storici e proiezione del bilancio energetico globale



FONTE: International Energy Agency

³ “The Stated Policies Scenario reflects the impact of existing policy frameworks and today’s announced policy intentions. The aim is to hold up a mirror to the plans of today’s policy makers and illustrate their consequences for energy use, emissions and energy security” (Fonte IEA).

Nella necessaria transizione verso una nuova fase, la quota attualmente minoritaria di fonti alternative è destinata a crescere e, nella proiezione del rapporto *Net Zero Emissions*, circa il 70% del fabbisogno di elettricità dovrebbe essere coperto da fotovoltaico ed eolico. La complessità di questo percorso è legata a molteplici fattori: almeno tre di questi meritano una speciale attenzione per le possibili ricadute sull'ambiente.

Il primo è l'intermittenza delle fonti eoliche e solari: nell'utilizzo per la generazione di elettricità, l'irregolarità di erogazione non garantisce la copertura del carico di base e il picco di domanda⁴ che, nei Paesi europei, si verifica di norma di notte nella stagione invernale a meno di soluzioni di accumulo che, con le tecnologie attuali, hanno costi ed impatti ambientali elevati.

Il secondo è legato alle materie prime richieste per la transizione: impianti e soluzioni per l'accumulo richiedono l'impiego di materiali ancora una volta non illimitatamente disponibili. La stessa International Energy Agency, oltre a rilevare la crescita dei costi di materie prime che giocano un ruolo fondamentale nella transizione energetica, come ad es. il litio ed il cobalto, sottolinea che le forniture attese sulla base delle miniere esistenti ed in via di realizzazione potrebbero coprire circa la metà del fabbisogno al 2030, nell'ipotesi di uno scenario compatibile con gli obiettivi di mitigazione del cambiamento climatico. A questo si aggiunge l'irregolare distribuzione geografica dei giacimenti e quindi la necessità di considerare i problemi geopolitici legati alla dipendenza da risorse disponibili in limitate aree del pianeta.

Il terzo è l'impatto climatico dei nuovi sistemi, misurato sull'intero ciclo di vita: al di là dell'energia, dell'emissione di CO₂ e dei materiali che ogni impianto richiede per la realizzazione, la gestione e la rimozione/sostituzione a fine ciclo, va considerato anche l'impatto durante il funzionamento. I sistemi eolici, ad esempio, hanno un impatto sulla circolazione del vento e quindi sulla temperatura e l'umidità nelle zone dove vengono installati (vedasi Miller e Keith 2018). I sistemi di accumulo hanno ricadute variabili in funzione della tecnologia applicata (si veda a questo proposito lo studio realizzato dall'Università della California, lo stato che detiene al momento la leadership nella transizione verso le fonti rinnovabili (Intrator et al. 2011).

La transizione sarà quindi condizionata, nei tempi e nei modi, da fattori che disegnano un quadro composto, inevitabilmente, da soluzioni molteplici che devono integrarsi per costruire il nuovo modello energetico. È interessante osservare, a proposito delle soluzioni integrate, il fatto che una delle analisi più autorevoli, la già citata *Net Zero by 2050* della IEA, preveda in ogni caso una quota del bilancio energetico a carico

⁴ Il carico di base rappresenta la potenza minima che è necessario fornire in modo continuo al sistema elettrico. Il picco di carico si riferisce al periodo in cui il consumo di elettricità, e quindi la richiesta di potenza elettrica alla rete, sono più elevati.

del nucleare. Una quota che, per inciso, potrebbe subire delle variazioni sostanziali nel caso di nuovi avanzamenti tecnologici, come quelli legati alla fusione nucleare. Questa quota è principalmente legata al problema dell'intermittenza e della necessità di garantire, da un lato, una potenza minima continua nel tempo, dall'altro, la capacità di soddisfare le oscillazioni ed i picchi della domanda energetica.

Su questo punto si apre nuovamente una finestra di analisi rivolta verso l'interno della Terra ma non nella direzione delle risorse fossili. Il nostro sguardo in questa direzione può essere guidato da una brevissima storia del cammino dell'umanità nell'utilizzo delle risorse del sottosuolo.

