



Nicola Armaroli
Vincenzo Balzani

ENERGIA PER L'ASTRONAVE TERRA

Terza edizione
L'era delle rinnovabili

ZANICHELLI

NICOLA ARMAROLI
VINCENZO BALZANI

Energia per l'astronave Terra

Terza edizione
L'era delle rinnovabili

chiave di lettura

a cura
di Federico Tibone

ZANICHELLI

Copyright © 2017 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [52087]
www.zanichelli.it

I diritti di elaborazione in qualsiasi forma o opera, di memorizzazione anche digitale su supporti di qualsiasi tipo (inclusi magnetici e ottici), di riproduzione e di adattamento totale o parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche), i diritti di noleggio, di prestito e di traduzione sono riservati per tutti i paesi. L'acquisto della presente copia dell'opera non implica il trasferimento dei suddetti diritti né li esaurisce.

Realizzazione editoriale:

- Collana ideata da: Federico Tibone e Lisa Vozza
- Coordinamento redazionale: Federico Tibone
- Redazione: Lucia Sanna Bissani
- Progetto grafico: Falcinelli & Co. Srl
- Impaginazione: Pierangelo Bassignana
- Disegni e grafici: Roberto Marchetti

Copertina:

- Progetto grafico e impaginazione: Falcinelli & Co. Srl
- Immagine di copertina: BeholdingEye/iStock

Prima edizione: 2008

Edizione aggiornata e ampliata: 2011

Terza edizione: maggio 2017

Ristampa: **prima tiratura**

5 4 3 2 1 2017 2018 2019 2020 2021

Grazie a chi ci segnala gli errori

Segnalate gli errori e le proposte di correzione su www.zanichelli.it/correzioni.

Controlleremo e inseriremo le eventuali correzioni nelle ristampe del libro.

Nello stesso sito troverete anche l'*errata corrige*, con l'elenco degli errori e delle correzioni.



Questo libro è stampato su carta che rispetta le foreste.
www.zanichelli.it/la-casa-editrice/carta-e-ambiente/

Stampa: LINEASTAMPA sas

Via Marzabotto 190 - 216, 40050 Funo di Argelato (Bologna)

per conto di Zanichelli editore S.p.A.

Via Irnerio 34, 40126 Bologna

INDICE

Prefazione alla terza edizione *	5
Introduzione	10
1. Che cos'è l'energia	15
2. Ieri e oggi	39
3. Quanta energia sprechiamo?	67
4. L'energia nella stiva: i combustibili fossili	87
5. Cambiamenti climatici e altri danni	117
6. Energia nucleare: il sogno fallito	137
7. Energia dall'aria, dall'acqua e dalla Terra	169
8. Energia dal Sole	195
9. La transizione energetica	225
10. L'unico futuro possibile	255
Le fonti di questo libro	277
15 miti da sfatare	280
Forse non sapevi che...	286
Indice analitico	292

* Il libro è aggiornato ai dati disponibili a febbraio 2017.
Molti capitoli di questa terza edizione sono nuovi o fortemente rinnovati.

A Claudia e Carla

Se pensi che l'istruzione sia costosa,
prova con l'ignoranza.

Derek Bok

Prefazione

alla terza edizione

Siamo in un momento cruciale della storia dell'astronave Terra: l'era dell'uomo, l'Antropocene, finora caratterizzata dall'uso crescente dei combustibili fossili, deve fare i conti con la necessità di rinunciare gradualmente a questa fonte di energia per non compromettere la stabilità della biosfera e lo sviluppo della civiltà.

La prima edizione di questo libro risale al 2008; in meno di un decennio sono cambiate più cose di quanto allora potessimo immaginare o sperare.

In quegli anni iniziava a diffondersi la consapevolezza del fatto che ci troviamo su un'astronave con risorse limitate. I cambiamenti climatici e i danni alla salute causati dall'uso dei combustibili fossili erano già evidenti, ma una potente lobby sostenuta da grandi compagnie petrolifere finanziava scienziati e centri di ricerca per gettare dubbi sulla realtà del riscaldamento globale e disorientare l'opinione pubblica.

All'epoca le fonti alternative proposte per sostituire i combustibili fossili erano il nucleare e le energie rinnovabili. Mentre continuava un acceso dibattito tra i sostenitori delle due opzioni, molti davano per certa una rinascita del nucleare e insistevano sull'impossibilità di far fronte alla richiesta globale di energia con le fonti rinnovabili.

Nel 2008 i pannelli fotovoltaici installati nel mondo (15 GW) producevano meno dell'1% dell'energia elettrica prodotta dai 439 reattori nucleari e parevano poco plausibili come alternativa. Negli Usa si tentava di rilanciare il nucleare con generosi contributi statali e il famoso deposito per rifiuti altamente radioattivi di Yucca Mountain sarebbe dovuto entrare in funzione a breve. In Italia il governo lanciava un programma per il ritorno al nucleare.

Nel 2011, quando è uscita la seconda edizione di questo libro, il quadro era già sostanzialmente cambiato. L'incidente di Fukushima aveva affossato le prospettive di rinascita del nucleare; i possibili finanziatori si erano definitivamente ritirati e l'accettabilità sociale di questa tecnologia era crollata ovunque. Gli italiani, tramite un referendum popolare, si erano pronunciati in massa contro il ritorno al nucleare proposto dal governo. Nel frattempo il fotovoltaico installato nel mondo era più che quadruplicato, salendo da 15 a 68 GW.

Nel 2009 la conferenza ONU sul clima a Copenaghen aveva preso atto dello scarso impatto del protocollo di Kyoto, redatto nel 1997 ed entrato in vigore nel 2005, per contenere le emissioni che possono modificare il clima; pur confermando la

necessità di evitare il riscaldamento del pianeta, la conferenza non giunse ad accordi sostanziali.

La transizione dai combustibili fossili alle energie rinnovabili faticava a farsi strada, ma qualche segnale cominciava a manifestarsi: la Germania lanciava un piano nazionale di transizione energetica di vasta portata mentre gli Stati Uniti, sotto la guida del presidente Obama, si impegnavano finalmente a sviluppare le energie rinnovabili.

Nel frattempo il degrado ambientale del pianeta si è aggravato a causa del modello di sviluppo dominante, l'«economia lineare» che si basa sull'energia dei combustibili fossili, sull'uso indiscriminato delle risorse naturali e sull'accumulo di rifiuti nella biosfera.

Negli ultimi anni il vento sembra essere cambiato, in particolare grazie a due eventi che hanno avuto un forte impatto sulla pubblica opinione e anche sul mondo della politica e dell'economia.

Nel giugno 2015 l'enciclica *Laudato si'* di papa Francesco sulla cura della «casa comune» ha denunciato lo stato di diffuso degrado ambientale e sociale e ha esortato a trovare un consenso mondiale per mettere rapidamente in atto azioni concrete. Nel dicembre dello stesso anno, alla conferenza COP21 di Parigi, l'auspicato consenso è stato raggiunto: le delegazioni di 196 Paesi hanno riconosciuto che il cambiamento climatico rappresenta un pericolo urgente e potenzialmente irreversibile per tutta l'umanità. Si è convenuto che è assolutamente necessario agire per mantenere l'aumento della temperatura media globale entro 2 °C rispetto al livello pre-industriale. Questo richiede una

progressiva ma rapida transizione energetica dai combustibili fossili alle energie rinnovabili.

Inevitabilmente l'accordo di Parigi ha punti deboli. Ogni nazione si è posta obiettivi che saranno difficili da verificare e forse non basteranno per fermare il surriscaldamento del pianeta. Rimane però il fatto che parte del mondo economico e politico inizia ad ascoltare i richiami della scienza e dell'etica per salvare la biosfera. In questo contesto, vasti movimenti di opinione internazionali chiedono la riconversione degli investimenti dall'estrazione dei combustibili fossili allo sviluppo delle energie rinnovabili.

Sì, le cose cominciano a cambiare e a dirlo sono i numeri. Da qualche anno il contributo relativo dei combustibili fossili alla domanda energetica mondiale ha iniziato a diminuire. In tutto il mondo le tecnologie rinnovabili dominano largamente i mercati elettrici in termini di nuova potenza installata. La Cina, martoriata da problemi di inquinamento atmosferico e timorosa di rivolte sociali, ha approvato una moratoria sulla costruzione di nuove centrali a carbone in molte province. Il Giappone deve far fronte a spese colossali per la gestione della crisi di Fukushima (a distanza di 6 anni, i reattori danneggiati restano inesplorabili) mentre continua a tenere spento il suo enorme parco centrali, in attesa di certezze tecniche e sostegni politici forse svaniti per sempre.

Mentre in alcune nazioni l'auto elettrica sta diventando un serio concorrente alle auto tradizionali, i Paesi produttori di petrolio, terrorizzati all'idea che il trasporto su strada si trasformi radicalmente, sono impegnati in una guerra di tutti contro tutti sulle quo-

te di produzione e sui prezzi. Il risultato paradossale è che il petrolio viene venduto sottocosto, per mantenerlo concorrenziale, portando molti Paesi produttori e aziende energetiche sull'orlo della bancarotta.

Nel 2016 la potenza da eolico e fotovoltaico ha sfiorato 800 GW, coprendo il 5% della domanda elettrica globale. In Europa le rinnovabili coprono il 17% dei consumi energetici totali; 11 Stati della UE hanno già raggiunto l'obiettivo del 20% previsto per il 2020.

Se si considera che vent'anni fa l'eolico e il fotovoltaico erano quasi inesistenti, siamo di fronte al più veloce e dirompente cambiamento energetico della storia. Gli investimenti nelle energie rinnovabili oggi continuano ad aumentare e anche i Paesi meno sviluppati intravedono finalmente la possibilità di accrescere la propria disponibilità energetica.

La transizione energetica dai combustibili fossili alle energie rinnovabili è un processo inevitabile e ormai irreversibile, che nemmeno un presidente degli Stati Uniti ostile potrà fermare e che faciliterà un graduale passaggio dall'economia lineare all'«economia circolare», basata sul riciclo, che potrà fermare il degrado del pianeta.

Questa terza edizione di *Energia per l'astronave Terra* vuole raccontare la complessità della transizione e gli ostacoli che restano da superare, ribadendo con forza che la scienza e la tecnologia non bastano per vincere la sfida. Per fissare la barra verso l'unico futuro possibile occorrono anche buon senso, sobrietà, collaborazione e responsabilità.

N.A. e V.B., aprile 2017

Introduzione

Non si è ancora riusciti ad adottare un modello circolare di produzione che assicuri risorse per tutti e per le generazioni future, e che richiede di limitare al massimo l'uso delle risorse non rinnovabili, di moderare il consumo, di massimizzare l'efficienza dello sfruttamento, di riutilizzare e riciclare.

Papa Francesco

Se ho una scarpa un po' rotta, che faccio? La getto via, assieme all'altra ancora buona, e vado in un grande centro commerciale a scegliere, fra le centinaia di tipi di scarpe esposte, quelle che più mi piacciono. Grazie al cielo posso esercitare la mia libertà di consumatore.

