



Sergio Carrà
Politecnico di Milano

ALCUNI PENSIERI AI MARGINI DI UNA CRISI INCOMBENTE

Le moderne economie sono basate sul carbonio poiché l'esaurimento dei combustibili fossili, in particolare il petrolio, creerebbe nell'attuale società industriale una crisi molto grave. Questo importante, ed inquietante, tema costituisce l'oggetto di indagini e speculazioni riguardanti da un lato su quale sia l'ammontare di risorse idrocarburiche ancora presenti sul pianeta, dall'altro su quali siano le fonti ad essi veramente alternative che li possano avvicendare. Questi problemi devono comunque essere affrontati con uno sguardo disincantato sulle possibili innovazioni, perché avranno successo solo se saranno in grado di introdurre una profonda rivoluzione tecnologica e culturale nella società umana.

L'incerto avvenire

Spesso le discussioni sulle opzioni energetiche mi ricordano quei commensali che, pur essendo sazi perché hanno consumato un lauto pranzo, discutono sul menù del giorno successivo paventando il timore che esso non possa avere luogo. Giusto, perché del “*doman non v'è certezza*”, recitava il magnifico Lorenzo de' Medici.

In realtà sino ad ora la nostra società non ha mai sofferto di una vera crisi energetica, poiché le carenze di energia che si manifestano in particolari situazioni sono dovute a fattori geopolitici o ad inadeguatezza delle infrastrutture. Sul piano economico l'elevato costo dell'energia che affligge i Paesi che ne fanno ampio uso è dovuto in gran parte al fatto che essa offre il modo più diretto per rimpinguare le casse statali. Il timore della carenza di risorse è probabilmente ancestrale tanto che già nella preistoria si riteneva che la selce, impiegata per costruire utensili da taglio con scopi non sempre pacifici, fosse prossima all'esaurimento. Nella cultura ufficiale è affiorato alla fine del Settecento con gli scritti di Malthus, ma solo nella seconda metà del secolo

scorso il problema dell'accessibilità delle risorse naturali è stato affrontato mediante un complesso modello matematico i cui risultati hanno suscitato scalpore. Infatti metteva in evidenza che lo sfruttamento delle risorse naturali avrebbe avuto conseguenze nefaste sull'avvenire della società umana destinata ad una catastrofe che sarebbe iniziata attorno al 2001 [1].

Con sollievo possiamo constatare che la previsione non si è verificata, anche se da parte di alcuni si sostiene che il collasso è solo rimandato, e con spirito più costruttivo, se così si può dire di chi auspica catastrofi, ritengono che sia maturato il tempo di rispolverare il menzionato modello per ottenere risposte più affidabili sulla data dell'inizio del collasso. Tutto ciò partendo dalla constatazione che quando è stata condotta la simulazione le informazioni accessibili erano povere ed incorrette e venivano gestite da calcolatori vetusti rispetto a quelli di cui oggi disponiamo. In realtà accurate analisi sembrano dimostrare che tale modello matematico invece che offrire uno strumento scientifico abbia generato diverse occasioni di polemica [2]. Pertanto la spe-

ranza che si rivelasse utile per un cambiamento politico non si è verificata. Personalmente sono scettico sull'utilità questo tipo di approccio poiché la struttura del modello impiegato incorpora la presenza di un giorno del giudizio, con l'unica libertà di determinarne la data, sia pure con le incertezze che si incontrano nel fare previsioni "sul futuro". In sostanza non vengono offerte scappatoie.

Si tratta di una situazione simile ad una tragedia greca nella quale i personaggi ci coinvolgono anche se siamo consapevoli che un destino ineluttabile li renderà vittime di una fine violenta. Forse è più opportuno chiedersi se esistono alternative in grado di affrancare la società umana da tale cupo determinismo ponendo al centro dell'analisi le vicissitudini dell'energia, che sin dalla preistoria ha giocato un ruolo determinante di ogni sviluppo.

Il picco della discordia

Nel 2001 sull'*Annual Energy Review* si affermava che *"Le moderne economie industriali sono basate sul carbonio e la loro attività principale è la combustione"*. Attualmente i combustibili fossili, inclusi di gas naturale, petrolio e carbone, forniscono circa l'85% dell'energia impiegata a livello mondiale. Malgrado i reiterati appelli sul suo avviamento con altre fonti energetiche, in particolare rinnovabili, il greggio mantiene la sua egemonia sulla produzione di energia ed è diventato indispensabile per ogni attività umana. Un'interruzione anche temporanea del suo rifornimento avrebbe significative conseguenze sul nostro grado di benessere. Il giornalista americano Paul Roberts, che ha affrontato il problema con impegno, non esita a scrivere che *"L'esaurimento del petrolio porrà la società industriale di fronte ad una delle più gravi crisi della sua storia"* [3].

