

# La cuccagna è finita

Nicola Armaroli

*Il sistema energetico attuale è insostenibile. Ecco un po' di numeri per riflettere sulla portata della sfida scientifica ed etica che l'umanità ha di fronte*

L'umanità ha ottenuto per circa 5.000 anni buona parte delle sue risorse energetiche primarie da biomasse; tra queste, il legname che era anche la materia prima per la costruzione di abitazioni, navi, manufatti. Tra il XVI e il XVII secolo in Inghilterra si iniziò a sfruttare un combustibile meno facile da reperire ma molto più abbondante: il carbone. L'utilizzo intensivo del carbone cedette il passo, nei primi decenni del XX secolo, al petrolio che a sua volta, negli ultimi trent'anni, è stato in parte rimpiazzato dal gas naturale. Oggi circa il 20 per cento dell'umanità gode di un tenore di vita che nessuna generazione, nelle epoche precedenti, ha mai neppure lontanamente sognato di raggiungere. Noi abitanti dei paesi più ricchi possiamo viaggiare da una parte all'altra del pianeta in sole ventiquattrore, viviamo in abitazioni confortevoli sia d'estate e che d'inverno, possiamo comunicare con tutto il mondo stando comodamente seduti davanti a un computer. Tutto questo è reso possibile da un fattore determinante sul quale però vi è scarsissima consapevolezza: una disponibilità di energia praticamente illimitata, in qualsiasi momento della giornata, a prezzi straordinariamente bassi [1]. Infatti, nonostante le frequenti lamentele sull'esosità della bolletta energetica, oggi un litro di benzina costa molto meno di una bottiglia di acqua minerale in trattoria. E, si noti bene, quasi il 70 per cento del costo del combustibile è costituito da tasse e quindi non riflette direttamente il valore economico del prodotto sul mercato.

## Gli schiavi energetici

L'energia muscolare umana è stata impiegata per millenni come principale forma di generazione di lavoro [2]. Un uomo in buona salute può generare una potenza di circa 800 W per

un tempo breve, per esempio salendo di corsa una rampa di scale, ma in un'attività continuativa che duri molte ore non riesce a sviluppare una potenza superiore a circa 50 W. Quindi possiamo stimare che le dodici ore lavorative giornaliere di uno schiavo corrispondono a una quantità di energia di 600 Wh ( $2,2 \cdot 10^6$ J). Vediamo ora come si confronta l'energia prodotta da uno schiavo con quella che consumano le apparecchiature comunemente utilizzate nella nostra vita di tutti i giorni [1,3]. Per vedere una partita di calcio alla televisione con un normale apparecchio (80 W) si consumano 160 Wh di energia, pari a quella prodotta in circa tre ore di lavoro di una persona. Fare un bucato con una lavatrice di classe A (cioè una delle più efficienti, che consuma circa 800 Wh per un lavaggio a 60 °C) equivale a utilizzare il lavoro di una quindicina di persone per un'ora. Il motore di un'automobile di media cilindrata, che eroga una potenza di circa 80 kW, viaggiando a velocità di crociera, compie un lavoro pari a quello di 1.600 persone. È evidente che neppure l'imperatore Cesare Augusto si poteva permettere il lusso della disponibilità istantanea di una tale esercito di individui, attraverso un semplice gesto come è quello di girare la chiave in un cruscotto. Un Boeing 747-400, in fase di decollo a pieno carico, sviluppa una potenza di 80 MW, pari a quella erogabile da 1 milione e 600 mila "schiavi energetici". In altre parole, ogni volta che un velivolo 747-400 decolla da Malpensa occorrerebbe il contributo muscolare di tutti gli abitanti della città di Milano. Passando infine a una centrale termoelettrica di grande potenza (800 MW), essa potrebbe funzionare "per via muscolare" grazie al lavoro continuativo di oltre un quarto di tutti gli italiani, 16 milioni di persone. In Italia sono installati 80.000 MW di potenza elettrica, che equivalgono a una potenza muscolare umana di 1 miliardo e 600 milioni di persone.



*Collettori solari realizzati nei Sandia National Laboratories di Albuquerque, USA.*

È evidente che, oggi, non abbiamo bisogno di nessuno schiavo che faccia questi lavori: sfruttiamo semplicemente l'energia immagazzinata nei legami chimici dei combustibili. L'impressionante sviluppo tecnologico ed economico del XX secolo è stato possibile attingendo alle riserve energetiche custodite nelle viscere della Terra. Si stima che nel secolo scorso abbiamo consumato 250 miliardi di tonnellate di carbone, 125 miliardi di tonnellate di petrolio e più di 60.000 miliardi di metri cubi di gas [4]. In pochi decenni abbiamo intaccato un tesoro di energia solare fossile, formatosi attraverso processi durati milioni di anni. Ma questa straordinaria cuccagna ha un prezzo.

### **Ciclo del carbonio e clima**

La principale fonte di energia primaria mondiale rimane il petrolio, che copre il 35 per cento del fabbisogno [5]. Il consumo mondiale di greggio si aggira attorno agli 85 milioni di barili al giorno, ed è sostenuto da un drappello di giacimenti giganti e supergiganti [4] che, in alcuni casi, cominciano a mostrare segni di cedimento produttivo [6]. Negli ultimi trent'anni non si sono più scoperti supergiacimenti di greggio di buona qualità, come una delle più grandi compagnie petrolifere del mondo ci ricorda (1). Al momento attuale, nessuno ha letteralmente idea di dove si potranno reperire 100-120 milioni di barili al giorno (2) se la domanda dovesse aumentare, nonostante non

manchino alcuni ottimisti [7] peraltro sempre più isolati [8, 9]. Nel XX secolo il consumo energetico primario mondiale è aumentato di 16 volte [4]. Se nel corso del XXI secolo proseguissimo con lo stesso ritmo, ognuno dei 9 miliardi di abitanti del pianeta dell'anno 2100 consumerebbe il 50 per cento in più dell'americano medio del 2000. Non vi è alcuna possibilità che, nell'ambito dell'attuale sistema energetico, basato per oltre l'80 per cento sui combustibili fossili, risorse limitate ed esauribili, si possa mantenere un ritmo del genere. Fortunatamente le stime attuali fanno prevedere una crescita dei consumi più limitata: "solo" un raddoppio della domanda di energia mondiale da qui al 2030. Al momento attuale nessuno può prevedere se e come questa domanda potrà essere soddisfatta specie in presenza di due fatti che ci obbligheranno in tempi non lontani a un radicale cambiamento di paradigma del sistema energetico: il raggiungimento del picco di produzione petrolifera, dopo il quale l'offerta non sarà in grado di soddisfare la domanda, con pesanti conseguenze economiche e geopolitiche [8-10], e il progressivo surriscaldamento del pianeta [11] indotto dall'uso intensivo dei combustibili fossili, che ha interferito nei complessi e delicati meccanismi del ciclo del carbonio [12]. Ogni anno l'umanità preleva dalle viscere della Terra 8 miliardi di tonnellate di questo elemento nei combustibili fossili, riversandole in atmosfera sotto forma di biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>). L'immissione di questa piccola (rispetto agli scambi tra i serbatoi naturali del ciclo del car-