L'alternativa suggerita da una poesia di Erri De Luca – *Considero valore risparmiare acqua, riparare un paio di scarpe...* – non la prendo neppure in considerazione. Anche perché è difficile trovare un calzolaio, e per di più la riparazione potrebbe costarmi più delle scarpe nuove. In fondo poi cosa c'è di male? È il nostro modello di sviluppo: il consumismo. È la nostra civiltà: la civiltà dell'usa-e-getta.

Il filosofo Umberto Galimberti ha scritto che il consumismo è «il primo dei vizi capitali della nostra epoca». È un modello di sviluppo «che offre un finto benessere basato sulla distruzione delle risorse e lo sfruttamento delle persone».

E se invece di farmi abbagliare dal luccichio del consumismo provassi allora a guardare dietro le quinte, per capire come stanno le cose nella loro realtà globale?

Scoprirei che quelle scarpe nuove appena comprate sono fabbricate usando materiali (plastica, collanti, vernici) che sono ottenuti dai combustibili fossili, consumando energia (elettrica, termica, meccanica, luminosa), anch'essa prodotta dai combustibili fossili. Scoprirei che per fare quelle scarpe si sono prodotte molte sostanze di rifiuto, a cui si aggiungono ora le scarpe vecchie che ho buttato. Scoprirei che le belle scarpe nuove forse sono state fabbricate da operai mal pagati e poco tutelati, a volte addirittura minorenni, in Paesi dove l'inquinamento raggiunge spesso livelli insostenibili.

Nel comprare le scarpe nuove ho creduto di esercitare una libera scelta. Però, guarda caso, sono proprio quelle scarpe che secondo uno spot suadente visto alla tv «renderanno felici i tuoi passi». E naturalmente con il nuovo paio di scarpe mi sono portato a casa anche una scatola di cartone e qualche foglio di carta, ottenuti dal legno degli alberi, e un sacchetto di plastica, prodotto ancora una volta con i combustibili fossili. Dovrò sbarazzarmene, e forse non sarò abbastanza scrupoloso da farlo differenziando quei rifiuti.

Il discorso fatto per il paio di scarpe si applica anche – con problemi ancora più seri di consumo di risorse e produzione di rifiuti – ogni volta che compriamo un computer, un telefonino, un televisore o perfino un prosciutto. Dietro le quinte dei

500 ipermercati italiani, per esempio, si gettano nei rifiuti ogni anno 55 000 tonnellate di cibo che, seppur prossimo alla scadenza, potrebbe essere tranquillamente mangiato.

Il nostro modello di sviluppo è fondato sulla circolarità forzata produzione-consumo: si producono merci per soddisfare bisogni, ma si producono anche bisogni per garantire la continuità della produzione delle merci. Queste devono essere rapidamente consumate per essere sostituite; e poiché non possono essere troppo fragili, altrimenti nessuno le comprerebbe, è sufficiente che sia fragile una loro parte. Così il «pezzo di ricambio» non esiste, o è venduto a un prezzo talmente alto da non rendere conveniente la riparazione.

Se non si sente il bisogno di sostituire un prodotto, questo «bisogno» viene indotto dalla pubblicità che, sostanzialmente, è un appello alla distruzione delle cose che abbiamo per far posto a quelle di nuova produzione. Dove non arriva la pubblicità soccorre la moda, un'altra strategia per vincere la resistenza degli oggetti alla distruzione. La moda rende infatti socialmente inaccettabile ciò che è ancora materialmente utilizzabile.

Ogni volta che si usano risorse per produrre un manufatto (come un'automobile) o per mettere in opera un servizio (come riscaldare l'acqua di una piscina) si producono rifiuti, che spesso occupano un volume maggiore rispetto a quello delle risorse che si sono utilizzate. A seconda del loro stato di aggregazione i rifiuti si accumulano come escrescenze sulla superficie della Terra (per poi unir-

si alle acque superficiali o profonde, percorrendo spesso molta strada dai punti di scarico) oppure, nel caso siano gassosi, si diffondono nell'atmosfera. Come sappiamo ormai bene, il problema della collocazione e del destino dei rifiuti è oggi sempre più complesso.

Alla fine dei processi che generano merci e servizi l'ambiente naturale risulta impoverito del suo contenuto originale e addizionato (brutta parola, ma non possiamo certo dire «arricchito») di una certa quantità di sostanze estranee solide, liquide o gassose. Queste sostanze modificano il suolo, le acque e l'atmosfera, rendendoli sempre meno idonei a servire per le funzioni vitali; e anche a sostenere la stessa economia che, in ultima analisi, vive delle risorse naturali.

Purtroppo ogni richiamo a minori consumi, a partire da quelli energetici, contrasta con l'idea oggi dominante – sostenuta da molti economisti e fatta propria dalla maggior parte dei politici – secondo cui è necessario che il prodotto interno lordo (PIL) delle nazioni aumenti almeno del 2–3% l'anno. Dimenticano però che un aumento del PIL implica un aumento nel consumo delle risorse e nella produzione di rifiuti e che, per il secondo principio della termodinamica, come è impossibile creare il moto perpetuo è anche impossibile avere uno sviluppo infinito sulla base di risorse inesorabilmente finite. Questa è una realtà con cui economia e politica dovranno rassegnarsi a fare i conti.

A questo punto potreste dire: veramente io volevo leggere un libro sull'energia, che c'entra tutta

questa solfa? Non temete, non vi abbiamo ingannato. Nelle pagine che seguono si parlerà di ciò che vi aspettate: dal legame chimico alla legge di Einstein, dal carbone al nucleare, dall'obesità alimentare all'energia solare.

Ma tenevamo a chiarire fin d'ora che l'energia è un tema davvero cruciale per capire il mondo in cui viviamo. È la grande disponibilità energetica a permetterci di condurre una vita immensamente più comoda di quella che vivevano i nostri nonni. Allo stesso tempo però il nostro stile di vita può aggravare il degrado del pianeta e compromettere seriamente la qualità della vita dei nostri nipoti.

La più grande sfida e opportunità che l'umanità ha davanti, per provare a mitigare i principali problemi che l'affliggono, è quella di mettere a punto nuove tecnologie energetiche sostenibili. Conoscere le leggi fondamentali dell'energia, disporre di alcune informazioni basilari sull'attuale sistema energetico, avere un'idea delle prospettive delle nuove tecnologie può aiutarci a diventare persone più consapevoli e responsabili.

Dopo aver letto questo libro, insomma, la prossima volta che vi si rompe una scarpa potreste essere tentati di portarla a riparare, o magari di provare a ripararla da soli.

CAPITOLO OTTAVO

Energia dal Sole

Gli scienziati sono chiamati a vedere ciò che tutti hanno già visto e a pensare ciò a cui nessuno ha ancora pensato.

Albert Szent-Györgyi

L'astronave Terra non è un sistema isolato. Deve far fronte a molte necessità del suo equipaggio con le riserve (non rinnovabili) che ha nella stiva, ma gode anche di un grande beneficio: riceve in continuità dal Sole una immensa quantità di energia sotto forma di radiazione elettromagnetica, cioè luce e calore.

È proprio questa l'energia che «rinnova» alcune risorse fondamentali della Terra: i prodotti del mondo vegetale e l'ossigeno, mediante il processo della fotosintesi clorofilliana e, con essi, tutta la piramide alimentare; l'acqua potabile, tramite l'evaporazione dei mari e le precipitazioni; il vento, con la formazione di gradienti di temperatura che fanno muovere grandi masse d'aria.

Anche i combustibili fossili sono una risorsa continuamente «rinnovata» dalla luce solare, poiché derivano dal processo di fotosintesi; in pratica, però, per noi sono una risorsa non rinnovabile, perché per

formarsi richiedono un tempo un milione di volte più lungo di quello in cui li stiamo consumando.

L'energia solare è abbondante: in meno di un'ora la Terra riceve dal Sole una quantità di energia pari all'intero consumo umano mondiale di un anno. L'energia solare, a differenza dei combustibili fossili, è presente in tutte le zone del pianeta, anche se con intensità diversa in funzione della latitudine. E poiché il Sole continuerà a brillare per miliardi di anni, ecco che l'energia solare, oltre a essere abbondante e ben distribuita, è anche inesauribile nella nostra scala dei tempi.

Questi importantissimi pregi sono però mitigati da due limitazioni: l'energia solare ha intensità bassa ed è variabile su scala locale, perché dipende dalle condizioni meteorologiche oltre che dall'alternanza tra il dì e la notte.

L'attuale sistema di vita nei Paesi più sviluppati richiede densità di potenza che vanno dai 20–100 W/m² di un'abitazione ai 300–900 W/m² di un'acciaiera.

La densità di potenza dell'energia solare è in media di circa 170 W/m², un valore che si riduce quando la si converte in potenza utilizzabile. Perciò non sarà mai possibile far funzionare acciaierie e altre strutture ad altissimo consumo energetico, come gli ospedali, con l'energia della radiazione solare che cade di giorno sui loro tetti.

È facile intuire che la principale sfida scientifica e tecnologica è immagazzinare il gigantesco – ma diluito – flusso di energia solare, per poi utilizzarlo con l'intensità necessaria laddove è richiesto.

Convertirla per sfruttarla

Come abbiamo già visto, l'energia è tanto più utile quanto più è concentrata (senza esagerare, altrimenti diventa pericolosa), immagazzinabile e facile da trasportare.

Le ragioni per questi requisiti sono semplici:

1. l'energia in forma concentrata è necessaria per soddisfare le esigenze di strutture grandi e complesse; inoltre dal molto si può sempre ottenere il poco, ma non viceversa;
2. quando è immagazzinabile, l'energia si può accumulare ed è sempre pronta all'uso;
3. quando è facilmente trasportabile, l'energia può servire in luoghi diversi da quelli in cui sono collocate le sue riserve; nel caso di viaggi su grandi distanze, in particolare con aerei e navi, è assolutamente necessario avere energia trasportabile.

Le sostanze combustibili, in particolare quelle fossili, soddisfano tutti e tre i requisiti, sia pure in misura diversa. L'energia elettrica soddisfa il primo, il terzo e parzialmente anche il secondo requisito. L'energia termica soddisfa il primo requisito, ma soltanto quando è sotto forma di calore ad alta temperatura.

L'energia che arriva dal Sole viene convertita dalla fotosintesi naturale in energia chimica (cibo e combustibili).

Con tecniche artificiali si può facilmente convertire la luce solare in energia elettrica o in calore a bassa temperatura, più difficilmente in calore ad alta temperatura.

I tentativi di convertire artificialmente l'energia solare in combustibili sono ancora oggetto di ricerca.

Il solare termico

La conversione dell'energia solare in calore a bassa temperatura si può ottenere mediante i *collettori solari* o *pannelli solari termici* (da non confondere con i pannelli fotovoltaici, di cui parleremo più avanti). Questi collettori contengono tubi di rame dove un liquido riscaldato dalla luce solare è utilizzato per scambiare calore con una riserva d'acqua (figura 17).