Le esequie sulla disponibilità del greggio hanno avuto come cerimoniere King Hubbert, un geologo americano, autore di un modello statistico in grado di valutare il massimo, o picco, di estrazione del petrolio da un pozzo. Esso corrisponde ad una quantità rimanente nel sottosuolo pari al 50% di quella presente nel momento in cui sono iniziate le estrazioni. Chiamata URR (*Ultimate Recoverable Resources*) rappresenta il petrolio grezzo ancora estraibile prima di rimanere a secco. L'approccio gli ha permesso di prevedere correttamente il valore dei pozzi statunitensi; esteso alla valutazione aggregata delle risorse mondiali di petrolio ha indicato che l'anno del picco avrebbe dovuto cadere prima della fine del secolo scorso. Le valutazioni di Hubbert vennero perfezionate dai suoi epigoni, che misero però in evidenza come in base alle informazioni via via acquisite il suo valore continuasse ad aumentare, per cui l'anno del picco diventava un bersaglio mobile verso l'alto. Le previsioni più recenti si stanno orientando intorno al 2020. Il dibattito è comunque aperto.

Su un recente numero di *Nature* è apparso un articolo di J. Murray e D. King dal titolo: *"Oil tipping point has passed"* [4]. Gli autori hanno un *pedigree* scientifico di tutto rispetto ed il secondo di essi è stato consulente del governo inglese. Il superamento del picco di Hubbert viene attribuito alla presenza di una brusca impennata della curva dell'elasticità del prezzo del petrolio in funzione della sua produzione. È

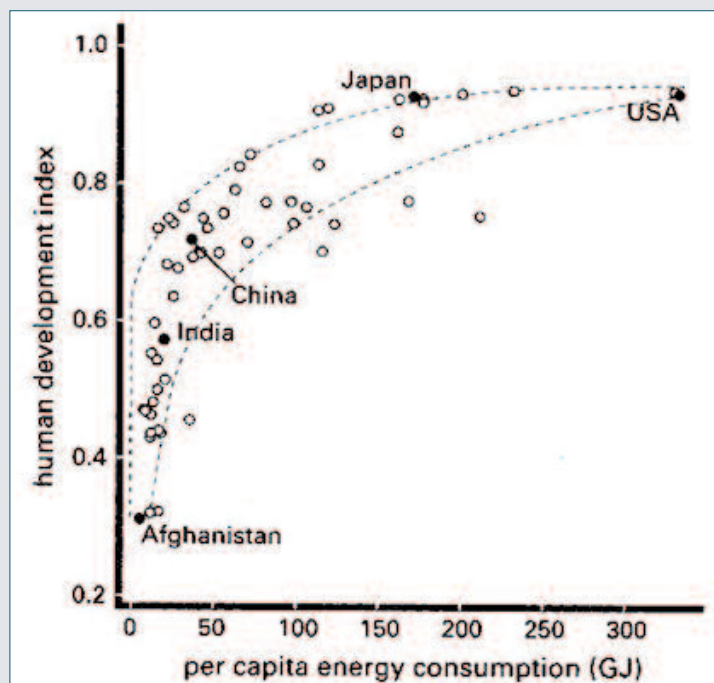


Fig. 1 - Andamento dell'indice di sviluppo umano in funzione del consumo di energia pro capite per i diversi Paesi

curioso che dopo questo traumatizzante esordio gli autori ci tranquillizzino sulla disponibilità di petrolio che diventerebbe solo meno facile e più costoso. Il suo depauperamento sarebbe comunque surrogato dalle riserve di metano che essi stessi definiscono immense.

Nel capitolo finale dell'articolo, dal titolo *"Faster action"* si afferma che l'unica strategia per affrontare nell'insieme la penuria di risorse e i cambiamenti climatici è quella di mettere fine alla dipendenza dalle fonti energetiche fossili. A tale scopo viene suggerito un massiccio impiego del risparmio, un miglioramento dell'efficienza e lo sviluppo delle energie rinnovabili. Si incoraggia quindi l'impiego dell'energia nucleare e si conclude ribadendo la necessità di interrogarsi se e come la crescita economica possa continuare senza combustibili fossili. Senza dubbio una bella domanda!