bonio) quantità di carbonio fossile, protratta per decenni, ha alterato la composizione dell'atmosfera, arrivando a influenzare in maniera non più trascurabile il bilancio della radiazione solare sulla superficie della Terra [13]. Gli effetti del riscaldamento globale sono oggi particolarmente rilevanti nelle aree polari del pianeta, come era stato previsto dagli scienziati [11]. L'ultimo rapporto dell'IPCC ha ribadito che i cambiamenti climatici hanno, con elevatissima probabilità (90 per cento), origine antropica [14].

La crisi climatica generata dalla civiltà ad alta intensità energetica e l'aumento continuo dei consumi di energia, particolarmente nei paesi emergenti (Cina e India in primis) sono due fattori in rotta di collisione che possono portare a una profonda crisi della civiltà umana nel corso del XXI secolo.

## Le alternative ai combustibili fossili

Le alternative ai combustibili fossili [1] si possono racchiudere in quattro principali categorie. La prima, di gran lunga più rilevante in termini quantitativi, è l'energia solare nelle sue varie forme dirette (termica, elettromagnetica) e indirette (eolica, idroelettrica, biomasse, correnti marine, ecc.). L'energia solare viene considerata "rinnovabile" in quanto il Sole continuerà a illuminare la Terra per oltre quattro miliardi di anni, un periodo sostanzialmente infinito. La seconda è l'energia nucleare da fissione di elementi chimici pesanti (uranio e torio, non rinnovabili) o da fusione di elementi leggeri (deuterio e trizio, virtualmente illimitati). La terza è l'energia geotermica, ovvero il calore imbrigliato nel sottosuolo terrestre che in alcune regioni limitate del pianeta

(per esempio Islanda, Toscana) giunge in prossimità della superficie e può essere sfruttato su larga scala. La quarta e ultima (anche in ordine di importanza) è l'energia di interazione gravitazionale Terra-Luna, che in alcuni punti del pianeta (per esempio Normandia) muove enormi masse di acqua (maree), che possono venire impiegate per produrre energia. Una trattazione dettagliata di tutte queste forme energetiche alternative [1] esula dagli scopi di questo breve articolo. Qui ci limiteremo a discutere brevemente di energia nucleare e di alcune forme di energia solare, attenendoci ai numeri. Questi sono i grandi assenti nei frequenti dibattiti italiani che spesso vedono protagonisti, da un lato, politici impreparati in cerca di improbabili consensi, dall'altro, "esperti" spesso molto attivi nello scrivere sui quotidiani, ma non sempre rintracciabili sulle banche dati scientifiche internazionali.

## Nucleare

L'energia nucleare copre il 15 per cento del fabbisogno elettrico mondiale e il 6 per cento della domanda primaria complessiva [5]. La costruzione di centrali elettronucleari a fissione ha conosciuto il suo periodo d'oro nel trentennio 1956-1986 [4]. Da vent'anni il numero di impianti nel mondo è sostanzialmente stabile attorno alle 440 unità: il parco centrali è quindi molto datato. Ci sono attualmente 31 impianti in costruzione, che non riusciranno a rimpiazzare gli impianti che dovranno essere dismessi per ragioni di età: nel 2006 sono entrati in funzione due nuovi impianti e ne sono stati chiusi definitivamente otto [15]. È quindi oggettivamente infondato affermare che oggi sia in corso un boom

## Il ventaglio delle fonti rinnovabili

di Giorgio Giacomelli

Si parla molto dell'uso di fonti energetiche rinnovabili. Alcuni le considerano fonti di energia alternative, ma attualmente sono di fatto energie integrative o complementari. Si tratta dell'energia solare, idroelettrica, eolica, dell'energia prodotta dalle maree, dal moto ondoso, dalle correnti marine, dalla differenza di temperatura delle acque marine, dalle biomasse, dall'energia geotermica e dall'energia ottenuta dai rifiuti urbani. Per il futuro molto lontano esistono soltanto due fonti energetiche fondamentali: l'energia solare e l'energia da fusione nucleare, mentre per il futuro a medio termine c'è anche la fissione nucleare da  $U^{238}$  e  $Th^{232}$ .

**L'energia solare.** Arriva dovunque, senza costo, è rinnovabile e, su piccola scala, non inquina. Ha lo svantaggio di essere diluita nello spazio e di variare con l'alternanza del giorno, della notte e delle stagioni.

L'utilizzo più semplice è quello con i pannelli solari, sia per riscaldamento che per la produzione diretta di energia elettrica. Sono moltissime le applicazioni con piccoli generatori fotovoltaici per esempio piccoli

calcolatori e orologi da polso; pannelli più grandi servono per pompare acqua dal terreno, per dare potenza a equipaggiamenti per comunicazione e per sistemi di emergenza. I pannelli solari fotovoltaici necessitano di miglioramenti tecnologici per aumentare l'efficienza delle celle solari e per ridurre i loro costi di produzione. Sviluppi notevoli sono previsti con l'uso di nanotecnologie (quantum dot) e di celle a multi-giunzione; si parla di solare fotovoltaico di terza generazione.

Occorrono grandi superfici per ottenere grandi quantità di energia. In molti paesi sono previsti incentivi per chi utilizza energia solare, in particolare in Germania, Stati Uniti, Giappone, ecc.: questi progetti contribuiranno a standardizzare meglio tutti i componenti e a ridurre i costi (1). Si stanno inoltre costruendo centrali che utilizzano specchi parabolici che focalizzano la luce su di un "boiler" posto in cima a una torre; si dovrebbero raggiungere altissime temperature, il che permetterebbe di produrre energia elettrica con più alta effi-

cienza; il solare termico sembra essere più vicino alla competitività (2). L'installazione di sistemi decentrati (tetti fotovoltaici) vicino al luogo di utilizzo evita le perdite di trasporto dell'energia; le centrali solari nella California del Sud possono fornire energia elettrica nelle ore di punta del consumo energetico, quando vengono accessi i condizionatori nelle abitazioni.