Un collettore di circa 3 m^2 è sufficiente, alle nostre latitudini, per fornire acqua calda a uso domestico per una famiglia media. Con superfici più

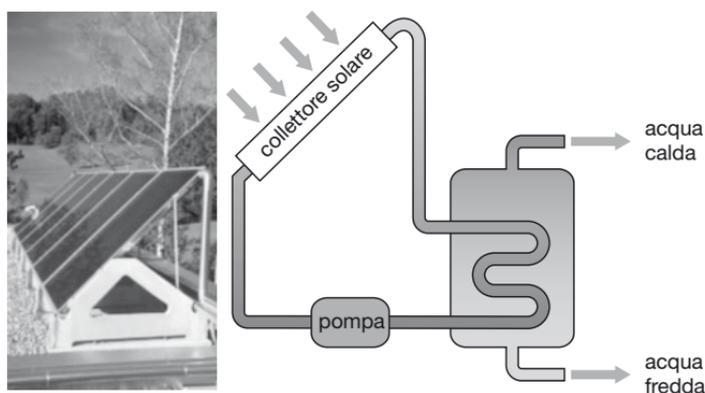


Figura 17. Collettori solari per la produzione di acqua calda per uso domestico e uno schema del loro funzionamento. Foto: foto.fritz/Shutterstock

estese di pannelli si può alimentare anche un impianto di riscaldamento a pavimento per gli edifici.

Un collettore solare ha una durata di almeno 30 anni, richiede soltanto piccole manutenzioni e in due anni produce una quantità di energia pari a quella che è stata necessaria per fabbricarlo. Si tratta di una tecnologia semplice, affidabile e poco costosa, grazie anche agli incentivi promossi da molti governi. In alcune regioni europee le nuove abitazioni indipendenti hanno per legge l'obbligo di installazione dei collettori solari.

La potenza installata mondiale di collettori solari termici era di 50 GW nel 2000, 240 GW nel 2010 e ha raggiunto i 435 GW alla fine del 2015, con un'area di collettori che ha superato i 600 milioni di metri quadrati. L'energia generata in un anno, 357 TWh, è pari a quella che avrebbero fornito 38,4 milioni di tonnellate di petrolio, il cui uso avrebbe generato 124 milioni di tonnellate di CO₂.

L'uso dei collettori solari comporta, indirettamente, anche un risparmio elettrico. Nelle case moderne infatti si usano grandi quantità di energia elettrica per scaldare l'acqua nelle lavatrici e nelle lavastoviglie.

Il solare termico è una tecnologia che non consuma suolo, non presenta pericoli di alcun tipo e non crea danni ambientali. I materiali utilizzati sono tutti riciclabili.

Nel nostro Paese l'uso dei pannelli solari per il riscaldamento dell'acqua domestica è ancora desolatamente basso: nel 2014 (dati 2016) la superficie attrezzata a pannelli solari era di 66 metri quadrati per ogni 1000 abitanti, 10 volte meno dell'Austria

e ben lontana dall'obiettivo dei 450 m² per 1000 abitanti previsti per il 2020.

È da notare poi che buona parte degli impianti solari italiani si trovano in Alto Adige, non nel più soleggiato Mezzogiorno. Persino l'acqua calda delle docce degli stabilimenti balneari italiani è spesso ottenuta bruciando idrocarburi (GPL): un sintomo esemplare di un Paese incapace di guardare al futuro.

Il fotovoltaico: dalla luce all'elettricità

Il processo fotovoltaico consiste nella conversione diretta dell'energia luminosa del Sole in energia elettrica. Questa conversione avviene nelle *celle fotovoltaiche*, dove l'assorbimento di luce da parte di un materiale semiconduttore provoca una corrente di elettroni.

Singole celle fotovoltaiche collegate tra loro formano moduli che sono assemblati in dispositivi più ampi, chiamati *pannelli fotovoltaici*.

Nei pannelli più diffusi l'elemento fotoattivo è silicio cristallino drogato con piccolissime quantità di elementi chimici come boro o fosforo, che converte l'energia solare in energia elettrica con una efficienza del 15–20%.

Il fotovoltaico un tempo era usato soltanto nei satelliti artificiali, in luoghi isolati come i rifugi di alta montagna o in apparecchi che necessitano di piccole quantità di energia, come le calcolatrici portatili. Negli ultimi 15 anni si è diffuso invece su larga scala.

Il grande vantaggio del fotovoltaico è quello di generare energia là dove serve, in qualsiasi luogo illuminato dal Sole. Perciò si va rapidamente diffondendo nei Paesi in via di sviluppo, rendendo possibile un grande salto di civiltà per 1,4 miliardi di persone che non hanno accesso alla rete elettrica.

Con un piccolo pannello fotovoltaico appeso fuori dalla capanna ed equipaggiato con batterie ricaricabili (figura 18) una famiglia ottiene due risultati prima impensabili: si libera dalla schiavitù del buio notturno e può utilizzare un telefono per avere contatti sociali, consultare le previsioni del tempo, scegliere il giorno migliore per recarsi al mercato.

Allo stesso tempo il fotovoltaico è sempre più usato anche nei Paesi sviluppati per fornire elettricità ad abitazioni e industrie che possono scambiare energia con la rete in base ad accordi tariffari



Figura 18. I pannelli fotovoltaici danno accesso all'elettricità anche nelle zone più povere. Foto: Fotos593/Shutterstock

con le aziende elettriche, prelevando energia quando l'autoproduzione è insufficiente e immettendo in rete l'eventuale eccesso di energia prodotta.

Contrariamente a quanto si crede, il fotovoltaico, grazie alla sua alta efficienza, non richiede superfici troppo grandi. Per soddisfare il fabbisogno di elettricità di una famiglia media alle latitudini italiane basta un'area di circa 20 m² di pannelli fotovoltaici, che possono essere connessi a sistemi di accumulo oppure collegati alla rete di distribuzione elettrica.

Si è calcolato che, utilizzando pannelli con una efficienza di conversione del 10% (ma oggi siamo già al 15–20%), si potrebbe soddisfare l'intero fabbisogno elettrico europeo con pannelli fotovoltaici ricoprendo in media lo 0,6% della superficie dei vari Stati. Per l'Italia servirebbero 2400 km², un'area estesa quanto la provincia di Piacenza.

Il grande vantaggio del fotovoltaico è che può essere installato su superfici non altrimenti utilizzate: i 700 000 capannoni industriali presenti nel nostro Paese, i tetti dei centri commerciali e delle abitazioni, i parcheggi, le pareti antirumore delle autostrade e i terreni aridi. Si tratta di energia che il Sole ci invia in ogni caso: se non la utilizziamo, va semplicemente perduta.

La tecnologia degli impianti fotovoltaici è ormai ben collaudata: i pannelli hanno una durata di almeno 25–30 anni, con una piccola riduzione di efficienza (< 1% l'anno), e a fine vita sono riciclabili al 95%. In 1–2 anni generano l'energia spesa per produrli (EROI, *energy return on investment*, di cui parleremo nel capitolo 9).

La diffusione dei sistemi fotovoltaici è stata promossa da incentivi statali in molti Paesi, compresa l'Italia, ma ormai è in grado di svilupparsi senza alcun aiuto finanziario.

Con 295 GW di potenza globale installata, alla fine del 2016 il fotovoltaico generava già una quantità di energia paragonabile a quella prodotta da circa 50 centrali nucleari o a carbone da 1000 MW. La produzione è relativamente modesta ma sta crescendo al ritmo del 30% l'anno. Grandi impianti fotovoltaici sono in costruzione anche nei Paesi del Medio Oriente, ricchi di petrolio.

L'85% del fotovoltaico installato nel mondo usa pannelli in cui il materiale fotoattivo è una sottilissima lamina di silicio. Negli ultimi 10 anni la quantità di celle fabbricabili con un lingotto di silicio puro è aumentata del 50%, grazie al progresso tecnologico che ha permesso di ridurre lo spessore della lamina da 320 a 180 micrometri; e tra breve si raggiungeranno spessori di 150 micrometri, usando il taglio con fili diamantati.

Nel frattempo continua ad aumentare anche l'efficienza nella manifattura e nel funzionamento dei moduli, con un'ulteriore riduzione del 25% circa nell'uso di energia in fase di fabbricazione, a parità di potenza prodotta. Nei prossimi 10 anni si dovrebbe affermare il sistema di raffinazione del silicio tramite letto fluido, oggi ancora poco diffuso, che richiede soltanto il 10-20% dell'energia necessaria con il procedimento tradizionale.

I leader mondiali del settore fotovoltaico sono Cina, Germania e Giappone, che raccolgono i frut-

ti di una lungimirante scelta industriale di innovazione compiuta più di vent'anni fa. Gli Stati Uniti stanno cercando di recuperare il terreno perduto, lanciandosi nella corsa al fotovoltaico di seconda generazione basato su celle solari a film sottile, che utilizzano materiali anche diversi dal silicio.

L'Italia gode di un'ottima insolazione, particolarmente nelle regioni del Sud. Nel nostro Paese il fotovoltaico ha conosciuto un rapido sviluppo dal 2010 al 2013, anche grazie agli incentivi economici statali. Finiti gli incentivi c'è stata una brusca frenata, ma poi il fotovoltaico è tornato a crescere, anche se ostacolato da norme burocratiche talvolta vessatorie. Ormai ha raggiunto la *grid parity* (cioè la competitività economica) con i combustibili fossili, anche senza calcolare le esternalità, ossia i danni risparmiati alla collettività in termini di salute e ambiente.

Nel 2015, con 18,9 gigawatt di potenza fotovoltaica installata, capace di coprire quasi l'8% dei nostri consumi elettrici, eravamo il quinto Paese al mondo dietro a Cina, Germania, Giappone e Stati Uniti.

Nel giugno 2016 in Italia si è toccato un importante traguardo simbolico: la produzione di elettricità è stata coperta per il 50,5% da fonti di energia rinnovabile. Era dagli anni Sessanta che non accadeva, ma rispetto ad allora il quadro è radicalmente cambiato: all'epoca era l'idroelettrico a farla da padrone e la produzione annua di energia elettrica era circa un terzo di quella attuale.

Nei primi sei mesi del 2016 l'idroelettrico ha rappresentato invece soltanto il 39% della produzione

rinnovabile; il resto è venuto da fotovoltaico (21%), eolico (19%), biomasse (16%) e geotermico (5%).

Una tecnologia dirompente

Il fotovoltaico è oggi considerato una «tecnologia dirompente» perché sta cambiando in modo radicale il modo di produrre e distribuire elettricità e, di conseguenza, il modo di vivere sia nei Paesi sviluppati sia in quelli poveri.

Nel settore del fotovoltaico c'è un'intensa attività di ricerca e sviluppo. In laboratorio, con materiali e tecniche speciali (celle *tandem*) si sono già ottenute efficienze superiori al 40%, mentre il prezzo dei moduli commerciali continua da decenni a diminuire in modo molto rapido (figura 19).

Oggi un modulo con efficienza del 18–20% costa la metà rispetto a un modulo meno efficiente di 3–4 anni fa. In certi Paesi africani e sudamericani, nelle gare d'appalto per le nuove centrali elettriche il fotovoltaico è offerto a 2,9 centesimi di dollaro per kWh, la metà del prezzo offerto per il carbone.