Risparmio ed efficienza

L'indice di sviluppo umano (*Human Development Index, HDI*) è un parametro che caratterizza il livello di benessere, tenendo conto che la qualità della vita non può essere commisurata solo alla soddisfazione delle necessità fisiche basilari, ma anche alla fruizione dei valori culturali e allo sviluppo delle capacità intellettuali. Esso dipende dai consumi annui pro capite di energia come illustrato nella Fig. 1 [5]. Si può osservare che a circa 120 GJ per persona lo HDI si avvicina all'apprezzabile valore di 0,8, risultando successivamente meno sensibile al consumo di energia. In sostanza esso costituisce la soglia energetica del benessere, anche se esistono Paesi spreconi, come gli Stati Uniti, che ne consumano quasi il doppio per persona. Se attraverso un processo di convergenza economica si raggiungesse uno stato uniforme dell'indice HDI uguale a 0,8, sia pure con un numero di abitanti della

terra pari all'attuale, l'energia consumata risulterebbe molto più elevata. La storia dell'uomo si identifica con quella dell'impiego delle risorse energetiche richieste per supportare lo stile di vita delle comunità sociali, aumentando non solo il loro benessere ma anche quello di convivenza e organizzazione. Pertanto l'appropriato utilizzo dell'energia non costituisce il problema della crescita ma la sua soluzione.

L'analisi sui consumi di energia nelle diverse attività umane deve essere inserita nel contesto dei processi che avvengono nei sistemi termodinamici aperti nei quali un flusso di calore Φ_c (energia termica per unità di tempo) proveniente da una sorgente a temperatura assoluta elevata T_1 si scarica in una sorgente ad una temperatura più bassa T_2 passando attraverso un dispositivo in grado di attingere parte dell'energia in transito e trasformarla in lavoro meccanico. Il rendimento, espresso dal rapporto fra il lavoro ottenuto e il calore che proviene dalla sorgente calda, si esprime come segue [6, 7]:

$$\eta = (T_1 - T_2) / T_1 - \sigma_{irr} T_1 / \Phi_c$$

Il primo termine al secondo membro dipende solo dalle temperature e sancisce il rendimento massimo, detto di Carnot, che si otterrebbe se il processo si svolgesse attraverso trasformazioni senza dissipazione di energia verso quella di minore qualità: quella termica a bassa temperatura. Ad esso si deve sottrarre un termine la cui entità è proporzionale alla velocità σ_{irr} , con cui viene creata l'entropia, che è tanto più elevata quanto maggiore è l'irreversibilità del processo. In termini generali si può esprimere come segue:

$$\sigma_{irr} = \sum_k X_k J_k$$

X_k sono le forze generalizzate che riflettono i gradienti delle grandezze, quali la temperatura, la pressione, i potenziali chimici e così via, che provocano le trasformazioni, mentre J_k sono i flussi ad esse coniugati. L'indice k si riferisce ai diversi processi che contribuiscono ad aumentare l'entropia, ovvero:

- il trasporto globale di materia;
- il trasporto dell'energia termica;
- lo svolgimento delle reazioni chimiche;
- dissipazione dell'energia meccanica.

Per un sistema continuo assume la forma:

$$\sigma_{irr} = - \int v \nabla \left(\frac{P}{T} \right) dV - \int q \nabla \left(\frac{1}{T} \right) dV - \int \frac{1}{T} \left(\frac{\partial G}{\partial \lambda} \right)_{p,T} r dV + \dots$$

essendo P, T, V rispettivamente la pressione, la temperatura e il volume, mentre $(\partial G / \partial \lambda)$ è la derivata dell'energia libera rispetto al grado di avanzamento. L'applicazione della relazione precedente richiede la conoscenza della velocità locale del fluido v e del flusso di calore locale q , ottenute dalla soluzione delle equazioni della fluidodinamica e

della termocinetica, delle velocità r delle reazioni chimiche coinvolte, e dei parametri che riflettono l'attrito interno e il trasporto di energia termica in un fluido, sia su scala molecolare che turbolenta. Nella Fig. 2 [8] viene illustrato un esempio dei risultati ottenuti nella simulazione di una miscela gassosa soggetta a combustione che percorre un condotto cilindrico con un flusso turbolento. Queste informazioni possono essere impiegate nelle progettazioni con l'intento di limitare le dissipazioni di energia.