L'inizio è antico e, per quanto concerne i combustibili fossili, legato alle manifestazioni superficiali. I fuochi perpetui di Yanat Dagar (Azerbaijan) alimentati da gas naturale o le pozze superficiali di petrolio, presenti anche sui fondali marini, ne sono esempio ed il loro utilizzo è documentato fin dai tempi dei Neanderthal, circa 70.000 anni fa. A partire dal III sec. a.C. inizia, sotto la dinastia Han in Cina, l'applicazione delle tecniche di perforazione, lo strumento fondamentale che l'uomo utilizza per attingere alle risorse naturali del sottosuolo. In quel periodo è documentata la perforazione di pozzi profondi fino a 600 m per obiettivi minerari. Ma la proliferazione delle perforazioni del sottosuolo parte con la rivoluzione industriale e, dalla metà del XIX secolo, assiste ad uno stabile sviluppo non solo numerico ma anche tecnologico. In questo momento (maggio 2021) sono attivi nei soli USA oltre 400 gruppi di perforazione che servono a raggiungere nuovi giacimenti di idrocarburi (o nuove posizioni di estrazione in giacimenti già sfruttati) a costi che si aggirano intorno alle decine di milioni di dollari per il completamento di un singolo pozzo. Questa grande attività e questo flusso di capitali servono ad alimentare il fabbisogno di risorse fossili precedentemente descritto. Un fabbisogno che non è legato al solo consumo energetico ma ai tanti settori che dipendono dagli idrocarburi come materia prima (tra i tanti, basti ricordare la produzione di plastica e di lubrificanti). Ai ritmi di consumo attuale, se il mondo dovesse dipendere da un singolo giacimento – e questo fosse un cosiddetto “gigante”, cioè un giacimento con un volume di petrolio recuperabile di almeno 500 milioni di barili – le risorse basterebbero per sei giorni. E il ritmo delle scoperte di giacimenti di queste proporzioni sta stabilmente rallentando, come conseguenza diretta del progressivo esaurimento delle risorse.

Ma il sottosuolo non contiene solamente idrocarburi e le tecnologie di perforazione saranno sempre più destinate nel futuro a servire la coltivazione di risorse fondamentali come acqua, minerali e calore geotermico. Se l'acqua rappresenta un'ovvia e fondamentale componente per la sopravvivenza ed i minerali un necessario elemento della transizione verso il nuovo modello energetico, qual è il significato e la posizione del calore geotermico? L'origine di questa forma di energia è legata alla formazione del pianeta ed al decadimento degli isotopi radioattivi nella crosta terrestre.

Il termine compare raramente nei dibattiti sul futuro energetico e perfino nei rapporti delle agenzie ufficiali come la IEA. In Italia esso dovrebbe essere più familiare, in conseguenza della stessa natura geologica del nostro Paese, ricco di risorse idrotermali e province vulcaniche, e del fatto che l'Italia è stato il primo paese al mondo ad utilizzarlo per generare elettricità.

È il 4 luglio 1904, infatti, quando Piero Ginori Conti accende cinque lampadine con un generatore alimentato dal calore geotermico. Per la prima volta nella storia, l'uomo genera elettricità dalle risorse rinnovabili provenienti dall'interno della terra. Pochi anni dopo, nel 1911, nasce la prima centrale elettrica geotermica al mondo (che rimarrà l'unica per diversi decenni) e Larderello diventa il centro della geotermia mondiale. A partire dalla fine della seconda guerra mondiale la generazione di elettricità con centrali geotermiche cresce stabilmente e porta ad una produzione di elettricità di circa 95.000 GWh nel 2020 e ad una previsione di potenza installata nel 2025 di circa 19 MW a livello globale (Huttrer 2020).

All'inizio degli anni 2000, il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti commissiona al MIT uno studio sulla possibilità di utilizzo dell'energia geotermica per sostituire le quote fornite dalle centrali a carbone e dagli impianti nucleari destinati alla chiusura entro i primi 40 anni del secolo. Il risultato dello studio è un documento (MIT 2006) che espone le analisi effettuate da un gruppo interdisciplinare e mette a fuoco molti dei problemi legati alla transizione energetica, tra i quali quelli legati alla necessità di allargare e diversificare il ventaglio delle fonti che dovranno subentrare a quelle fossili.

Lo studio individua nella geotermia una possibile soluzione che, con tecnologie avanzate sia sul fronte degli impianti che della gestione delle risorse geotermiche, potrà sostituire gli impianti basati su risorse fossili o su tecnologie nucleari.