In futuro le celle fotovoltaiche saranno sempre più sottili e, sfruttando nuovi materiali e tecnologie simili a quelle oggi usate per la stampa, sarà possibile realizzare su scala industriale pannelli flessibili da installare sulle pareti degli edifici e anche sulle automobili. Ulteriori ricerche potrebbero portare a materiali per celle solari spalmabili come vernici.

Nel 2015 la Hanergy, azienda cinese produttrice di fotovoltaico a film sottile, ha presentato al salo-

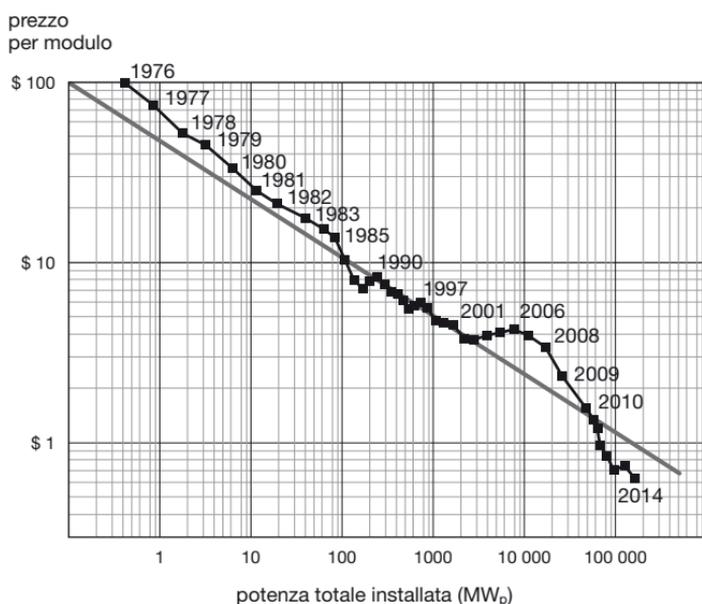


Figura 19. La linea retta è la «legge di Swanson»: il prezzo di un modulo fotovoltaico si riduce del 20% per ogni raddoppio della quantità di pannelli installati. Fonte dei dati: ITRPV, International Technology Roadmap for Photovoltaic

ne dell'auto di Pechino la «Hanergy Solar R», una vettura che, secondo i produttori, potrà percorrere 20000 km l'anno alimentata da pannelli ultrasottili e ultraleggeri di arseniuro di gallio a doppia giunzione (efficienza: 31,6%) posti sul tetto e sul cofano.

La crescita del fotovoltaico trascina la crescita dei sistemi di accumulo. Per i pannelli neppure i più ottimisti avevano previsto un crollo dei prezzi come quello che si è verificato e che tuttora continua. La stessa cosa sta accadendo per le batterie, in particolare per le più diffuse, quelle al litio.

Nel 2009 la Deutsche Bank aveva previsto che il costo delle batterie al litio sarebbe diminuito da 650 a 325 dollari per kWh nel 2020; invece già alla fine del 2015 il costo era sceso a 300 dollari e ora si prevede che nel 2020 sarà di 170 dollari.

Un'auto elettrica che percorre 6 km per ogni kWh di elettricità immagazzinata richiede una batteria da 50 kWh per avere un'autonomia di 300 km. Nel 2020 una batteria del genere costerà circa 8000 dollari e questo renderà competitivo il prezzo delle auto elettriche rispetto a quelle a benzina, anche grazie al minor costo di gestione e manutenzione. L'uso di batterie per accumulare elettricità diventerà competitivo anche per usi domestici e di altro tipo.

Nei Paesi sviluppati la sinergia di sviluppo fra fotovoltaico, accumulatori, sensoristica e informatica causerà una rivoluzione nel settore dei trasporti: le auto alimentate da combustibili fossili sono destinate a lasciare il passo alle auto elettriche a guida autonoma, cioè prive di conducente.

Il fotovoltaico è la tecnologia più efficiente per convertire la luce del sole in energia pronta per gli usi finali. Basti pensare che la fotosintesi naturale, che converte l'energia solare in energia chimica, ha normalmente un'efficienza dello 0,1-0,2%, cioè 100-200 volte inferiore a quella del fotovoltaico. La grande efficienza del fotovoltaico fa dire a molti esperti che non c'è bisogno di aspettare sviluppi miracolosi nel campo delle energie rinnovabili: il miracolo c'è già ed è, appunto, il fotovoltaico al silicio.

Lo sfruttamento dell'energia solare non pone problemi tecnici, sociali e ambientali, come inve-

ce accade per i combustibili fossili. In Ruanda, per esempio, in meno di un anno si è costruito un impianto fotovoltaico da 8,5 MW che genera energia per 15 000 case e ha creato 350 posti di lavoro.

Al forte sviluppo del fotovoltaico contribuiscono anche i piccoli impianti domestici, che sono sempre più facili da installare. Si stanno anche sviluppando sistemi *plug-and-play* che permetteranno all'utente di comprare in negozio l'impianto e montarlo poi a casa in poco più di un'ora.

La capacità globale installata di fotovoltaico nel 2016 è aumentata del 31% rispetto al 2015 e si prevede che raggiungerà i 750 GW nel 2020 e i 4500 GW nel 2050. Naturalmente è auspicabile che questo sviluppo avvenga secondo i principi dell'economia circolare (capitolo 10).

Si prevede che nel 2050 sarà necessario smaltire oltre 60 milioni di tonnellate di vecchi pannelli, secondo precise norme di riciclo/riuso che l'Unione Europea ha già predisposto. Dal riciclo si ricavano materiali la cui produzione richiederebbe altrimenti molta energia, come l'alluminio, il rame e il vetro. Non è ancora chiaro se converrà riutilizzare anche il silicio al posto di quello vergine, visto che occorrerebbe comunque raffinarlo, con forte consumo di energia.

Le molecole di clorofilla delle foglie, che fanno la fotosintesi naturale, si auto-rimpiazzano quando sono degradate; in modo simile, i pannelli fotovoltaici producono energia che può poi essere usata per la loro rigenerazione. Così anche nella *stereosfera*, cioè nella materia allo stato solido, si ha

una sorta di «metabolismo»: sia la biosfera sia la stereosfera usano la luce solare come fonte di energia per far funzionare un ciclo che trae dall'ambiente i necessari nutrienti (CO_2 per la biosfera e SiO_2 per la stereosfera).

Il solare a concentrazione

La conversione dell'energia solare in energia elettrica si può ottenere anche sfruttando l'energia meccanica del vapore generato da un liquido portato a temperature di centinaia di gradi, come accade nelle centrali tradizionali.

Per ottenere le alte temperature necessarie si possono focalizzare i raggi solari su una caldaia mediante un campo di specchi o, più semplicemente, si possono usare collettori parabolici lineari che concentrano la luce su un tubo dove circola un fluido che assorbe il calore. Il fluido è costituito da sostanze (per esempio sali fusi) che possono rimanere ad alta temperatura per molte ore, tanto da essere utilizzabili anche di notte.

Il solare a concentrazione è una tecnologia particolarmente adatta ai luoghi desertici. Non presenta pericoli di alcun tipo e non crea danni ambientali. I materiali usati sono tutti riciclabili.

In Italia c'è un piccolo impianto solare di questo tipo (5 MW) a Priolo in Sicilia, frutto di un progetto congiunto tra Enel ed Enea. In Spagna nel 2015, fra giugno e settembre, gli impianti solari a concentrazione (con una potenza collettiva

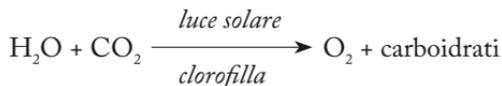
di 2300 MW, di cui 800 stoccabili) hanno fornito quasi il 4% della richiesta di energia elettrica.

Impianti solari a concentrazione vanno diffondendosi anche in alcuni Paesi africani, particolarmente in Marocco dove nel 2018 i 580 MW di capacità programmati forniranno elettricità per oltre un milione di persone.

Tra i modi in cui si potrebbe utilizzare il calore ad alta temperatura di origine solare c'è anche la produzione di idrogeno mediante scissione termica dell'acqua. Del possibile uso dell'idrogeno in campo energetico parleremo più avanti.

Dalla luce all'energia chimica: la fotosintesi naturale

La fotosintesi naturale è un processo che avviene nelle piante: la luce del Sole è assorbita dalle molecole di clorofilla e con la loro mediazione trasforma sostanze a basso contenuto energetico (acqua, H_2O , e anidride carbonica, CO_2) in sostanze ad alto contenuto energetico (ossigeno, O_2 , e carboidrati contenuti nei prodotti vegetali):



La fotosintesi naturale, che in ultima analisi trasforma la luce solare in energia chimica, è anche il processo che indirettamente ci ha regalato i giacimenti dei combustibili fossili (carbone, petrolio e gas naturale). Queste sostanze infatti si sono for-

mate nel sottosuolo in seguito alla trasformazione di organismi vegetali e animali, mediante processi chimici molto complessi avvenuti nel corso di centinaia di milioni di anni.

Come abbiamo già ricordato la fotosintesi naturale continua ancora oggi a produrre combustibili fossili, ma lo fa a un ritmo immensamente più lento di quello con cui li consumiamo.

La fotosintesi naturale può convertire al massimo circa il 5% dell'energia della luce solare in energia chimica, ma con poche eccezioni, come la canna da zucchero in Brasile e in altre regioni tropicali, l'efficienza di conversione è molto minore dell'1%. Per esempio, nel caso del granoturco è circa dello 0,2%.

Il processo fotosintetico naturale è molto complesso, ma il suo meccanismo è stato in gran parte compreso grazie agli studi compiuti negli ultimi decenni. I primi stadi sono i seguenti:

1. la luce è assorbita dalle foglie mediante un sistema organizzato di molecole di clorofilla, che passano così a uno stato elettronico eccitato;
2. l'energia elettronica è trasferita e convogliata, un po' come in una antenna, su un sito detto *centro di reazione*;
3. in questo sito l'energia è utilizzata, in tempi estremamente brevi (dell'ordine del picosecondo, 10^{-12} s), per separare cariche elettriche di segno opposto: un «più» da una parte, un «meno» dall'altra.

Ottenuto questo primo risultato, il processo nelle foglie continua con una serie molto complessa di reazioni che portano alla formazione di ossigeno e

carboidrati. Il tutto può avvenire grazie a una precisa organizzazione molecolare, frutto di miliardi di anni di evoluzione: organizzazione nello *spazio* (giuste distanze fra le varie molecole coinvolte nel processo), nel *tempo* (alcune reazioni devono essere molto più veloci di altre e devono avvenire in tempi estremamente brevi) e nell'*energia* (ogni stadio del processo avviene utilizzando una parte dell'energia fornita dalla luce solare).

Biomasse tradizionali e biocombustibili

La *biomassa*, cioè la materia organica che è il prodotto finale del processo di fotosintesi naturale, può essere usata per soddisfare tre bisogni fondamentali dell'uomo: cibo, energia e materiali.