Qualche programma energetico mondiale per il futuro prevede grandi centrali fotovoltaiche in orbita intorno alla Terra per produrre elettricità senza l'alternanza giorno-notte, né quella stagionale. Resterebbe il problema di convogliare l'energia sulla Terra. Per esempio sarebbe possibile sfruttare delle microonde, ma per far questo servirebbe una vasta superficie terrestre allestita con antenne bipolari; la superficie rimarrebbe tuttavia utilizzabile per scopi agricoli, ma vi arriverebbero microonde di media intensità. Siamo ancora lontani dall'aver prove di fattibilità e di costo appropriato per tali centrali e si dovranno trovare metodi per convogliare con sicurezza le microonde verso grandi aree non popolate.

**Energia idroelettrica.** È stata questa la prima sorgente utilizzata per la produzione di energia elettrica su vasta scala. Attual-

del nucleare. Il panorama è particolarmente statico nelle regioni che hanno il maggior numero di impianti, Stati Uniti ed Europa; vi è una sola nuova centrale in costruzione in Finlandia.

Nonostante questo stallo nel numero degli impianti, la produzione elettronucleare è cresciuta sensibilmente nel tempo. Questo è dovuto a varie ragioni, in particolare a una gestione più efficiente degli impianti esistenti: nel 1973 le centrali nucleari funzionavano per il 50 per cento mentre oggi funzionano, pur notevolmente invecchiate, per oltre l'80 per cento del tempo [15].

Certamente i due maggiori incidenti (Three Mile Island, Chernobyl) hanno minato l'accettabilità sociale della tecnologia su cui lo stesso Enrico Fermi aveva avanzato per primo dubbi [16], ma la crisi del settore ha ragioni principalmente economiche. La liberalizzazione del mercati elettrici è stata un deterrente formidabile per gli investimenti nel nucleare, dimostrando in modo disarmante che questa fonte non sopravvive in regime di libero mercato [17]. Se le generose casse statali non garantiscono la copertura degli enormi costi dell'intero ciclo industriale, in particolare quelli a monte e a valle (costruzione, dismissione), nessuna impresa privata è disposta a investire in progetti che possono andare incontro a rischi di varia natura, a cominciare da lunghe e onerose battaglie legali con le comunità locali nei siti prescelti. Il ventilato rilancio dei programmi nucleari negli USA, nonostante la promessa di sostegni statali, non sta suscitando eccessivi entusiasmi [17]. Un altro problema è legato ai tempi di

costruzione, che restano non inferiori agli otto anni: questo implica enormi oneri finanziari in termini di interessi [18]. Un altro deterrente è costituito dalla possibilità, quantunque minima, di un altro incidente rilevante: se dovesse succedere, sarebbe la pietra tombale per questa tecnologia, che non può letteralmente permettersi il lusso di mostrarsi ancora vulnerabile [17].

Le centrali nucleari richiedono un enorme investimento energetico oltre che economico, e tale investimento è in gran parte basato sui combustibili fossili, esattamente come accade per tutte le fonti energetiche alternative, incluse le rinnovabili. Di recente è stato stimato che, in Australia, il tempo di ritorno energetico di un impianto nucleare con le tecnologie attuali si aggira sui sette anni [19], ovvero occorrerebbero sette anni prima che la centrale restituisse l'energia spesa per renderla operativa. L'uso del condizionale è d'obbligo perché in Australia, ove si trovano le maggiori riserve mondiali di uranio, non è mai stato costruito un impianto nucleare.

Il dibattito sulle riserve di uranio effettivamente sfruttabili è acceso e contraddittorio. L'unica certezza è che si tratta di una risorsa finita, che raggiungerà un picco di produzione per poi declinare. È indubbio, inoltre, che chi spera di estrarre con profitto uranio dai mari ha un'idea un po' approssimativa delle leggi base della chimica e della termodinamica, oltre che del concetto di *payback time* [1]. Oggi la produzione di uranio è largamente al di sotto della domanda, poiché anche gli investimenti in at-

mente circa il 6 per cento dell'energia elettrica mondiale proviene da centrali idroelettriche, di grandi e medie dimensioni. Vi sono centrali con due bacini a livelli diversi, di modo che si può pompare di notte l'acqua verso l'alto e utilizzarne la caduta di giorno per produrre energia elettrica. Queste centrali giocano un ruolo importante nel sopperire alle esigenze del consumo elettrico nelle ore di punta. Per quanto riguarda l'Italia e le nazioni industrializzate, i grandi corsi d'acqua sono ormai tutti utilizzati con dighe e centrali idroelettriche. Restano solo alcuni corsi d'acqua minori che potrebbero servire per costruire centrali di piccole dimensioni. La situazione è diversa in molti paesi in via di sviluppo, dove vi è una grande quantità di energia idroelettrica inutilizzata e il cui sfruttamento apporterebbe un aiuto significativo. Bisogna però considerare che grandi centrali idroelettriche possono portare a notevoli problemi ambientali.

**Energia eolica.** È conosciuta e usata da centinaia di anni, soprattutto in Olanda, per azionare i mulini a vento e per estrarre acqua dal suolo. Anche questa energia proviene dall'energia solare, in quanto prodotta da squilibri termici nell'atmosfera.

Dal vento si può ottenere energia elettrica attraverso eliche, di solito ad asse orizzontale, poste su piloni a una altezza di 30 o più metri per sfruttare un vento più stabile e con meno turbolenze. L'utilizzo dell'energia eolica è conveniente per piccole e medie utenze e per zone isolate. Sta diventando importante per centrali eoliche (*wind farms*) nelle zone con vento regolare, come tra l'oceano Atlantico e l'Europa: qui si raggiungono efficienze globali del 20 per cento per la produzione di energia elettrica.

**Energia dalle maree.** La quantità di energia accumulata nelle maree è considerevole, ma la frazione che si può pensare di utilizzare è minima, circa l'1-2 per cento del totale. Per sfruttare le maree occorrono particolari condizioni: maree alte (dell'ordine dei 10 metri), coste rientranti che formino una specie di bacino a imbuto naturale, ecc. È da tempo in funzione la centrale francese della Rance, con una potenza di circa 240 MW elettrici (nei momenti di massima e minima marea). Sono stati effettuati progetti per centrali in Inghilterra, Canada e USA. Attorno all'Italia non vi sono grandi maree e quindi è difficile utilizzarle.

**Energia dal moto ondoso.** Per sfruttare l'energia delle onde bisognerebbe realizzare dei dispositivi che assorbano l'energia, riducendo l'ampiezza dell'onda e così "calmando" il mare. Piccole centrali da 1-2 MWe di potenza sono state sperimentate in Giappone e in Inghilterra. L'energia prodotta è fluttuante nel tempo (è nulla quando il mare è calmo). Per ottenere l'equivalente di una centrale da 1.000 MW elettrici sulle coste dell'Atlantico sarebbero necessarie installazioni lunghe circa 400 km. Per quanto riguarda l'Italia, le onde del Mediterraneo sono relativamente piccole e quindi non facilmente utilizzabili.