Anche i sistemi socio-economici si sviluppano grazie alla presenza di gradienti delle risorse, delle monete e delle idee che producono dei flussi simili a quelli di materia ed energia tipici della termodinamica. Giustificando così il fatto che alcuni economisti si riconducono ad essa per interpretare alcuni processi tipici della loro disciplina, tenendo presente che una società soggetta all'aumento della sua popolazione non può sottrarsi ad incrementare l'utilizzo dell'energia.

Come abbiamo visto se le fonti fossili fossero prossime all'esaurimento la nostra società sarebbe avviata ad una gravissima crisi, ma fra le cose da fare il risparmio dell'energia da esse ottenuta risulterebbe poco utile mentre invece si imporrebbe la necessità di attivare fonti diverse da quelle in estinzione. Se viceversa le forniture di petrolio continuassero con un ritmo soddisfacente il risparmio non sarebbe necessario per la ragione opposta alla precedente, ma l'efficienza andrebbe comunque perseguita.

Ad esempio un motore endotermico ha un rendimento reale medio del 30% contro quello di Carnot che sfiora 80%. Se si colmasse sia pure parzialmente il divario si diminuirebbe significativamente la CO_2 prodotta con conseguenti vantaggi ambientali.

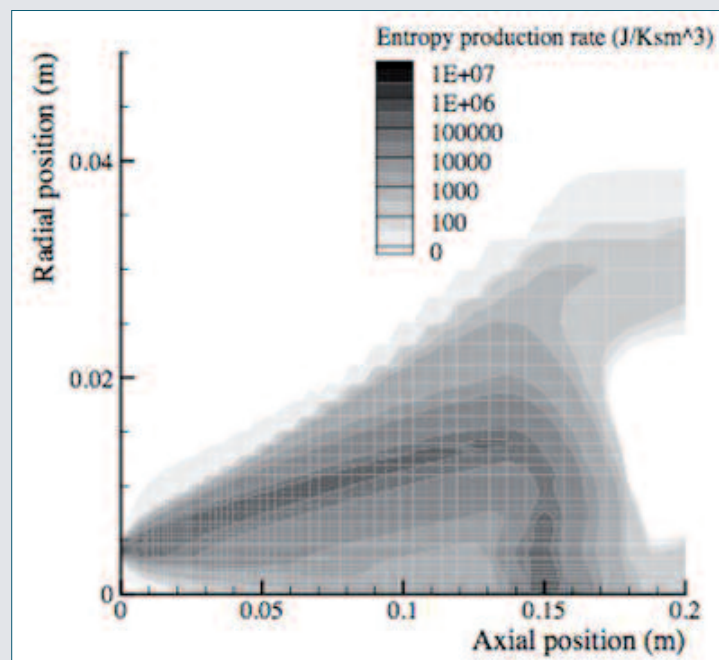


Fig. 2 - La gradazione del colore scuro indica il valore della creazione di entropia, calcolata in una miscela fluida che scorre in un condotto tubolare in cui ha luogo un processo di combustione. La simulazione è stata effettuata con il modello Eddy Dissipation Concept (EDC) del flusso turbolento, ipotizzando una velocità di reazione molto elevata [8]

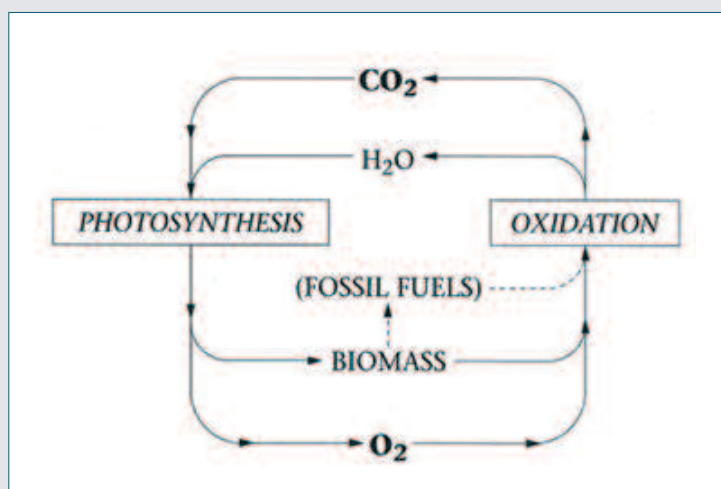


Fig. 3 - Nell'ecosistema le due reazioni di fotosintesi e ossidazione avvengono in senso inverso e sono accoppiate fra di loro. Tuttavia poiché parte delle biomasse vengono sepolte nel sottosuolo non tutto l'ossigeno prodotto prende parte alla reazione di ossidazione per cui si accumula nell'atmosfera