La biomassa sotto forma di legna da ardere fornisce ancora oggi gran parte della energia termica per usi domestici nelle nazioni meno sviluppate.

Ma sono biomassa anche i residui di attività agricole e forestali, gli scarti delle industrie alimentari, i liquidi reflui derivanti dagli allevamenti, i rifiuti organici urbani e anche colture specificamente coltivate per la produzione di energia. Questi materiali possono essere riutilizzati per la fabbricazione di materiali di vario tipo (bioplastiche, biofibre, farmaci), per la generazione di energia elettrica e termica (*biopower*) e per la produzione di combustibili gassosi o liquidi (biocombustibili).

Nel 2014 i biocombustibili su scala globale hanno fornito lo 0,8% dell'energia di uso finale. Nel

2015 hanno generato elettricità per 464 TWh, con un aumento soltanto dello 0,9 % rispetto al 2014. Nel decennio precedente invece il tasso medio di aumento annuo era stato notevole (14,3%).

Il *biogas* si ottiene per fermentazione anaerobica di residui organici di varia origine (liquami zootecnici, fanghi di depurazione, scarti agro-industriali); è costituito prevalentemente da metano (50–80%) e, dopo opportuno trattamento, può essere immesso nella rete di distribuzione del gas naturale e usato come tale. La produzione di biometano è un ottimo modo per utilizzare rifiuti. In alcuni Paesi europei il biometano costituisce una parte importante dell'energia utilizzata per i trasporti.

Per la produzione di biocombustibili liquidi, in particolare bioetanolo e biodiesel, attualmente si usano colture dedicate come granoturco, barbabietole, colza, girasoli. Queste attività mettono la produzione di energia in diretta competizione con la produzione di cibo, in un mondo dove centinaia di milioni di persone soffrono ancora la fame e dove nei prossimi quarant'anni andranno aggiunti altri 2 miliardi di posti a tavola. Si è calcolato che per riempire con bioetanolo il serbatoio di un SUV si utilizza una quantità di mais sufficiente a nutrire una persona per un anno; per rimpiazzare i combustibili fossili con biocombustibili servirebbe una superficie di terreno doppia di quella attualmente usata per l'agricoltura in tutto il mondo.

Ma non è questo il solo problema dei biocombustibili: per rappresentare un'alternativa credibile ai combustibili fossili, essi devono fornire un

guadagno energetico e offrire benefici dal punto di vista ambientale.

Alcuni studi autorevoli indicano invece che l'energia fossile necessaria per far crescere le colture e convertirle in biocombustibili (aratura, semina, irrigazione, fertilizzazione, trasporto, trattamento industriale) è spesso superiore a quella poi ottenuta dall'uso del biocombustibile stesso, come vedremo meglio nel capitolo 9 (figura 20). Soltanto la produzione di etanolo derivato dalla canna da zucchero in Brasile risulta energeticamente sostenibile.

Secondo alcuni scienziati anche il bilancio ambientale è negativo. Infatti, anche se in teoria i biocombustibili sono CO₂-neutri, nel senso che la CO₂ prodotta dal loro uso è quella che hanno assorbito dall'ambiente per crescere, nella pratica non lo sono, a causa dell'energia che si deve fornire per la coltivazione. Se anche si trattasse di biomassa spontanea, occorre pur sempre raccoglierla, trasportarla e convertirla.

Un altro fattore ambientale negativo è che l'estensione di monoculture dedicate alla produzione di biocombustibili in certi Paesi causa deforestazioni e più generalmente distruzione di ecosistemi preziosi per l'equilibrio della biosfera.

Per tutte queste ragioni gli incentivi per la produzione di biocombustibili non vanno considerati stimoli per lo sviluppo di energie rinnovabili, ma piuttosto sussidi agli agricoltori.

Anche in Italia un sistema di incentivi errato sta trasformando l'agricoltura alimentare in agricoltura

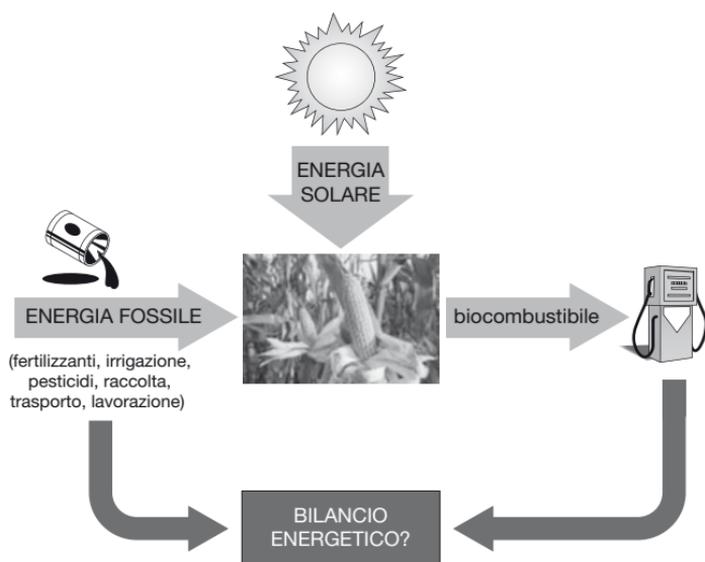


Figura 20. La produzione di biocombustibili richiede, oltre all'uso di terra fertile, anche grandi quantità di energia fossile. Foto: branislavpudar/Shutterstock

energetica; nel 2015 sono stati censiti 1300 impianti, corrispondenti a una potenza installata di 1000 MW_e. Nella Valle Padana decine di migliaia di ettari di terreno fertilissimo sono coltivati a mais per alimentare impianti a biogas, che dovrebbero invece funzionare impiegando soltanto scarti agricoli.

Da anni sono in corso ricerche per produrre i cosiddetti *biocombustibili di seconda generazione*, prodotti da biomasse ligneo-cellulosiche, che non sono in competizione con il cibo. Se queste ricerche avranno successo, i biocombustibili potranno dare un contributo non trascurabile, in particolare come carburante per il trasporto aereo, un settore in cui i combustibili liquidi sono praticamente impossibili da sostituire.

La fotosintesi artificiale

Agli inizi del secolo scorso, quando il petrolio e il gas naturale non erano ancora entrati nell'uso comune, lo sviluppo industriale e civile era basato essenzialmente sul consumo di enormi quantità di carbone, con grandi problemi di inquinamento atmosferico.

Già allora qualche scienziato si chiedeva perché mai l'uomo, per soddisfare il suo bisogno sempre crescente di energia, dovesse far ricorso alla «sporca energia solare fossile» e non alla energia pulita e abbondante che arriva con continuità dal Sole. Tra questi scienziati ha avuto un ruolo importante Giacomo Ciamician, professore all'università di Bologna dove oggi il Dipartimento di Chimica porta il suo nome.

Nel 1912 in una conferenza dal titolo «La fotochimica del futuro», presentata a New York all'ottavo Congresso internazionale di chimica applicata, Ciamician affrontò il problema dell'energia con parole che colpiscono per la loro lungimiranza. Disse per esempio:

La civiltà moderna è figlia del carbon fossile: l'uomo se n'è servito e se ne serve con crescente avidità e spensierata prodigalità per la conquista del mondo. La Terra ne possiede ancora enormi giacimenti, ma essi non sono inesauribili. Bisogna pensare all'avvenire.

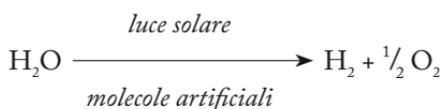
Affascinato dalla capacità delle piante di far uso della luce solare, Ciamician preconizzò il giorno in cui il loro segreto sarebbe stato svelato e usato dall'uomo per risolvere il problema dell'energia:

Selve di tubi di vetro e serre di ogni dimensione s'innalzeranno al Sole nelle zone desertiche e in questi apparecchi trasparenti si compiranno quei processi fotochimici di cui fino allora le piante avevano il segreto, ma che l'industria umana avrà saputo carpire: essa saprà farli ben altrimenti fruttare, perché la natura non ha fretta, mentre l'umanità è frettolosa. E se giungerà in un lontano avvenire il momento in cui il carbone fossile sarà esaurito, non per questo la civiltà avrà fine: perché la vita e la civiltà dureranno finché splende il Sole.

Se al carbone di Ciamician, che a quel tempo era praticamente l'unico combustibile usato, sostituiamo più in generale tutti i combustibili fossili, il ragionamento è del tutto attuale. L'inquietudine della nostra civiltà – che già Ciamician notava – è oggi accresciuta di fronte a problemi che appaiono ormai troppo complessi per essere governati: l'inquinamento della biosfera, l'effetto serra, la crescente disuguaglianza nella distribuzione del benessere, l'aumento della popolazione, il generale impoverimento delle risorse naturali.

Il segreto della fotosintesi naturale è ormai stato carpito ma l'umanità, che oggi ha ancor più fretta di allora, non è ancora riuscita a utilizzarlo per produrre combustibili artificiali mediante la conversione dell'energia solare. La realizzazione del sogno di Ciamician è oggi una delle sfide più importanti che la scienza ha di fronte per uscire dalla incombente crisi energetica ed ecologica.

La ricerca sulla fotosintesi artificiale mira alla produzione di combustibili partendo da sostanze molto diffuse come l'acqua o l'anidride carbonica. L'acqua dovrebbe essere scissa in idrogeno e ossigeno, secondo questo schema:



L'anidride carbonica potrebbe invece essere ridotta a metanolo, con la concomitante generazione di ossigeno. Ma poiché quest'ultimo processo è molto complicato già sulla carta, tutta l'attenzione dei ricercatori è concentrata sulla scissione dell'acqua in idrogeno e ossigeno, che permetterebbe di creare un ciclo chiuso per la produzione di energia.

Si parte da acqua, una molecola inerte a basso contenuto energetico (e proprio perciò abbondantissima sulla Terra), e si «inietta» in essa energia sotto forma di luce solare, ottenendo così la separazione dei due componenti, idrogeno (combustibile) e ossigeno (comburente), come schematizzato nella figura 21.

Quando questi due componenti vengono ricombinati in un processo di combustione (o in una cella a combustibile) essi producono energia termica (o elettrica) restituendo l'energia immagazzinata e formando, come unico prodotto, acqua. Per poter scindere l'acqua è però necessario l'intervento di sostanze capaci di assorbire la luce solare e di «mediare» il processo, come fa la clorofilla nella fotosintesi naturale.

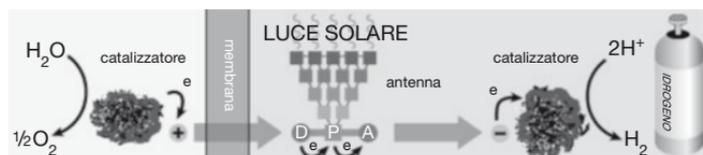


Figura 21. Uno schema del processo di fotosintesi artificiale

Alcuni obiettivi parziali sono stati recentemente raggiunti, ma ci sono molti problemi non ancora risolti, per esempio quello di trovare catalizzatori capaci di far avvenire i processi coinvolti nella generazione di idrogeno e ossigeno, alla fine della catena di reazioni. Ci vorranno parecchi anni e il lavoro di molti scienziati per giungere alla produzione di idrogeno dall'acqua per via fotochimica. Nel frattempo, però, sui mezzi di comunicazione di massa l'idrogeno è già diventato una leggenda.