L'*Executive Summary* solleva due questioni che, pur riferite al caso degli Stati Uniti, hanno in realtà una validità su scala globale:

Geothermal energy [...] represents a large, indigenous resource that can provide base-load electric power and heat at a level that can have a major impact on the United States, while incurring minimal environmental impacts;

e

In spite of its enormous potential, the geothermal option for the United States has been largely ignored.

In sintesi, l'energia geotermica ha un potenziale enorme, un impatto ambientale minimo ma viene sostanzialmente ignorata o sottostimata nelle proiezioni sull'evoluzione dell'approvvigionamento energetico. Un fatto che si può verificare in molte analisi a

livello globale (ad iniziare da quelle fornite dalla IEA), nonostante l'energia geotermica sia stata utilizzata in molti Paesi per oltre un secolo per fornire elettricità e, probabilmente, per centinaia di migliaia di anni per l'uso più semplice che possiamo immaginare: l'acqua calda. L'utilizzo diretto del calore geotermico attraverso il suo principale vettore, l'acqua calda appunto, è probabilmente uno degli esempi più antichi del rapporto dell'uomo con fonti di energia. È molto probabile che le comunità insediate nella valle dell'Afar (Etiopia), tra le più antiche finora individuate, siano entrate in contatto ed abbiano fatto uso delle sorgenti termali che abbondano in quella regione. Oggi quel calore viene utilizzato per un amplissimo spettro di usi diretti che comprende settori come l'agricoltura ed i processi di elaborazione di prodotti alimentari.

Nella prospettiva di una transizione ad una nuova era energetica basata su fonti rinnovabili, l'interno del nostro pianeta può offrire ancora una volta una soluzione, nella forma di una fonte virtualmente inesauribile ed illimitata come il calore geotermico. Per dare un'idea dell'entità di questa risorsa, possiamo considerare che il flusso di calore superficiale medio terrestre si aggira intorno a 87 kW/km^2 e che il nostro pianeta rilascia quindi in un anno una quantità di energia pari a circa 33 miliardi di TEP, cioè tre volte il fabbisogno di energia primaria globale (Manzella e Ungarelli 2011).⁵

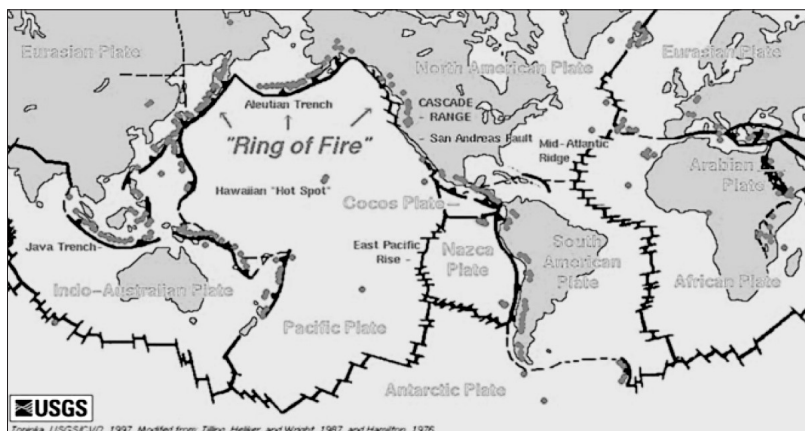
È opportuno osservare che questo flusso non è uniformemente distribuito. Le zone con elevato flusso di calore dove troviamo le risorse geotermiche cosiddette ad alta entalpia sono distribuite in maniera molto irregolare sulla superficie del pianeta. Si tratta in genere di zone vulcaniche o aree dove i processi tettonici portano ad assottigliamenti della crosta terrestre o a risalite di magma all'interno della crosta stessa. In queste regioni troviamo le condizioni più favorevoli per l'utilizzo del calore geotermico ai fini della generazione di elettricità.

L'utilizzo del calore geotermico per la generazione di elettricità richiede l'uso di tecnologie e conoscenze che coincidono in larga misura con quelle impiegate per l'individuazione delle risorse fossili. Si tratta in entrambi i casi di risorse distribuite in maniera irregolare, in regioni del sottosuolo la cui posizione è sconosciuta e che è necessario in primis individuare, stimare ed eventualmente raggiungere ed estrarre attraverso perforazioni.