L'ipotesi precedente sull'abbondanza degli idrocarburi sul pianeta potrebbe essere considerata eretica, ma non dimentichiamo che conosciamo ancora poco del sottosuolo. I recenti ritrovamenti di gas naturale, sotto il nome di *shale gas* e di petrolio sotto il nome di *shale oil*, stanno letteralmente cambiando il panorama energetico e della chimica industriale, e sono sintomatici sull'abbondante presenza in diverse forme degli idrocarburi nel pianeta. In particolare lo *shale oil* include rocce sedimentarie che contengono materiali bituminosi che per riscaldamento vengono rilasciati sotto forma di liquidi petroliferi. Ricordiamo a tale proposito che l'accumulo di ossigeno nell'atmosfera sino all'attuale 20% è dovuto al seppellimento di materiale organico che limita il consumo dell'ossigeno stesso nella reazione di ossidazione (respirazione) rispetto a quella con la quale viene prodotto per fotosintesi, come illustrato nello schema di Fig. 3.

Se si tiene conto che il processo si è protratto per centinaia di milioni di anni si valuta che abbia avuto luogo un accumulo di materiale organico nel sottosuolo con un contenuto di carbonio 26.000 volte superiore a quello presente nella biosfera [9-11]. Esso prende la forma di carbone, gas naturale, petrolio, solo in parte presenti nei giacimenti ed il resto dispersi nel terreno, negli oceani e nelle rocce.

Le più recenti indagini evidenziano inoltre che le capacità del pianeta di fornire petrolio stanno crescendo ad un livello senza precedenti, prevedendo che nel 2020 potrebbero essere superiori al 15% di quelle attuali [12]. Tenendo però presente che presto o tardi i combustibili fossili dovranno essere avvicinati è opportuno praticare il risparmio, purché venga associato alle ricerche sull'attivazione di risorse ad essi alternative. Resta comunque confermata la necessità di affrontare i problemi energetici ponendo l'accento sugli aspetti tecnologici che stanno alla base di qualunque progettazione e gestione dei processi industriali migliorandone l'efficienza. E ciò attraverso un costante miglioramento degli impianti e dei dispositivi che vengono utilizzati fruendo di interventi innovativi che possono creare salti di qualità nell'utilizzo dell'energia.

Alla ricerca di virtuose "road maps"

In una recente pubblicazione [13] che assume la California come riferimento, viene condotto un studio dettagliato inteso ad individuare il cammino più conveniente per ridurre l'impiego di combustibili fossili al 20% entro il 2050. Il suo interesse deriva dal fatto che l'indagine può essere letta anche assumendo che la diminuzione del consumo di combustibili fossili sia dovuta invece che alle imposizioni per non contaminare l'atmosfera alla diminuzione della disponibilità del petrolio. I risultati ottenuti sono rappresentati nel diagramma di Fig. 4, detto di Pacala-Socolow. Sulle ordinate viene riportata la quantità di CO₂ riversata nell'atmosfera in funzione del tempo nel periodo che intercorre dal 2007 al 2050. Il colore grigio individua la zona in cui è permessa l'emissione della CO₂ che diminuisce sino al 20% in corrispondenza del 2050. Le altre zone colorate contenute in un triangolo, detto di stabilità, indicano l'incidenza delle diverse forme di energia opportunamente introdotte per surrogare i combustibili fossili.

L'esame della figura evidenzia la necessità di effettuare una profonda revisione delle infrastrutture includendo un significativo contributo nel miglioramento dell'efficienza dei processi in cui viene prodotta e utilizzata l'energia, un'ampia elettrificazione del trasporto ed infine un largo impiego delle energie *carbon free*, compreso il nucleare. Si può infine osservare che la sorgente fotovoltaica diffusa sembra destinata a giocare un ruolo modesto.

La conclusione più significativa che si può trarre è che si può ottemperare solo al 60% di un obiettivo ambizioso riguardante la limitazione dei combustibili fossili. Nel contempo le trasformazioni che devono essere effettuate richiedono tecnologie non ancora commercializzate ed un profondo coordinamento degli investimenti. Viene infine richiesto un ampio sviluppo delle infrastrutture, ma soprattutto l'acquisizione di nuove tecnologie.