Il sogno dell'idrogeno

Stando a quanto riportano alcuni giornali, l'idrogeno potrà risolvere tutti i problemi energetici: sarebbe una forma di energia abbondante, pulita e persino «democratica». Anche negli ambienti scientifici poco informati e in quelli politici che si documentano soltanto attraverso i quotidiani, si sentono discorsi che suonano più o meno così: «oggi siamo costretti a usare i combustibili fossili che sono in via di esaurimento e che producono anidride carbonica, responsabile dell'effetto serra, ma tra pochi anni potremo finalmente usare l'idrogeno, che non inquina perché quando lo si usa produce soltanto acqua».

Purtroppo le cose sono ben più complicate. Vediamo di capire perché.

L'idrogeno che serve per produrre energia è l'idrogeno molecolare, gassoso, di formula H_2 . È noto da più di duecento anni che quando l'idrogeno bru-

cia si libera energia, proprio come accade quando si bruciano gas naturale, petrolio e carbone. La grande differenza è che la combustione dei combustibili fossili produce anidride carbonica, mentre quella dell'idrogeno produce soltanto acqua:



Tra l'idrogeno e i combustibili fossili c'è però anche un'altra fondamentale differenza, che viene spesso dimenticata. I combustibili fossili sono risorse energetiche primarie, che si trovano in giacimenti naturali dai quali vengono estratti per poi essere usati. Sulla Terra invece non ci sono giacimenti di idrogeno molecolare.

Quello che è abbondante in natura è l'idrogeno *combinato* con altri elementi, per esempio con l'ossigeno nelle molecole dell'acqua. Spesso sui giornali si legge che «l'acqua sarà il carbone del futuro», e altrettanto spesso questa frase è accompagnata da una citazione di Jules Verne tratta da *L'isola misteriosa*:

E quando le riserve di carbone saranno finite, da dove trarrà l'uomo l'energia necessaria per far funzionare le sue macchine? Dall'acqua. Io penso che un giorno l'acqua sarà usata come combustibile e che l'idrogeno e l'ossigeno che la costituiscono, usati separatamente o assieme, forniranno una sorgente inesauribile di calore e di luce.

L'acqua in realtà, come l'esperienza comune ci conferma, non alimenta il fuoco ma lo spegne. L'acqua non «brucia», perché è già «bruciata». Bruciare, infatti, significa combinare una sostanza con

l'ossigeno: e l'idrogeno dell'acqua è già combinato con l'ossigeno.

Alcuni giornalisti tuttavia non si rassegnano: se anche ammettono che l'idrogeno non c'è, sostengono che lo si può estrarre facilmente dall'acqua. Niente affatto: se si vuole generare idrogeno dall'acqua, per esempio per via elettrochimica con l'elettrolisi, si deve spendere energia:



Si tratta della stessa quantità di energia che poi l'idrogeno può generare come calore quando brucia con l'ossigeno per ridare acqua. In conclusione l'idrogeno molecolare non è una fonte primaria di energia, per il semplice fatto che sulla Terra non c'è. Se lo si vuole usare, bisogna prima consumare energia per produrlo.

Non si può neppure dire che «l'idrogeno è pulito». In effetti è «pulito» oppure «sporco» a seconda della fonte di energia che si usa per produrlo. Utilizzare come combustibile idrogeno ottenuto da metano non offre alcun vantaggio per quanto riguarda l'impatto ambientale: il processo comporta la generazione della stessa quantità di anidride carbonica che si produce bruciando direttamente il metano. Analogamente, se si usa energia nucleare per produrre l'idrogeno, si hanno tutti i problemi connessi all'uso dell'energia nucleare.

La prospettiva cambia completamente se si trova un modo per produrre idrogeno dall'acqua usando una fonte di energia abbondante, rinnovabile e non inquinante come l'energia solare. Lo si

potrebbe produrre mediante la fotosintesi artificiale, un metodo che però, come abbiamo visto, è ancora al livello di studi di base. Si va sempre più affermando la possibilità di produrre idrogeno mediante elettrolisi dell'acqua con energia elettrica prodotta da pannelli fotovoltaici, come illustrato nella figura 22.

Quando sarà prodotto in modo sufficientemente economico, l'idrogeno potrà essere utilizzato come *vettore* energetico, non senza aver prima risolto altri problemi legati al fatto che è un gas difficile da trasportare, immagazzinare e usare.

Un grande vantaggio dell'idrogeno come vettore energetico sta nel fatto che esso si può scambiare direttamente con un altro importante vettore già largamente usato: l'energia elettrica. Infatti con l'elettricità si possono ottenere idrogeno e ossigeno

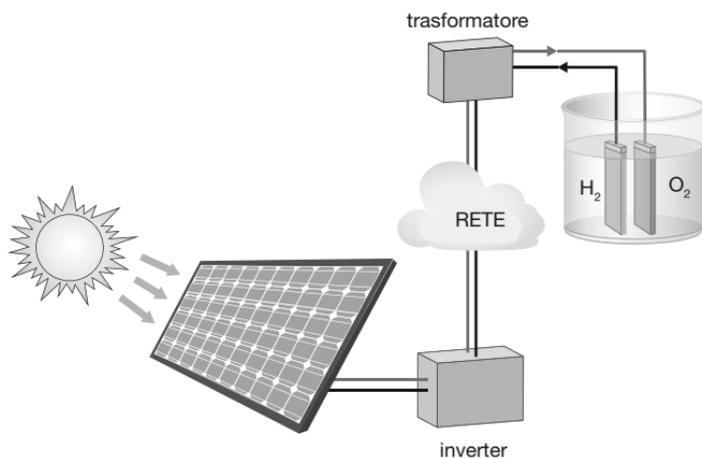


Figura 22. Uno schema della produzione di idrogeno tramite elettrolisi dell'acqua mediante energia elettrica prodotta dal fotovoltaico

mediante l'elettrolisi dell'acqua e, viceversa, usando i dispositivi chiamati *celle a combustibile*, da idrogeno e ossigeno si può ottenere energia elettrica. Fermo restando, però, che chi vuole usare l'idrogeno o l'energia elettrica deve prima «fabbricarseli».

In ogni caso, anche se ci vorrà ancora tempo, la produzione di idrogeno usando l'energia solare è la migliore soluzione che si prospetta per produrre combustibile per i trasporti. Tanto più che combinando l'idrogeno con anidride carbonica si possono poi ottenere combustibili liquidi come metanolo e idrocarburi liquidi.

CAPITOLO NONO

La transizione energetica

I problemi importanti sono sempre complessi e spesso pieni di contraddizioni. Bisogna quindi affrontarli globalmente, con saperi diversi che debbono interagire fra loro.

Edgar Morin

Nei precedenti capitoli abbiamo illustrato il concetto di energia e il crescente impatto di fonti e tecnologie energetiche sulla storia della civiltà e sull'equilibrio della biosfera.

Come abbiamo visto, i combustibili fossili sono ancora di gran lunga la fonte di energia preponderante, ma varie opzioni alternative sono diventate competitive e crescono con vigore, specialmente nella produzione elettrica.

Ora ci cimenteremo con gli scenari per il futuro, ben sapendo però che la storia delle previsioni in campo tecnologico ed energetico è costellata di insuccessi.

Quando apparvero le prime automobili, i commercianti di cavalli ridevano, certi che quelle scatole con le ruote non avrebbero mai avuto successo. Nel 1954 un autorevole scienziato dichiarò solennemente, alla presenza del presidente degli Stati Uniti, Eisenhower, che l'energia nucleare sarebbe

presto diventata troppo economica per poter avere un prezzo; fu probabilmente una delle predizioni più infelici della storia. È anche istruttivo rivedere oggi *Blade Runner*, film *cult* di fantascienza del 1982: la storia, ambientata tra il 2017 e il 2020, si svolge in una Los Angeles fortemente inquinata e dal clima impazzito, dove abbondano però telefoni con il filo, auto volanti e persone che fumano in continuazione, un gesto autolesionista ormai confinato ai margini della vita sociale.

Consapevoli che queste esperienze passate suggeriscono la massima prudenza, non vogliamo però sottrarci al difficile compito di delineare le prospettive e i limiti della più grande sfida scientifica e tecnologica che l'umanità dovrà affrontare nel ventunesimo secolo: la *transizione energetica* dalle fonti fossili alle fonti rinnovabili.

Questa sfida è molto difficile, ma non impossibile; la scienza e la tecnologia possono affrontarla e risolverla. Tuttavia questo non basterà: si tratta anche di una sfida etica, politica e sociale che richiede scelte lungimiranti per tener finalmente conto dei limiti fisici insormontabili della nostra casa comune, l'astronave Terra.

La transizione energetica richiede un cambiamento parziale dei nostri stili di vita, ma questo non significa che vivremo peggio: semplicemente vivremo in modo diverso. I cambiamenti maggiori riguarderanno probabilmente l'alimentazione e il nostro modo di muoverci e viaggiare. Per intenderci: meno carne, meno frutta fuori stagione e più trasporti pubblici.

Le energie rinnovabili possono bastare?

Questa è una domanda fondamentale e, forse l'avrete intuito, anche retorica. Infatti, non avremmo intrapreso la fatica di scrivere questo libro se le risorse rinnovabili non fossero sufficienti, in linea di principio, a coprire ampiamente il fabbisogno presente e futuro della nostra civiltà.

È difficile - e controverso - stabilire il reale potenziale delle risorse rinnovabili a disposizione sulla Terra. Una stima di questo tipo richiede accurate analisi tecniche, ambientali ed economiche.

In primo luogo occorre capire fin dove possiamo spingerci per catturare i flussi naturali delle energie rinnovabili (dette anche *perenni*, cioè inesauribili sulla scala temporale della civiltà umana).

Per esempio, il Sole invia sulla Terra una quantità di energia luminosa enormemente superiore al nostro fabbisogno, però tecnicamente non è possibile sfruttare tutta la superficie del pianeta (in particolare gli oceani, che lo ricoprono per due terzi).

Allo stesso modo, le viscere della Terra sono roventi ovunque, ma la stima del potenziale geotermico cambia enormemente a seconda della profondità massima che consideriamo raggiungibile trivellando la superficie terrestre.

In secondo luogo a questi limiti tecnici vanno aggiunti quelli ambientali (tutte le attività umane comportano impatti sulla biosfera, anche la produzione di energia rinnovabile) ed economici (quanto siamo disposti a spendere per produrre l'energia che ci serve?). La situazione è ulteriormente com-

plicata dal fatto che le condizioni tecniche ed economiche possono cambiare anche in modo rapido e imprevedibile, per via del progresso tecnologico o di mutamenti del quadro geopolitico.

Nonostante le incertezze del caso, vi è un diffuso consenso fra gli scienziati sul fatto che le energie rinnovabili siano ampiamente sufficienti per coprire il fabbisogno energetico della civiltà moderna, anche in un pianeta che nei prossimi decenni raggiungerà i 9-10 miliardi di abitanti.