**Energia dalle correnti marine.** La corrente del Golfo, dai mari dell'America Centrale alle coste dell'Europa del Nord, ha una potenza totale di circa 26.000 MW su un fronte di centinaia di chilometri. Si tratta, di nuovo, di un'energia dovuta al Sole; servirebbero grandi aree per l'installazione di centrali; ma i prelievi energetici potrebbero avere delle conseguenze sul clima dei paesi dell'Europa settentrionale.

**Energia dalla differenza di temperatura fra acque profonde e superficiali di mari tropicali.** Si può utilizzare un tubo con un



tività estrattive sono stati bassissimi, il prezzo dell'uranio è quindi salito di oltre sette volte dal 2002 al 2007 [15], molto più del petrolio. Tra i primi 15 detentori di risorse di uranio non vi è un solo paese dell'Unione Europea [15], rendendo del tutto infondate le speranze di chi vede il nucleare come una strada verso l'autosufficienza energetica europea (o addirittura italiana). A questo proposito, tra l'altro, giova ricordare che la distribuzione energetica nei consumi finali europei è la seguente: 23 per cento elettricità, 77 per cento combustibili. Le centrali termonucleari producono solo elettricità, quindi, anche se producessimo tutta l'elettricità in questo modo, avremmo coperto appena un quarto dei nostri consumi energetici. Le centrali elettriche, di qualunque tecnologia, non producono combustibili, semmai li consumano.

Si possono individuare vari scenari affinché il nucleare possa giocare un ruolo davvero rilevante nel sistema energetico mondiale da qui al 2050 [20]. Uno di minima è il seguente: sostituzione di tutti gli attuali 435 impianti, sostituzione del 50 per cento delle attuali centrali a carbone, copertura del 50 per cento della nuova domanda di elettricità. Questo implicherebbe la costruzione di circa 2.500 centrali da 1.000 MW ciascuna (per almeno venti anni con le tecnologie attuali), ovvero una la settimana da qui al 2050. Si tratta di uno scenario del tutto irrealistico: non si saprebbe dove reperire l'uranio e non esistono depositi adeguati per la messa in sicurezza delle scorie [21], a cominciare dalle migliaia di tonnellate di plutonio che verrebbero prodotte [22]. Il più grande deposito progettato sinora, Yucca Mountain (USA), è tuttora soggetto a un estenuante iter autorizzativo, partito nel 1982, di cui an-

cora non si intravede la fine [23, 24]. Yucca è costato 60 miliardi di dollari al contribuente americano; ai ritmi attuali di produzione di rifiuti nucleari occorrerebbe un impianto di questo tipo al mondo ogni due anni. Tuttavia non si riuscirà a terminarne uno in quarant'anni negli Stati Uniti, la nazione più ricca e tecnologicamente avanzata del mondo, che dispone di vaste aree disabitate.

Le speranze di una rinascita nucleare sono tutte riposte nei numerosi progetti di ricerca sulla fissione di "quarta generazione" (3) e sulla fusione nucleare (4). Le prospettive della loro tutt'altro che certa fattibilità su scala industriale [25] sono unanimemente poste tra non meno di 25 anni (50 per la fusione). L'attuale crescita dei consumi fa ragionevolmente prevedere che l'energia nucleare, stanti i molteplici problemi sopra delineati, continuerà a giocare un ruolo piuttosto limitato nello scenario energetico dei prossimi 50 anni, come del resto prevede la stessa Agenzia Internazionale per l'Energia [5]. D'altro canto, alla luce degli enormi danni ambientali che i cambiamenti climatici stanno causando, alcuni scienziati propongono il nucleare, oggettivamente a ridotta intensità di emissioni serra, come una soluzione chiave [26]. Sulla carta è un'opzione più che ragionevole, ma i limiti tecnici e temporali dell'attuale scenario energetico-climatico la rendono di dubbia praticabilità.

Infine, non va dimenticato che la tecnologia nucleare ha risvolti etici molto profondi legati alla sua intrinseca complessità [27] e al rischio che possa favorire la proliferazione di armi nucleari (il caso Iran è emblematico) [28, 29]. I risvolti economici, tecnici e militari rendono particolarmente inadatta l'energia nucleare per i paesi poveri di risorse finanziarie, scientifiche e culturali: pro-

fluido che venga prima vaporizzato con acqua calda superficiale e poi condensato tramite acqua fredda profonda. Il vapore farebbe girare le turbine producendo elettricità. Questo sfruttamento è pensabile in mari tropicali dove c'è una differenza di circa 20°C fra acque superficiali e profonde.

**Biomasse. Biocombustibili.** Sono combustibili ottenuti da biomasse erbacee e legnose e da rifiuti organici urbani. Il bioetanolo e il biodiesel possono essere usati come additivi alla benzina e al diesel; le biomasse possono essere utilizzate anche per produrre biogas. Il Brasile ottiene biocombustibili da estese coltivazioni di canna da zucchero. Altre nazioni pensano di produrli da coltivazioni di vario tipo. Bisogna però pensare alle conseguenze: è probabile che i recenti rincari dei prezzi di grano, riso, granturco, siano in parte connessi con tentativi di uso di biomasse per produrre energia. Per il futuro si può pensare a produzioni di biocombustibili da coltivazioni di microalghe marine.

**Energia dai rifiuti urbani.** Il riutilizzo dei rifiuti urbani serve al recupero di materie prime, alla produzione di concimi e di combustibili. Inoltre, attraverso il riciclaggio diminuisce la quantità dei rifiuti. Esistono nu-

merose centrali che producono energia dai rifiuti. Due sono i modi in cui essa può essere ottenuta: sotto forma di calore, bruciando i rifiuti, oppure facendoli fermentare e producendo biogas. Per il futuro è pensabile a un contributo relativamente importante di energia dai rifiuti e forse di biocombustibili. Il disastro napoletano indica però l'importanza di un'adeguata programmazione.

**Energia geotermica.** Si ottiene energia sfruttando il calore interno della Terra. Si possono usare sistemi a vapore dominante, ad acqua calda ad alta temperatura, ad acqua calda a bassa temperatura e con rocce secche calde. I primi due sistemi sono attualmente utilizzati per produrre energia usando soffioni naturali e bacini vicino alla superficie terrestre in zone attive, come in Toscana, in Islanda e in regioni del Nord-ovest degli USA. Il quarto metodo offre possibilità promettenti tramite fratturazione delle rocce calde (per aumentare la superficie su cui avviene lo scambio di calore) e iniezione di acqua fredda a grandi profondità. In Italia è in funzione il complesso geotermoelettrico di Larderello, in Toscana, con circa 400 MWe di potenza.