In sostanza dovrebbero intervenire profondi cambiamenti, per alcuni aspetti incerti, con risvolti economici non indifferenti che riguardano

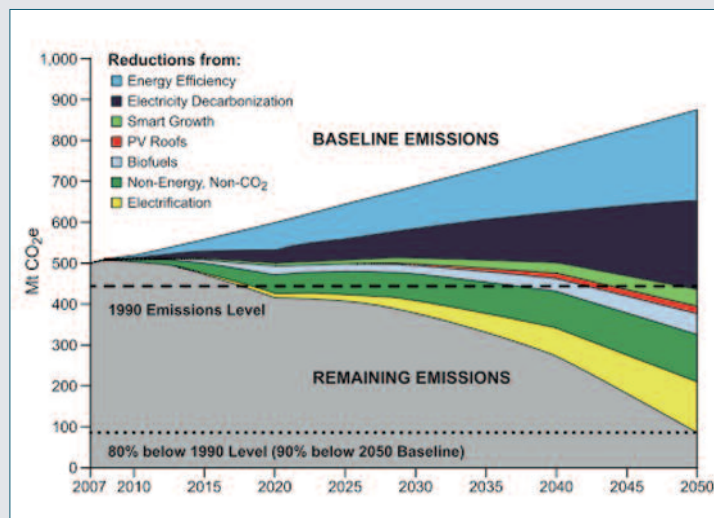


Fig. 4 - Diagramma di Pacala-Socolow sull'evoluzione della CO₂ emessa nell'atmosfera nella California compatibilmente con una riduzione dell'80% dei combustibili fossili [13]



comunque una delle aree mondiali più ricche e con elevata concentrazione tecnologica. La sua possibile estensione a tutto il pianeta appare improbabile, poiché se la California non può fare di meglio nessun altro la può superare.

Uno sguardo al futuro energetico

Se si scorrono le pagine di un trattato sulle scienze naturali non si può fare meno di osservare un lungo inventario di specie che si sono estinte, compresi i dinosauri che erano grandi e grossi. Le ragioni sono molteplici ed includono le catastrofi naturali, la mancanza di cibo o più in generale dei mezzi di sostentamento. Ma allora non si può fare a meno di chiedersi se il genere umano sia destinato a sopravvivere in eterno.

Ma in che cosa differisce l'uomo dalle altre specie viventi? Per l'intelligenza che è un frutto dell'evoluzione e su cui deve far conto se vuole sopravvivere all'eventualità che si presenti una seria crisi energetica che richieda un passaggio verso la *post-petroleum economy*. Una linea proposta con molta enfasi mediatica è quella di cambiare radicalmente, ed in breve tempo il modo di vivere surrogando i combustibili fossili e tutte le tecnologie ad essi connesse con sorgenti *carbon free* rinnovabili. Tenendo conto della crisi economica che è emersa appare improbabile che nei prossimi trent'anni la situazione migliori in modo significativo. In realtà si tratterebbe di una transizione epocale che richiederebbe una rigida *governance* mondiale che non si intravede all'orizzonte.

Curiosamente la paventata crisi energetico-ambientale ha fatto riaffiorare metodologie e tecniche che dopo essere state applicate, a lungo o transitoriamente, non sembrano offrire molto spazio all'innovazione per cui è legittimo dubitare che diano un contributo significativo all'avvicendamento dei combustibili fossili. In sostanza anche se si auspica che il mondo si muova verso l'impiego di sorgenti energetiche alternative ai combustibili fossili il cammino da percorrere appare ancora duro e l'obiettivo lontano [14], poiché non si può fare a meno di constata-

re che la transizione si stia verificando con molta lentezza. L'Europa unita è esordita con prospettive molto ambiziose sull'avvicendamento dei combustibili fossili, purtroppo però con un'inadeguata consapevolezza delle condizioni economiche e strutturali nelle quali si doveva calare l'iniziativa. Inoltre le profonde incertezze economiche che la stanno coinvolgendo rischiano di compromettere la sua stabilità politica, frustrando la formulazione di salde strategie a lungo termine.

Negli Stati Uniti tali ambizioni hanno raggiunto il punto culminante nel 2008 quando il Vice Presidente Al Gore ha sfidato il Paese a rispettare l'impegno di produrre entro dieci anni tutta l'energia elettrica attraverso fonti rinnovabili in dieci anni. L'obiettivo è ancora così lontano da indurre Vaclav Smil a definire tale iniziativa "*The Great Energy Delusion*". In realtà attualmente su circa 16 TW di potenza energetica prodotta nel mondo solo 0,5 TW vengono da sorgenti rinnovabili mentre l'impiego del processo fotovoltaico è inferiore allo 0,1% [14].