Un quadro della situazione è descritto dalla figura 23. Il riferimento unitario è il cubetto nero, che rappresenta l'attuale fabbisogno energetico *primario* mondiale, cioè tutta l'energia consumata attualmente dall'umanità ogni anno. Gli altri cubi rappresentano sulla stessa scala i principali flussi rinnovabili presenti in natura.

I cubi in secondo piano rappresentano il potenziale teorico disponibile, quelli in primo piano (più piccoli) sono una stima dell'energia effettivamente utilizzabile tenendo conto dell'attuale quadro tecnico, ambientale ed economico.

La somma dei volumi dei cubi in primo piano è pari a quasi 25 volte il fabbisogno primario attuale. In linea di principio, quindi, il mondo potrebbe *già oggi* funzionare a energie rinnovabili.

A questo punto ci si potrebbe chiedere: ma perché allora ciò non accade? La ragione è che si tratta di un processo lungo e complesso; la transizione, però, è già iniziata.

Nel corso della storia sono già avvenute varie transizioni energetiche, con l'ascesa progressiva di

le potenzialità delle energie rinnovabili

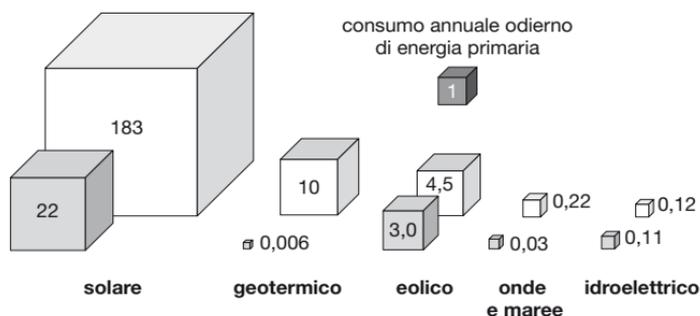


Figura 23. Il potenziale teorico annuale delle fonti energetiche rinnovabili (cubi bianchi) e la sua porzione già oggi tecnicamente sfruttabile (cubi grigi) confrontati con l'attuale consumo di energia primaria (cubetto nero). Questa stima è molto prudente rispetto ad altre che si trovano in letteratura. Fonte dei dati: N. Armaroli, V. Balzani, *Energy for a Sustainable World*, Wiley-VCH 2011

una nuova fonte che ha sostituito quella dominante, divenuta obsoleta: la legna fu progressivamente sostituita dal carbone e poi il carbone dal petrolio, che ora è insidiato dall'ascesa del gas.

Ognuno di questi processi ha richiesto decenni, e questa scala temporale va messa in conto anche per la transizione energetica attualmente in corso.

Oggi però la transizione non può essere guidata soltanto dal mercato e dallo sviluppo tecnologico: servono anche scelte politiche illuminate e tecnicamente fondate, che stanno faticosamente iniziando a emergere.

Perché questa volta abbiamo fretta, molta fretta: i cambiamenti climatici sono già in atto e minacciano di travolgerci.

Una quota energetica ideale

Per delineare un possibile cammino da oggi al 2050 è utile stabilire un livello «ideale» della domanda energetica globale, cioè un livello che - in linea di principio - possa garantire una buona qualità di vita a tutti i cittadini del mondo, e non soltanto a una minoranza di privilegiati.

Al di là dei principi morali, questo approccio si basa sull'osservazione della realtà: le disparità non sono più socialmente sostenibili neppure nei Paesi ricchi che, per esempio, hanno sempre più difficoltà nel gestire i flussi migratori da regioni limitrofe più povere. Le disuguaglianze sono ormai diventate la minaccia più concreta alla convivenza pacifica tra i popoli.

Un parametro utile per tracciare un percorso ragionevole per la transizione energetica è il *consumo annuo medio pro capite di energia primaria* di una data nazione (espresso in tep/anno, cioè in tonnellate equivalenti di petrolio all'anno).

Questo parametro risulta correlato in maniera praticamente identica con vari indicatori che descrivono la qualità della vita, come l'indice di sviluppo umano (HDI), la mortalità infantile, la longevità media o l'accesso all'istruzione.

La figura 24 mostra che la mortalità infantile diminuisce notevolmente all'aumentare del consumo di energia *pro capite*, fino a un valore di circa 1,5 tep/anno. Poi si verifica una forte inflessione: la tendenza positiva continua, ma in modo notevolmente decelerato, fino a circa 3 tep/anno. Oltre questo valore non vi è più ulteriore riduzione della

mortalità infantile; in molti casi, anzi, si riscontra un peggioramento.

Grafici come questo mostrano in modo chiaro che un consumo medio *pro capite* superiore a circa 2,8 tep/anno pro capite è semplicemente inutile.

In un pianeta con risorse finite, dove però si moltiplicano gli appelli ad aumentare i consumi, occorrerebbe far conoscere il più possibile questo fatto: quando superiamo un livello medio di consumo primario di circa 2,8 tep/anno a persona, stiamo soltanto sprestando energia e danneggiando la biosfera.

I dati sul consumo *pro capite* medio di energia di alcuni Paesi, riportati nella tabella 8, ci aiutano a disegnare un percorso ideale da qui al 2050.

Attualmente il consumo mondiale medio individuale si attesta a 1,8 tep/anno, un valore ancora

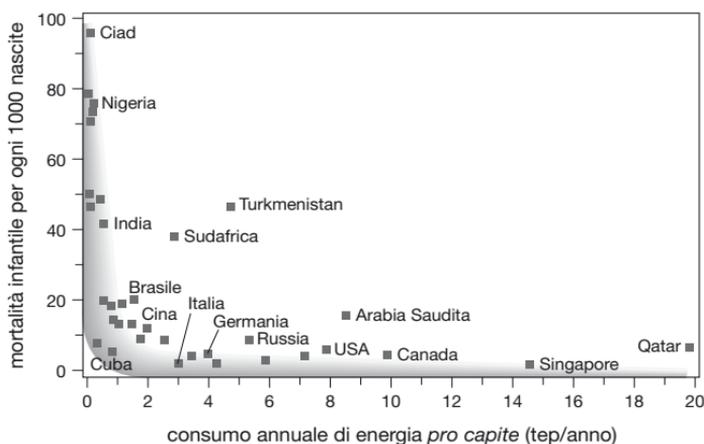


Figura 24. La mortalità infantile in funzione del consumo *pro capite* medio annuo di energia di alcune nazioni (fonte dei dati: US/DOE e ONU). L'andamento è del tutto analogo se, al posto della mortalità infantile, si esaminano altri parametri che descrivono la qualità della vita.

ben inferiore a quello «ideale», 2,8 tep/anno, che abbiamo indicato in precedenza.

Se nel 2050 tutti gli abitanti del mondo, stimando siano 9 miliardi, avessero a disposizione il valore ottimale di 2,8 tep/anno, il consumo complessivo di energia primaria salirebbe a 25,2 Gtep: sarebbe cioè circa doppio rispetto a oggi (tabella 8).

In linea di principio l'obiettivo non è impossibile; dopo tutto, negli ultimi 35 anni la domanda mondiale di energia è per l'appunto raddoppiata. La sfida però è enorme, perché l'ulteriore raddoppio dovrebbe essere accompagnato da una rimodulazione radicale del nostro mix energetico, con una drastica riduzione della dipendenza dai combustibili fossili e una redistribuzione più egualitaria del consumo energetico tra i vari Paesi, che sarebbe senz'altro desiderabile, ma è piuttosto improbabile.

Un'analisi dei dati della tabella 8 offre alcuni spunti interessanti.

Al Canada e agli Stati Uniti vanno «condonate» alcune condizioni oggettive sfavorevoli (inverni rigidi, estati calde, trasporti su lunghe distanze); tuttavia pare evidente che il loro consumo di energia oltrepassi ogni livello ragionevole.

Il consumo europeo è sostanzialmente più basso, ma ancora superiore al necessario; ciò giustifica gli obiettivi di riduzione dei consumi energetici fissati dall'Unione Europea nel corso degli anni.

La Cina è il più grande consumatore di energia, ma è ancora al di sotto della soglia che abbiamo stimato ottimale in termini di consumo medio individuale.

TABELLA 8. Il consumo annuale di energia in alcuni Paesi e nel mondo, dati complessivi e *pro capite*

	Mtep TOTALI	tep/ABITANTE
Canada	330	9,2
USA	2281	7,0
Francia	239	3,7
Unione Europea	1606	3,2
Italia	152	2,5
Mondo 2050 (proiezione, v. testo)	25 200	2,8
Cina	3014	2,2
Mondo 2015	13 147	1,8
Brasile	293	1,4
India	701	0,5
Etiopia	5	0,05

Infine ci sono tante nazioni il cui consumo è largamente inferiore a un livello di dignità. I dati per l'India e l'Etiopia nella tabella sono auto-esplicativi e possono aiutare a comprendere – forse meglio di tante analisi politiche ed economiche – i flussi migratori oggi in corso.

Nella tabella 8 è interessante notare che l'Italia, Paese industrializzato tra i primi 10 esportatori mondiali, riesce a unire elevati standard di vita al livello «ideale» di consumo energetico, nonostante i diffusi sprechi che possiamo notare nella vita quotidiana.

Occorre però sottolineare che il valore «ideale» che abbiamo citato per il consumo *pro capite* pri-

mario, 2,8 tep/anno, riflette l'attuale modesta efficienza della conversione energetica. Negli Stati Uniti, per esempio, meno del 40% dell'energia primaria è convertito in servizi energetici utili per il consumatore finale; il restante 60% è letteralmente buttato via, dissipato principalmente come calore.

Nel corso del ventunesimo secolo possiamo e dobbiamo far aumentare sensibilmente la nostra efficienza energetica. Se grazie a questo passassimo da 2,8 a 1,5 tep/anno di consumo primario, nel 2050 potremmo avere un consumo globale primario limitato a 13,5 Gtep, praticamente identico a quello attuale.

Un consumo *pro capite* di 1,5 tep/anno corrisponderebbe all'ambizioso obiettivo della «società a 2000 W», un modello sostenibile basato su efficienza, sostituzione e sobrietà attivamente perseguito dalla ricca Svizzera e che alcuni scienziati considerano raggiungibile.

Il collo di bottiglia dei materiali

Abbiamo già sottolineato il fatto che le energie rinnovabili, in particolare quelle solari dirette e indirette, possono abbondantemente fornire tutta l'energia di cui la civiltà moderna ha bisogno. In altre parole, lo sterminato flusso di fotoni che colpisce la superficie terrestre rende fattibile la transizione energetica.

È un'ottima notizia, ma non deve indurci a pensare che, in un futuro alimentato al 100% dalle rin-

novabili, potremo consumare o addirittura sprecare allegramente energia.

La ragione è semplice quanto disarmante: i flussi energetici rinnovabili, senza il supporto della tecnologia, hanno utilizzi molto limitati. Possono fornire per esempio calore a bassa temperatura (acqua calda) o azione meccanica elementare (mulini a vento, imbarcazioni a vela).