**Sistemi ibridi. Pompe di calore.** Questi sistemi non sono fonti di energia, ma con-

sentono di razionalizzare i cicli energetici e ottimizzare lo sfruttamento delle fonti primarie. Le pompe di calore funzionano come un frigorifero, ma non sottraggono calore al sistema che si vuole raffreddare bensì all'ambiente esterno e cedono tale calore a più alta temperatura al sistema che si vuol riscaldare (per esempio una casa in inverno). Il sistema ha bisogno di energia elettrica per funzionare. Le pompe di calore sono anche usate per raffreddare case in estate.

#### NOTE

(1) [www.scienzagiovane.unibo.it/pannelli.html](http://www.scienzagiovane.unibo.it/pannelli.html); Million roofs in USA: [www.eren.doe.gov/million-roofs](http://www.eren.doe.gov/million-roofs).

(2) Vedi le varie proposte energetiche presentate da diversi autori: centrali solari a focheggiamento, reattori nucleari con preacceleratore, pile a combustibile, ecc.. [http://it.wikipedia.org/wiki/Pannello\\_solare](http://it.wikipedia.org/wiki/Pannello_solare); [http://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_amplifier](http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_amplifier); [http://it.wikipedia.org/wiki/Pila\\_a\\_combustibile](http://it.wikipedia.org/wiki/Pila_a_combustibile).

Giorgio Giacomelli  
è docente presso il Dipartimento di Fisica  
dell'Università di Bologna.

prio quei paesi che hanno il diritto di aumentare la loro disponibilità energetica nei prossimi, cruciali, due-tre decenni.

## Solare

Il Sole invia sulla Terra una quantità enorme di energia sotto forma di radiazione luminosa. La potenza istantanea che colpisce l'atmosfera terrestre ammonta a 170 milioni di miliardi di Watt (170 PW). In pratica, in me-

no di un'ora il Sole invia sulla Terra una quantità di energia pari all'intero consumo complessivo mondiale annuale [3, 30]. La radiazione solare raggiunge tutte le zone del pianeta, ma la sua intensità varia in funzione della latitudine: tra Roma e Londra vi è un fattore 1.6 [3]. Tutte queste sono eccellenti notizie, evidentemente. La cattiva notizia, però, è che l'energia solare è *molto diluita* [1,4] e intermittente su scala locale (ma non su scala globale, metà del pianeta è sempre illuminata). In altre parole, quindi, non sarà mai possibile far funzionare un ospedale, infrastruttura ad altissimo consumo energetico locale, con l'energia solare che ne colpisce i tetti di giorno. Da questo esempio è facile intuire come la principale sfida scientifica e tecnologica sia quella di immagazzinare in qualche modo il gigantesco (e diluito) flusso di energia solare per poi utilizzarlo con "l'intensità" necessaria, laddove richiesto [1]. È importante rilevare che, tramite l'energia solare è possibile ottenere tutte le forme energetiche di cui abbiamo bisogno: calore, elettricità e combustibili. Oltre il 50 per cento dei consumi energetici domestici in Europa riguarda la banale produzione di calore a bassa temperatura: calore per scaldare gli ambienti, per lavarsi, per cucinare. La produzione di parte di questo calore per via solare sarebbe un importante passo avanti nella transizione energetica.

## Fotovoltaico

Un pannello fotovoltaico converte direttamente l'energia solare in energia elettrica: è un dispositivo molto più sofisticato e costoso di un pannello solare termico. La tecnologia di gran lunga predominante resta quella al silicio (>95 per cento), con i settori delle celle a film sottile e plastiche in lenta ascesa [31]. Se, per assurdo, coprissimo l'intero fabbisogno elettrico italiano con i sistemi fotovoltaici oggi in commercio dovremmo occupare un'area di 2.400 km<sup>2</sup>, pari alla provincia di Piacenza (0,8 per cento della superficie nazionale) [32]. Venendo a nu-



*Raccolta della canna da zucchero a Orindiúva, in Brasile.*

meri più ragionevoli, per coprire l'1 per cento del fabbisogno nazionale ogni cittadino dovrebbe disporre di un pannello di 0,42 m<sup>2</sup>, meno di una parabola per Tv satellitare [32]. Per soddisfare il fabbisogno elettrico di una famiglia media alle nostre latitudini, occorre una superficie di circa 18 m<sup>2</sup>. Attualmente, in tutto il mondo, sono installati circa 2.000 MWp di potenza fotovoltaica, una quantità infinitesima se con-

frontata alla potenza dispiegata da centrali elettriche tradizionali a combustibili fossili o nucleari. Tuttavia il settore fotovoltaico è in forte crescita e si prevede che la produzione diverrà economicamente competitiva con le fonti tradizionali attorno al 2015 [33]. È interessante notare che il paese coi ritmi di crescita più alti al mondo nel fotovoltaico è il Kenya. Questa tecnologia consente infatti di produrre energia in loco, senza una costosa rete di distribuzione a lunga distanza, ed è quindi particolarmente adatta ai paesi poveri, privi di risorse economiche per costruire infrastrutture (esattamente il contrario del nucleare, vedi sopra). I leader mondiali del settore fotovoltaico sono la Germania e il Giappone, che oggi raccolgono i frutti di una lungimirante scelta industriale di innovazione compiuta venti anni fa. Gli Stati Uniti stanno ora cercando di recuperare il terreno perduto, lanciandosi nella corsa al fotovoltaico di seconda generazione [31], per abbattere i costi e aumentare l'efficienza di conversione luminosa, diminuendo quindi le superfici da esporre al Sole. Molti analisti prevedono che il fotovoltaico sarà la prossima "tecnologia dirompente", cioè una tecnologia che cambierà in modo radicale il modo di produrre e distribuire l'elettricità [33]. Potrebbe sembrare un'utopia. Ma è ragionevole crederci: quindici anni fa nessuno immaginava che un apparecchio semplice e di bassissimo prezzo, classico esempio di tecnologia dirompente, sarebbe stato oggi nelle tasche di tutti, rivoluzionando il modo di comunicare, il telefono cellulare.