Il relativo bagaglio di strumenti scientifici e tecnologici, sviluppato principalmente a partire dall'avvio della rivoluzione industriale, rappresenta un settore della scienza che ha prodotto, negli ultimi due secoli, degli straordinari avanzamenti delle conoscenze sulla natura e sul pianeta. Raramente viene tuttavia considerato quando si par-

⁵ La quantità di energia per unità di tempo ed unità di superficie è espressa in kW/km^2 . TEP sta per Tonnellata Equivalente di Petrolio, è un'unità di misura dell'energia che rappresenta la quantità di energia rilasciata dalla combustione di una tonnellata di petrolio grezzo e vale circa 42 GJ.

FIGURA 3 – Mappa dei margini di placca, delle province vulcaniche, dell'“Anello di Fuoco”



Fonte: adattamento da Topinka 1997

la di energia e ancor meno nella vita quotidiana, quando la disponibilità, ad esempio, di carburante per le nostre auto, viene data per scontata.

Esiste un termine, in uso nel settore della perforazione, che rappresenta bene il grado di alea che si affronta nel tentare di raggiungere una risorsa nel sottosuolo procedendo con perforazioni a caso, cioè disponendo di scarse informazioni sulle caratteristiche del sottosuolo stesso: *wildcat well*, pozzo gatto selvatico, in una traduzione letterale. L'associazione con un animale difficile da incontrare e potenzialmente pericoloso rappresenta bene i due aspetti fondamentali della procedura di perforazione casuale: la probabilità di raggiungere l'obiettivo è molto bassa ed i rischi sono elevati. Rischio finanziario, nel caso di insuccesso la perdita dell'investimento è totale (e può essere nell'ordine delle decine di milioni di euro) ma, soprattutto, rischio per l'ambiente e per l'uomo. La perforazione, necessaria per l'estrazione, non è uno strumento conoscitivo o, almeno, lo è in misura molto ridotta: un pozzo fornisce un'informazione limitata a una zona arealmente molto ristretta ed estesa in profondità ad un limite massimo di circa 12 km, raggiunto una sola volta e con notevoli difficoltà nell'ambito di un progetto scientifico (il *Kola Super Deep Borehole*, in Russia). Ma le normali perforazioni per la coltivazione di risorse naturali si fermano molto prima, intorno ai 5-6 km, una pellicola molto sottile se confrontata con gli oltre 6370 km del raggio terrestre.

Se le conoscenze sull'interno del pianeta dovessero dipendere dai dati dei pozzi perforati fino ad oggi, la nostra sarebbe una conoscenza frammentaria e talmente incompleta da impedire la comprensione di aspetti fondamentali della struttura, delle caratteristiche fisiche e composizionali e dell'evoluzione della Terra.

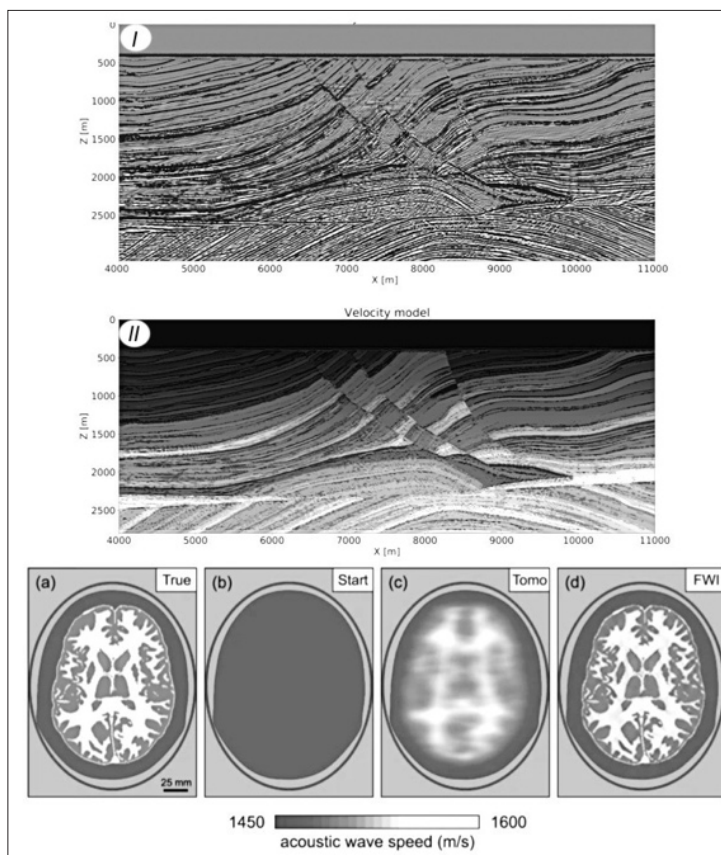
La scienza che ha reso possibile lo studio dell'interno della Terra e l'era energetica delle fonti fossili è la geofisica. Ed è ancora la geofisica che può aprire la strada verso un futuro energetico che faccia uso delle immense riserve di calore del nostro pianeta. L'esplorazione del sottosuolo con i metodi della fisica, non limitata in realtà all'interno del nostro pianeta, rappresenta uno dei progressi dell'indagine scientifica che hanno consentito di realizzare uno dei sogni dell'umanità: esplorare l'interno della Terra, come immaginava Jules Verne, acquisendo un patrimonio di conoscenze che, nel campo dell'energia, sono essenziali per individuare e coltivare le fonti che il pianeta può offrire.