Allo stato attuale emerge che i più significativi cammini perseguibili si riconducono all'impiego delle sorgenti indicate di seguito unitamente alle loro potenzialità e limiti:

- solare (termico e fotovoltaico): l'energia è potenzialmente molto elevata, ma la creazione di adeguate infrastrutture per poterla sfruttare ad una scala confrontabile con i consumi primari di energia costituisce un'impresa immensa [15]. Soprattutto anche perché la sua periodicità richiede particolari accorgimenti per la difficoltà di immagazzinare l'energia elettrica così prodotta. Si deve comunque segnalare che nell'ambito del settore fotovoltaico stanno emergendo alcune innovazioni basate sull'impiego di film ultrasottili al plasma, che appaiono promettenti [16];
- eolica: è economica nelle zone soggette a forti correnti ventose anche se la sua stocasticità la rende poco agevole. Si ottiene energia elettrica il cui utilizzo risulta penalizzato per le ragioni menzionate. Anche se il suo impiego è in aumento l'energia prodotta è inferiore all'1% della totale prodotta;
- nucleare: pur generando timori per la sicurezza è auspicabile che vengano sviluppate adeguate tecnologie basate su reattori di piccole dimensioni e quindi più sicuri, aperti a particolari applicazioni, quali la desalificazione, il riscaldamento e il trasporto;
- biomasse lignocellulosiche: il loro impiego nella forma tradizionale sino ad ora utilizzata tende a compromettere la filiera agricola. Viceversa grazie agli sviluppi dell'ingegneria genetica potrebbero fornire un'apprezzabile quantità di combustibili senza compromettere le richieste di cibo. In questo quadro risulterebbe inoltre possibile fruire delle infrastrutture già esistenti per il loro impiego nel trasporto.

Sta infatti emergendo una frontiera scientifico-tecnologica il cui successo potrebbe rivoluzionare non solo l'avvicendamento delle risorse e delle fonti energetiche ma tutte le attività produttive di prodotti chimici di largo consumo e dei farmaci. In essa si esplorano le complicate reti dei cammini metabolici degli organismi monocellulari procariotici con l'intento di isolarne i passaggi rilevanti connettendoli fra di loro in modo da favorire la produzione di prodotti chimici, farmaci e carburanti [17-19]. Non mancano ovviamente obiezioni su questo approc-

cio che riguardano i pericoli di compromettere l'integrità della natura e la legittimità da parte dell'uomo di giocare alla divinità.

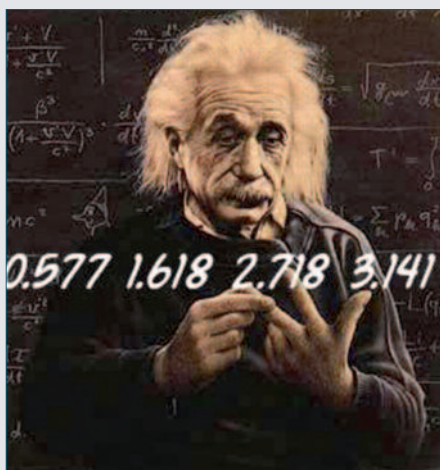
Accettare le sfide

I problemi precedentemente sollevati, per la loro complessità, richiedono l'intervento di scienziati e tecnici per quanto concerne l'introduzione di nuove soluzioni ed il miglioramento di quelle esistenti, e di politici per promuoverne ed agevolarne l'applicazione, oltre che trasferire all'opinione pubblica il messaggio di prepararsi a modificare il proprio stile di vita. Si deve però osteggiare la tendenza ad un'inversione delle parti nella quale i politici coprano il ruolo degli scienziati sposando tesi o adottando procedimenti poco realistici o significativi.

Le iniziative più importanti sono:

- i) il miglioramento dell'efficienza dei processi energetici, attraverso il perfezionamento e lo sviluppo delle tecnologie in essi coinvolte;
- ii) la creazione delle infrastrutture in grado di agevolare l'affermazione delle fonti rinnovabili;
- iii) l'incentivazione della ricerca di soluzioni innovative attraverso l'affermazione di nuove tecnologie.