## Biocombustibili

Oggi si sente parlare con sempre maggiore frequenza di bioetanolo e biodiesel, combustibili ottenuti dalla coltivazione e dalla lavorazione di prodotti agricoli di varia natura (canna da zucchero, mais, barbabietola, sorgo, colza, ecc.), che potrebbero sostituire la benzina e il gasolio per autotrazione. Va però

sottolineato che la produzione di biocarburanti è fortemente legata al sistema energetico tradizionale: enormi quantità di combustibili fossili vengono investite in termini di fertilizzanti, pesticidi, raccolta, trasporto, lavorazione, ecc., per produrre i biocombustibili. È quindi sempre necessario valutare con rigore se vi sia un guadagno energetico e non, invece, un consumo netto [34]. Negli ultimi vent'anni, Stati Uniti e Brasile hanno investito considerevoli risorse per promuovere la produzione di etanolo da, rispettivamente, mais e canna da zucchero [35, 36]. Il guadagno energetico del bioetanolo da mais americano è piuttosto modesto (se non negativo), mentre quello da canna brasiliana è unanimemente considerato elevato (6-8 unità di energia ottenute per ogni unità spesa nella coltivazione e nella lavorazione). Il caso brasiliano è però difficilmente esportabile: pochissimi paesi hanno a disposizione enormi distese di terreni coltivabili in climi favorevoli alla produzione di colture energetiche. Per esempio, per far funzionare a bioetanolo da canna le 35 milioni di automobili italiane dovremmo impiegare 50.000 Km<sup>2</sup> di territorio, un sesto della superficie nazionale. E comunque, da noi, non crescerà mai la canna da zucchero del Brasile meridionale.

Oltre al fatto che i conti non tornano, va ricordato che l'agricoltura estensiva a scopi energetici comporta una serie di problemi quali l'erosione del suolo [37], la distruzione di ecosistemi preziosi per l'equilibrio della biosfera (per esempio foreste pluviali), l'impiego di enormi quantità di acqua in una situazione generale di crescente stress idrico, la competizione con l'agricoltura per scopi alimentari che induce l'aumento dei prezzi del cibo, con pesanti ripercussioni economiche generali, specie per i più poveri [38, 39]. Infine, in un mondo in cui centinaia di milioni di esseri umani soffrono ancora la fame, risulta moralmente discutibile coltivare prodotti per "alimentare" mezzi meccanici di altri esseri umani, tipicamente ricchi e sazi (5). Ognuno di questi argomenti richiederebbe una lunga trattazione. Qui ci limitiamo a osservare che la strada dei biocombustibili presenta interessanti prospettive, ma non può essere vista come una soluzione risolutiva al problema energetico. Uno studio recente dell'Agenzia Ambientale Europea stima che nel 2030 l'Europa potrà soddisfare circa il 15 per cento del proprio fabbisogno energetico primario da biomasse, senza compromettere gli ecosistemi [40]. È una prospettiva interessante ma, appunto, non risolutiva. Anche qui, le speranze di sostenibilità a lungo termine sono legate agli sviluppi della ricerca scientifica, in particolare alla possibilità di ottenere biocombustibili da materiale cellulosico [41, 42]. Per esempio, utilizzare il fusto e non la pannocchia del mais: questo, evidentemente, attenuerebbe sensibilmente molti dei problemi delineati sopra.

## Un grande sforzo di ricerca

Affinché le tecnologie energetiche rinnovabili possano diffondersi su larga scala sono necessarie due condizioni chiave: (a) cospicui investimenti e progressi nella ricerca scientifica di base e applicata; (b) leadership politiche lungimiranti soprattutto nei paesi ricchi e in quelli più popolosi, che possano agire da traino per il resto del mondo.

Sul punto (a) vale la pena ricordare che, negli ultimi cinquant'anni, gli investimenti in ricerca e sviluppo energetico sono an-

dati, per oltre il 60 per cento, all'energia nucleare, nonostante essa oggi fornisca appena il 6 per cento dell'energia primaria mondiale [4, 43]. Questa discutibile distribuzione delle risorse costituisce una delle cause principali del ritardato sviluppo delle energie rinnovabili ed è una spia eloquente del legame indissolubile e mai risolto che esiste tra il settore nucleare civile a quello militare. Nella speranza di una più equa ripartizione delle risorse nella ricerca a favore delle energie rinnovabili si possono individuare alcune linee di auspicabile sviluppo, prime fra tutte la possibilità di realizzare la cosiddetta fotosintesi artificiale [44]. Si tratta di un processo in cui si prendono prodotti a basso contenuto energetico (acqua, biossido di carbonio) e li si trasforma, attraverso la luce solare e mediante complessi sistemi chimici al contorno, in prodotti ad alto contenuto energetico come idrogeno o idrocarburi. Sarebbe un processo analogo a quello fotosintetico naturale, ma molto più semplice ed efficiente. La fotosintesi artificiale è considerata un "santo Graal" della ricerca scientifica: in questo modo i prodotti della combustione delle sostanze "fabbricate" diventerebbero la materia prima per alimentare un ciclo energetico chiuso in cui l'unico input esterno è l'energia del Sole [1, 3, 44]. Verrebbe così a spezzarsi la spirale perversa di produzione di rifiuti che scarichiamo in atmosfera bruciando i combustibili fossili. Numerose altre linee di ricerca andrebbero sviluppate [45], non ultimi i sistemi di immagazzinamento e trasporto dell'idrogeno, un vettore energetico che dovrà essere prodotto da fonti rinnovabili e non tramite combustibili fossili, come si fa oggi [1].

## Lotta agli sprechi, educazione, sobrietà

Questa breve carrellata su alcune possibili fonti energetiche alternative ha mostrato che nessuna, in tempi brevi, può fornire una soluzione decisiva. È ragionevole pensare che, per almeno vent'anni, i combustibili fossili rimarranno i protagonisti del settore energetico, ma è difficile prevedere quanto questo sarà compatibile con gli sforzi che mirano a ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>. Del resto, il sistema energetico del futuro sarà un mix di tantissime opzioni, ognuna valorizzata a seconda della specificità locale di un territorio [1]. Nel lungo termine, si tratterà principalmente di energia solare diretta e indiretta (eolico, biomasse, idroelettrico, gradienti di temperatura dei bacini idrici, combustibili solari ecc.) Nel frattempo, l'opzione più immediata, efficace ed economica alla crisi energetica incombente è la lotta agli sprechi [3]. Oggi nessun politico ha il coraggio di farlo, ma sarebbe onesto e utile informare i cittadini dei paesi più ricchi che è impellente fermare la perversa spirale di aumento dei consumi energetici, anche se qualche esperto la considera un'opzione insensata (6). Tra l'altro, è ampiamente dimostrato che un aumento dei consumi di energia, dopo una certa soglia, non migliora la qualità della vita [4]. Per fare un esempio, la presenza del gran numero di obesi e di malati di cuore nei paesi occidentali è strettamente legata a stili di vita in cui l'energia fisica è sostituita completamente dall'energia fossile [46]. Ancora: il trasporto ferroviario è mediamente otto volte più efficiente di quello su gomma in termini energetici, oltre che molto più affidabile in quanto a sicurezza per il viaggiatore [47]. Tuttavia l'auto resta molto più popolare del treno,



anche grazie a discutibili sussidi pubblici a sostegno di periodiche rottamazioni.