Lo studio geofisico del sottosuolo ha le stesse radici matematiche e fisiche dei metodi impiegati nella diagnostica medica non invasiva, pur utilizzando strumenti diversi.

La geofisica osserva e misura campi naturali come quello magnetico o quello gravitazionale, oppure utilizza onde, campi elettromagnetici, correnti elettriche, di origine naturale o artificiale, per ricostruire strutture, caratteristiche dei materiali e processi in corso all'interno della Terra, dai pochi millimetri richiesti per la comprensione delle caratteristiche dei suoli alle centinaia e migliaia di chilometri richieste dagli studi scientifici sulla struttura profonda del pianeta.

La grande complessità del problema ha portato ad avanzamenti scientifici e tecnologici in molti campi, uno tra tutti quello del calcolo scientifico. Per esplorare l'interno della Terra abbiamo bisogno di metodi computazionali, strumenti e potenze di calcolo enormi, e solo i sistemi attualmente disponibili cominciano ad avvicinarsi ai livelli richiesti per la soluzione di molti problemi geofisici. Lo sviluppo delle tecniche di Intelligenza Artificiale sta aprendo nuove strade per l'analisi e l'elaborazione delle grandi quantità di dati (frequentemente nell'ordine dei Petabyte (PB) cioè 10^{15} byte) che gli esperimenti geofisici possono produrre e per una loro interpretazione integrata, basata cioè sul confronto e sulla correlazione di volumi di informazioni la cui esplorazione è al di fuori della portata dell'essere umano. Si comincia a parlare di un'“illuminazione intelligente” della Terra, cioè della possibilità di utilizzare tecniche di Intelligenza Artificiale e, in particolare, il Machine Learning, per spingere le nostre conoscenze sull'interno del pianeta al di là di nuove e finora invalicabili frontiere. È interessante osservare come lo sviluppo dei metodi e delle tecnologie in campo geofisico, con un processo di fertilizzazione incrociata che nelle scienze può portare ad avanzamenti inattesi in settori diversi, abbia riflessi su campi come la previsione delle catastrofi, l'analisi finanziaria, l'elaborazione del suono in campo musicale e quello scientificamente contiguo, come ricordavamo poco sopra, dell'*imaging* biomedico.

FIGURA 4 – Esempio di applicazione di tecniche geofisiche avanzate per lo studio del sottosuolo e del cervello umano



FONTE: per il sottosuolo, I e II da Roncoroni et al. 2021, in corso di pubblicazione; per il cervello umano, (a, b, c, d) da Guasch et al. 2020

Sul fronte dell'energia si stima che la combinazione degli sviluppi tecnologici per l'esplorazione del sottosuolo attraverso un' "illuminazione intelligente" e di quelli per la generazione di elettricità dal calore geotermico potrà portare dagli attuali 10 GW di potenza installata a possibili 140 GW, rendendo 39 Paesi totalmente indipendenti da altre risorse per la produzione di elettricità, con un risparmio atteso nelle emissioni nell'ordine del miliardo di tonnellate di CO₂/anno e la possibilità di servire comunità remote e lontane dalle reti di distribuzione.

Risorse naturali come il calore geotermico e nuove tecnologie per la loro coltivazione, questa volta nel senso stretto di un loro utilizzo sostenibile e rispettoso dei tempi naturali, potranno fornire la chiave per l'uscita dall'era delle fonti fossili.