Purtroppo lo sviluppo tecnologico, che ha segnato la storia del genere umano, segue un cammino erratico poiché neppure gli scienziati sono in grado di prevedere l'influenza delle loro ricerche. In un'affascinante analisi Kevin Kelly [20] evidenzia che la tecnologia percorre un cammino simile all'evoluzione biologica, quindi con esiti non facilmente prevedibili. Il secolo scorso è stato ricchissimo di innovazioni tecno-



logiche che stanno alla base dell'attuale stato di benessere dei popoli cosiddetti ricchi e sta trainando anche gli altri. A titolo di esempio vorrei ricordare che alcune scoperte nel settore chimico, quali la preparazione dei materiali polimerici e la sintesi dei fertilizzanti azotati hanno contribuito ad arginare la carestia alimentare. Entrambe hanno riscattato il depauperamento di alcune materie prime naturali tanto paventato dai seguaci del messaggio malthusiano. Inoltre il progresso nel settore farmaceutico ha affrancato l'umanità dall'incubo di gravi malattie.

Albert Einstein ha scritto: *"La crisi è la più grande benedizione per le persone e le nazioni, perché porta a progressi. La creatività nasce dall'angoscia come il giorno nasce dalla notte oscura. È nella crisi che nasce l'inventiva, le scoperte e le grandi strategie"* [21].

In realtà sino ad ora l'umanità non ha mai sofferto di una vera crisi energetica ed il carburante non è mai mancato nelle pompe di benzina, anche se il suo prezzo è stato soggetto ad oscillazioni dovute a fattori speculativi e geo-politici, o a squilibri fra gli investimenti richiesti per migliorarne l'estrazione e le richieste del mercato. Comunque le analisi su come reagire a possibili crisi energetiche devono essere affrontate con particolare attenzione verso le ricerche in grado di introdurre quelle innovazioni che saranno in grado di superarla [22]. Esse potranno emergere solo grazie alla diffusione delle conoscenze scientifiche. Il fallimento è infatti figlio del ritardo culturale e del fatto che siamo prigionieri di schemi sclerotici e parassitari che non accettano il rischio frenando le sfide più impegnative [23].

Bibliografia

- [1] D. H. Meadows *et al.*, The Limits to Growth, New American Library, 1977.
- [2] B. Hayes, *American Scientist*, May-June 2012, **100**, 192.
- [3] P. Roberts, Dopo il petrolio, Einaudi, Torino, 2005.
- [4] J. Murray, D. King, *Nature*, 2012, **481**, 483.
- [5] S. Vaclav, Energy at the Crossroad: Global Perspectives and Uncertainties, Cambridge Mass., MIT press, 2003.
- [6] R. Tolman, P.C. Fine, *Rev. Modern Physics*, 1948, **20**, 51.
- [7] S. Carrà, Sulle orme di Carnot, FEM, 2011.
- [8] I.S. Ertesvag, J. Kolbu, Entropy production modeling in CFD of turbulent combustion flow, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2005.
- [9] N. Lane, Oxygen, Oxford University Press, 2002.
- [10] R.A. Berner, *Paleogeography Paleoclimatology, Paleoecology*, 1988, **75**, 97.
- [11] R.A. Berner, The Phanerozoic Carbon Cycle: CO₂ and O₂, Oxford University Press, 2004.
- [12] L. Maugeri, Oil: the Next Revolution, Harvard Kennedy School, Belfer Center, June 2012.
- [13] J.H. Williams *et al.*, *Science*, 2012, **335**, 53.
- [14] R.A. Kerr, *Science*, 2010, **329**, 780.
- [15] V. Smil, *American Scientist*, 2011, **99**, 212.
- [16] H.A. Atwater, A. Polman, *Nature materials*, March 2010, **9**, 205.
- [17] S. Carrà, *Chimica e Industria*, 2011, **93**(6), 78.
- [18] R.H. Carlson, Biology is Technology, Harvard University Press, 2010.
- [19] M.R. Connor, S. Atsumi, *Journal of Biomedecine and Biotechnology*, 2010, 1.
- [20] K. Kelly, Quello che vuole la tecnologia, Codice, Torino, 2011.
- [21] A. Einstein, Il mondo come io lo guardo, Newton Compton, 2012.
- [22] M. Ridley, The Rational Optimist, Harper Collins, 2010.
- [23] S. Carrà, Sviluppo e necessità, un modesto esercizio di futurologia, goWare, 2012, ISBN 8897324282, 9788897324287.