Non è astruso immaginare che proprio la civiltà energetica solare "diluata" potrà un giorno obbligarci a un radicale cambiamento degli stili di vita rispetto alla civiltà fossile "intensiva", di cui parte dell'umanità ha goduto negli ultimi due secoli. E non è affatto detto che sarà un cambiamento in peggio [1, 3]. Oggi è davvero avvilente constatare che, in un mondo assetato di energia, continuiamo ad assistere a colossali sprechi; è su questi che dobbiamo cominciare a incidere per far decollare la transizione energetica che non possiamo più eludere. Facciamo alcuni esempi. Nei campi petroliferi mondiali si bruciano annualmente 150 miliardi di metri cubi di gas naturale, pari al 30 per cento del consumo complessivo della UE, come prodotto di scarto dell'attività estrattiva. Le foto notturne da satellite evidenziano in maniera angosciante questo gigantesco spreco di risorse naturali in varie zone del pianeta. Fortunatamente si sta cercando di correre ai ripari (7).

Il 6 per cento delle risorse energetiche primarie mondiali vengono impiegate per far muovere la più inefficiente flotta automobilistica del mondo, quella degli Stati Uniti [4]. Ancora oggi la Casa Bianca si oppone ostinatamente a una revisione degli standard di efficienza delle automobili. Gli Stati Uniti dipendono sempre più dall'estero per il fabbisogno petrolifero e hanno speso centinaia di miliardi di dollari e migliaia di vite umane nelle guerre del Golfo.

Le centrali elettriche mondiali producono, con un'efficienza media del 35 per cento, il restante 65 per cento di energia primaria viene considerato un rifiuto e disperso nell'ambiente come calore. Si stima che, per esempio, gli Stati Uniti potrebbero riciclare calore dalle loro centrali in maniera economicamente sostenibile e produrre una quantità di elettricità pari a quella generata da 65 grandi centrali nucleari o a carbone [48]. Purtroppo potremmo continuare ancora, citando altri esempi.

Non dimentichiamo mai che nessuna forma di energia alternativa e rinnovabile potrà mai vincere l'ignoranza, lo spreco e il disprezzo dei limiti fisici della biosfera: il lungo e faticoso cammino della transizione energetica non è solo un'affascinante prova sul piano scientifico e tecnologico ma è, forse ancor più, una sfida culturale e morale verso la sobrietà e la responsabilità individuale e collettiva.

## Conclusioni

Agli inizi del XXI secolo, con una popolazione mondiale di 6,5 miliardi di abitanti destinata a crescere sino a 9,5 miliardi in quattro decenni, ci troviamo ad affrontare quella che è probabilmente la più grande sfida scientifica, tecnologica, culturale ed etica della nostra storia: uscire progressivamente, ma con decisione, da un sistema energetico basato su preziose risorse *una tantum* di formidabile concentrazione ma inquinanti e passare a un sistema energetico dominato da una risorsa inesauribile, pulita, ma diluita, quella del Sole [1, 3].

Possiamo continuare a utilizzare in modo crescente i combustibili fossili fino a un punto di crisi irreversibile oppure cercare parzialmente rifugio nell'energia nucleare, una risorsa di straordinario valore, ma gravata da problemi tecnici in parte irrisolvibili e da enormi interrogativi morali. Scelte di questo tipo non metterebbero a rischio "la sopravvivenza del pianeta", come a volte si riporta erroneamente sui mass-media. La Terra troverà un nuovo equilibrio anche con temperature più elevate (come già accaduto in epoche lontane) oppure dopo un devastante conflitto globale, magari scoppiato per accaparrarsi le ultime risorse energetiche fossili. È chiaro comunque che non possiamo permetterci di aspettare ancora: sulle spalle della nostra generazione grava una pesante responsabilità nei confronti di chi, dopo di noi, abiterà questa meravigliosa astronave di nome Terra.

## NOTE

- (1) Si veda la campagna pubblicitaria di Chevron sui media americani, consultabile su [www.willyoujoinus.com](http://www.willyoujoinus.com).
- (2) Si leggano per esempio le opinioni dagli amministratori delegati di Total e Conoco Phillips, due giganti petroliferi, riportate su *Time Magazine*, nell'articolo «Peak Possibilities» del 3 dicembre 2007.
- (3) Si veda il sito del Generation IV International Forum: [www.gen-4.org](http://www.gen-4.org).
- (4) Si veda il sito del progetto internazionale ITER: [www.iter.org](http://www.iter.org).
- (5) Per una trattazione del problema della fame e dell'obesità nel mondo contemporaneo, si veda il numero monografico de *Le Scienze* di novembre 2007.
- (6) Tra questi si distingue Franco Battaglia, docente di Chimica dell'Università di Modena e Reggio Emilia. Il professore, molto noto per la sua attività di editorialista su alcuni quotidiani, ha pubblicato recentemente il libro *L'illusione dell'energia dal sole* – con presentazione di Silvio Berlusconi (Ed. 21mo Secolo). È un testo di cui raccomando vivamente la lettura, in parallelo alle bibliografie scientifiche citate in questo articolo.
- (7) Si veda il progetto Global Gas Flaring Reduction sul sito della Banca Mondiale con tutte le mappe e i dati aggiornati: [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org).

## BIBLIOGRAFIA

- [1] **ARMAROLI N., BALZANI V.**, *Energia Oggi e Domani*, Bononia University Press, Bologna 2004.
- [2] **SMIL V.**, *Storia dell'energia*, Il Mulino, Bologna 2000.
- [3] **ARMAROLI N., BALZANI V.**, «The future of energy supply: Challenges and opportunities», *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46, 2007, pp. 52-66.
- [4] **SMIL V.**, *Energy at the crossroads*, MIT Press, Cambridge, MA 2003.
- [5] **IEA**, *Key World Energy Statistics*, International Energy Agency, Paris, 2007, [www.iea.org/Textbase/stats/index.asp](http://www.iea.org/Textbase/stats/index.asp).
- [6] **SIMMONS M.R.**, *Twilight in the Desert*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey 2005.
- [7] **MAUGERI L.**, «Oil: Never cry wolf - Why the petroleum age is far from over», *Science*, 304, 2004, pp. 1114-1115.