La possibile transizione verso un futuro che faccia uso anche delle immense riserve di calore del nostro pianeta per soddisfare i crescenti bisogni di energia dovrà necessariamente fondarsi anche sullo sviluppo e sull'applicazione di nuove tecnologie e sull'estensione delle conoscenze sull'interno del pianeta che queste potranno produrre. Un progresso scientifico che, come annotava Peccei, dovrà essere accompagnato ad una visione che si allarghi a comprendere i limiti degli attuali modelli di sviluppo per poter padroneggiare l'evoluzione verso una nuova era energetica.

Bibliografia

Armaroli, N. e V. Balzani

2017 *Energia per l'astronave Terra. L'era delle rinnovabili*, Zanichelli, Bologna.

Guasch, L., O. Calderón Agudo, M. Tang et al.

2020 Full-waveform inversion imaging of the human brain. *npj Digit. Med.* 3, 28 <https://doi.org/10.1038/s41746-020-0240-8>

Hubbert, M.K.

1956 Nuclear Energy and the Fossil Fuels, Spring Meeting of the Southern District, American Petroleum Institute, San Antonio, Texas (<http://www.hubbertpeak.com/hubbert/1956/1956.pdf>)

Huttrer, G.W.

2020, 'Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report', *Proceedings World Geothermal Congress*, Reykjavik, Islanda.

IEA

2021 Net zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector, [iea.li/nzeromap](https://www.iea.org/net-zero)

International Geothermal Association

2018 Geothermal Quick Guide (<https://www.geothermal-energy.org/explore/what-is-geothermal/>)

Intrator, J., E. Elkind, S. Weissman, M. Sawchuk, E. Bartlett, A.R. Abele, B.S. Dunn, T.C. Tsao, R. Blaik, C. Lim, D. Luong, L. Smith, B. Washom

2020 *Strategic Analysis of Energy Storage in California*, California Energy Commission final project report CEC-500-2011-047

Jaffe, R.L. e W. Taylor

2018 *The Physics of Energy*, Cambridge, Cambridge University Press.

Lacey, S.

2007 *Scaling Geothermal for Reliable Baseload Power*, Renewable Energy World

Malthus, T.R.

1798 *An Essay on the Principle of Population*, Londra, J. Johnson.

Manzella, A. e C. Ungarelli

2011 *La geotermia. L'energia sotto i nostri piedi*, Bologna, Il Mulino.

Meadows, D.H., D.L. Meadows, J. Randers, W.W. Behrens III

1972 *I limiti dello sviluppo. Rapporto del System Dynamics Group Massachusetts Institute of Technology (MIT) per il progetto del Club di Roma sui dilemmi dell'umanità*, Milano, Biblioteca della EST Edizioni Scientifiche e Tecniche Mondadori.

Miller, L.M. e D.W. Keith

2018 'Climatic Impacts of Wind Power', *Joule*, 2, 12, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.09.009>

MIT

2006 The Future of Geothermal Energy, (<http://geothermal.inel.gov> e http://www1.eere.energy.gov/geothermal/egs_technology.html)

Roncoroni, G., E. Forte, L. Bortolussi, e M. Pipan

2021 'Efficient extraction of seismic horizons with Deep Learning', *Computers & Geosciences* (in corso di pubblicazione)

Smil, V.

2021 *Energia e civiltà. Una storia*, Milano, Ulrico Hoepli Editore.

Topinka, L.

1997 USGS/CVO, (<https://www.usgs.gov/products/maps/map-topics/geology>)

Sitografia

<https://www.iea.org>

<https://www.eia.gov>

<https://www.geothermal-energy.org>

About the Author

Michele Pipan is Full Professor of Exploration Geophysics and coordinator of the Exploration Geophysics Group at University of Trieste. His research activity is in the field of geophysical methods for subsurface studies with particular reference to Seismic and Ground Penetrating Radar (GPR) methods. Among the main sectors of applications: geology, archaeology, engineering, environment, natural resources and hazards, non-destructive testing. He is author of more than 100 scientific papers and proponent, scientific responsible and coordinator of several national and international scientific projects and geophysical expeditions (to Egypt, Israel, Peru, Kazakhstan, Russia, Antarctica).

MICHELE PIPAN

Department of Mathematics and Geosciences, University of Trieste, Piazzale Europa 1 Trieste, 34127, Italy

e-mail: pipan@units.it