- [8] **KERR R.A.**, «Oil resources - Even oil optimists expect energy demand to outstrip supply», *Science*, 317, 2007, p. 437.
- [9] **KERR R.A.**, «Oil resources - The looming oil crisis could arrive uncomfortably soon», *Science*, 316, 2007, p. 351.
- [10] **DEFFEYES K.S.**, *Beyond Oil*, Hill and Wang, New York 2005.
- [11] **HANSEN J., SATO M., RUEDY R., LO K., LEA D.W., MEDINA-ELIZADE M.**, «Global temperature change», *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 103, 2006, pp. 14288-14293.
- [12] **QUADRELLI R., PETERSON S.**, «The energy-climate challenge: Recent trends in CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion», *Energ. Policy*, 2007, pp. 5938-5952.
- [13] **HANSEN J.**, «Riscaldamento globale: una bomba da disinnescare», *Le Scienze*, aprile 2004.
- [14] **IPCC**, *Intergovernmental Panel on Climate Change: Fourth Assessment Report*, Cambridge University Press, UK, 2007, [www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm](http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm).
- [15] **WEC**, *2007 Survey of Energy Resources*, World Energy Council, London, 2007, [www.iea.org/Textbase/stats/index.asp](http://www.iea.org/Textbase/stats/index.asp).
- [16] **WEINBERG A.M.**, *The first nuclear era: The life and time of a technological fixer*, American Institute of Physics, New York 1994.
- [17] *Atomic renaissance*, *The Economist*, 6 settembre 2007.
- [18] **GILES J.**, «When the price is right», *Nature*, 440, 2006, pp. 984-986.
- [19] *Life-Cycle energy balance and greenhouse gas emissions of nuclear energy in Australia*, ISA, The University of Sydney, 2006.
- [20] **EISENBERG R., NOCERA D.G.**, «Preface: Overview of the forum on solar and renewable energy», *Inorg. Chem.*, 45, 2006, pp. 6799-6801.
- [21] **UNEP**, «Nuclear waste: Is everything under control?», *Environment Alert Bulletin*: 2007, [www.grid.unep.ch/product/publication/download/ew\\_nuclear.en.pdf](http://www.grid.unep.ch/product/publication/download/ew_nuclear.en.pdf).
- [22] **BERNSTEIN J.**, *Plutonium: A history of the world's most dangerous element*, The National Academies Press, Washington, D.C. 2007.
- [23] **MACFARLANE A.M. e EWING R.C.** (Eds.), *Uncertainty underground: Yucca Mountain and the nation's high-level nuclear waste*, MIT Press, Cambridge, MA, 2006.
- [24] **BRUMFIEL G.**, «Nuclear waste - Chernobyl and the future: Forward planning», *Nature*, 440, 2006, pp. 987-989.
- [25] **PARKINS W.E.**, «Energy - Fusion power: Will it ever come?», *Science*, 311, 2006, p. 1380.
- [26] **MESERVE R.A.**, «Global warming and nuclear power», *Science*, 303, 2004, p. 433.
- [27] **CHARLES D.**, «Spinning a nuclear comeback», *Science*, 315, 2007, pp. 1782-1784.
- [28] **TOON O.B., ROBOCK A., TURCO R.P., BARDEEN C., OMAN L., STENCHIKOV G.L.**, «Consequences of regional-scale nuclear conflicts», *Science*, 315, 2007, pp. 1224-1225.
- [29] «Conscience call - Nuclear proliferation remains a potent threat - and scientists' active engagement is essential if it is to be effectively addressed», *Nature*, 432, 2004, p. 421.
- [30] **SERVICE R.F.**, «Is it time to shoot for the sun?», *Science*, 309, 2005, pp. 548-551.
- [31] **LEWIS N.S.**, «Toward cost-effective solar energy use», *Science*, 315, 2007, pp. 798-801.
- [32] **SURI M., HULD T.A., DUNLOP E.D., OSSENBRINK H.A.**, «Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries», *Sol. Energy*, 81, 2007, pp. 1295-1305.
- [33] **BRADFORD T.**, *Solar Revolution*, MIT Press, Cambridge, MA 2006.
- [34] **WALD M.L.**, «Is ethanol for the long haul?», *Sci.Am.*, 296, 2007, pp. 28-35.
- [35] **JOHSON J.**, «Ethanol - Is it worth it?», *Chem. Eng. News*, 85, 2007, pp. 19-21.
- [36] **GOLDEMBERG J.**, «Ethanol for a sustainable energy future», *Science*, 315, 2007, pp. 808-810.
- [37] **MONTGOMERY D.R.**, *Dirt: The erosion of civilizations*, University of California Press, Berkeley, CA 2007.
- [38] **DASGUPTA P.**, *Povert , ambiente e societ *, Il Mulino, Bologna 2007.
- [39] **POLLAN M.**, *The omnivores's dilemma*, The Penguin Press, New York 2007.
- [40] **EEA**, *How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?* 2006, [http://reports.eea.europa.eu/eea\\_report\\_2006\\_7/en/tab\\_content\\_RLR](http://reports.eea.europa.eu/eea_report_2006_7/en/tab_content_RLR).
- [41] **STEPHANOPOULOS G.**, «Challenges in engineering microbes for biofuels production», *Science*, 315, 2007, pp. 801-804.
- [42] **HIMMEL M.E., DING S.Y., JOHNSON D.K., ADNEY W.S., NIMLOS M.R., BRADY J.W., FOUST T.D.**, «Biomass recalcitrance: Engineering plants and enzymes for biofuels production», *Science*, 315, 2007, pp. 804-807.
- [43] **ENEA**, *Rapporto Energia e Ambiente 2006*, 2007, [www.enea.it/](http://www.enea.it/).
- [44] **BALZANI V., CREDI A., VENTURI M.**, «Photochemical conversion of solar energy», *ChemSusChem*, 1, 2008, p. DOI: 10.1002/cssc.200700087.
- [45] **DOE**, «Basic Research Needs for Solar Energy Utilization», U.S. Department of Energy Office of Science, 2005, [www.er.doe.gov/bes/reports/files/SEU\\_rpt.pdf](http://www.er.doe.gov/bes/reports/files/SEU_rpt.pdf).
- [46] **POPKIN B.M.**, «The world is fat», *Sci.Am.*, 297, 2007, pp. 88-95.
- [47] **SMIL V.**, *Energy*, Oneworld, Oxford 2006.
- [48] **HILEMAN B.**, «Climate-change debate shifts», *Chem. Eng. News*, 84, 16 Ott. 2006, pp. 33-36.

Nicola Armaroli  
 è primo ricercatore presso l'Istituto per la Sintesi Organica e la Fotoreattività (ISOF) del CNR di Bologna.