Ma la civiltà moderna ha bisogno di forme di energia *finale* - elettricità e combustibili - che siano flessibili, potenti e capaci di integrarsi a vicenda. Però, laddove un litro di benzina può conservarsi per secoli (se nessuno gli dà fuoco), l'elettricità invece è molto difficile da immagazzinare: le batterie infatti si scaricano in fretta, anche se non vengono usate.

Eccoci arrivati a una questione nevralgica per la transizione energetica: per convertire i flussi rinnovabili di energia primaria offerti dalla natura in energia per usi pratici, occorrono congegni e dispositivi materiali come pannelli fotovoltaici, pale eoliche e batterie.

Tutti questi dispositivi sono fabbricati con risorse minerali che non cadono dal cielo come la luce o il vento: vanno reperite in natura, scavando la crosta terrestre esattamente come accade per petrolio, carbone e gas. Anche le tecnologie rinnovabili, nonostante la straordinaria generosità del Sole, debbono quindi fare i conti con la limitata disponibilità di risorse dell'astronave Terra.

E sembra quasi che la natura si diverta a far dipendere le tecnologie energetiche più avanzate da risorse poco abbondanti, in particolare metalli rari.

Le pale eoliche, i pannelli fotovoltaici, le auto elettriche e le sorgenti di luce ad alta efficienza, per funzionare, necessitano infatti di elementi chimici relativamente rari sulla crosta terrestre, come neodimio, praseodimio, disprosio, litio, iridio, europio, terbio, argento, cerio, indio e germanio.

Per le loro proprietà chimico-fisiche (per esempio magnetiche, elettrochimiche, di assorbimento ed emissione di luce) questi elementi sono oggi – e resteranno probabilmente anche in futuro – difficilmente sostituibili.

La tavola periodica della figura 25 fornisce una visione immediata della relativa scarsità degli elementi (in grigio) più cruciali per la transizione energetica.

Un esempio può dare un'idea concreta del problema. Per convertire ad automobili elettriche tutto il parco veicoli italiano (37 milioni di mezzi), bisognerebbe aumentare del 60% la produzione elettrica rinnovabile nazionale: è un obiettivo ambizioso, ma sicuramente raggiungibile.

Purtroppo, però, quegli ipotetici 37 milioni di auto elettriche italiane richiederebbero un aumento di ben *10 volte* della produzione *mondiale* di litio per la fabbricazione delle batterie! Questo obiettivo è impossibile da raggiungere in pochi anni (anche se, fortunatamente, secondo le stime più recenti le risorse di questo prezioso metallo presenti nella crosta terrestre consentiranno un enorme aumento nella produzione di accumulatori elettrici ad alta efficienza).

L'esempio del litio fa capire che, nel complicato processo della transizione energetica, il collo di bottiglia non è costituito dai fotoni generati dal

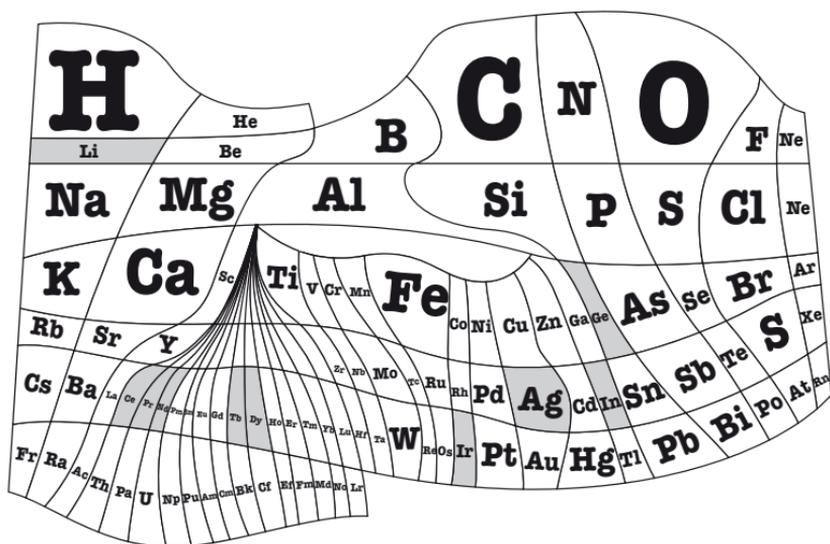


Figura 25. Ciascuna casella di questa tavola periodica ha un'area proporzionale all'abbondanza relativa di quell'elemento chimico nella crosta terrestre. Molti tra gli elementi necessari per fabbricare dispositivi di conversione e accumulatori di energia rinnovabile (caselle a sfondo grigio) sono relativamente rari. Fonte dei dati: W.F. Sheehan, Chemistry vol. 49, 1976

Sole, ma dagli atomi reperibili sulla Terra. Per risolvere questo problema c'è una sola possibile strategia: *riciclare, riciclare, riciclare*.

Se in futuro volessimo avere tutti un'auto elettrica, bisognerebbe che la produzione mineraria di elementi come il litio crescesse enormemente nella fase iniziale del nuovo ciclo industriale; nella fase successiva bisognerebbe poi riciclare massicciamente questi metalli.

Oggi, purtroppo, il tasso di riciclo dei metalli è ancora troppo basso, come mostra la figura 26. Occorre perciò un cambiamento radicale del paradigma economico e industriale: infatti, i rifiuti devono diventare preziose «risorse secondarie»,

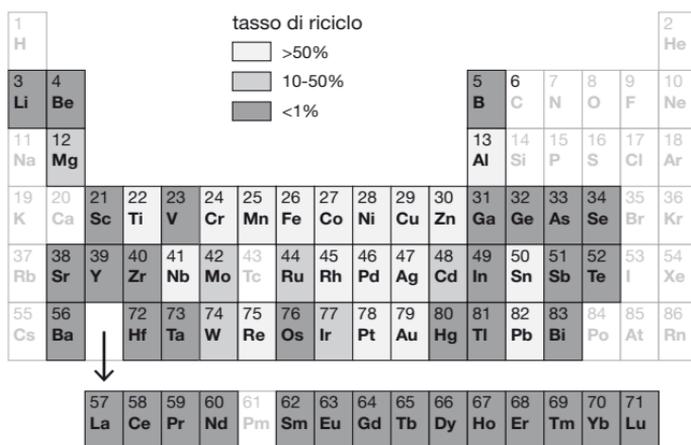


Figura 26. L'odierno tasso di riciclo dei metalli (per il riuso negli stessi impieghi per cui sono stati inizialmente estratti). Fonte dei dati: UNEP, Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente

anziché scarti inutili e dannosi per l'ambiente e la salute.

Però per riciclare i rifiuti, specie quelli elettronici, occorre spendere molta energia; questo conferma che l'energia è il problema dei problemi.

Un sistema energetico rinnovabile al 100% dovrà dunque riservare una quota importante della produzione per alimentare la cosiddetta *economia circolare*, che valorizza i rifiuti; ne ripareremo nel prossimo capitolo.

Il collo di bottiglia energetico: l'EROI

Se si vuole discutere di scenari energetici in modo scientifico, bisogna tenere presente che ogni forma di energia ha, a sua volta, un costo energetico.

La benzina che acquistiamo nel distributore vicino a casa, per esempio, ha già effettuato un lunghissimo viaggio: è stata estratta come petrolio in un giacimento situato in un altro continente, probabilmente a migliaia di metri di profondità in mare; il petrolio è stato raffinato in un impianto industriale e trasportato numerose volte, prima e dopo la raffinazione. Tutto questo ha comportato un consumo energetico.

Ora, affinché quella benzina sia effettivamente una *fonte* di energia, occorre che il suo contenuto energetico sia superiore all'energia già consumata «a monte». In caso contrario la benzina diventa essa stessa un *consumo* di energia, cosa che evidentemente non avrebbe alcun senso né fisico né economico.

Il problema si può descrivere quantitativamente usando il parametro chiamato EROI (*energy return on investment*), che è il rapporto tra l'energia che ottengo da una data fonte (E_{out}) e l'energia necessaria per renderla disponibile (E_{in}):

$$\text{EROI} = E_{\text{out}} / E_{\text{in}}$$

E_{out} rappresenta per esempio l'energia contenuta nel petrolio alla bocca del pozzo, oppure l'elettricità prodotta da un pannello fotovoltaico.

E_{in} descrive invece gli investimenti energetici che hanno permesso di rendere disponibile l'energia E_{out} : la ricerca dei giacimenti di petrolio, le trivellazioni, la fabbricazione e lo smaltimento dei dispositivi impiegati e anche, in linea di principio, l'energia necessaria per riparare i danni eventualmente causati, come le esternalità sanitarie.

In pratica, se l'EROI vale per esempio 50, significa che l'energia che ottengo da una data fonte è 50 volte superiore all'energia che devo investire per poterne disporre. Se invece l'EROI è uguale o inferiore a 1, significa che la «fonte» in realtà è un *dissipatore* di energia.

In genere E_{out} è facile da misurare; calcolare E_{in} invece è complicato: entrano in gioco così tanti fattori che la stima può diventare arbitraria.

La difficoltà nella stima quantitativa dell'EROI ha finora impedito di definire una metodologia di calcolo universalmente accettata. Si possono fare confronti affidabili dell'EROI per una stessa fonte di energia, come il petrolio proveniente da diverse aree geografiche; invece il confronto tra fonti di energia completamente diverse - per esempio, tra petrolio e vento - è più controverso.

Nel caso del petrolio, il cosiddetto EROI «alla bocca del pozzo» (cioè prima dei processi di trasporto e raffinazione) corrisponde al rapporto tra il numero di barili estratti e il numero di barili consumati nel processo di estrazione.

L'EROI del petrolio tende a diminuire nel tempo poiché, man mano che il giacimento si svuota, occorre prelevare a profondità sempre maggiori o effettuare operazioni che stimolino la produzione (come l'iniezione di acqua ad alta pressione), facendo così aumentare la spesa energetica E_{in} .

Si stima per esempio che l'EROI del petrolio negli Stati Uniti sia sceso all'incirca da 20 a 10 tra il 1970 e il 2013. Il petrolio da giacimenti marini in acque ultraprofonde ha un EROI probabilmente

inferiore a 10, mentre l'EROI per il petrolio «tight» (di cui abbiamo parlato nel capitolo 4) è mediamente stimato inferiore a 2.

Nel caso dell'energia solare l'EROI è definito dal rapporto tra l'energia prodotta da un dispositivo di conversione (come un modulo fotovoltaico) nel corso della sua vita operativa e l'energia utilizzata per fabbricarlo.

Al contrario di quanto avviene per i combustibili fossili, per le energie rinnovabili l'EROI tende ad *aumentare* nel tempo, perché i progressi tecnologici portano a un'ottimizzazione energetica dei processi di produzione industriale.

L'EROI è un parametro utile e intuitivo, ma va usato con cautela. In particolare occorre sempre chiarire i «confini» entro cui lo si stima.

Nel caso dei combustibili per i trasporti, per esempio, si dovrebbe considerare non soltanto l'energia necessaria per estrarre e raffinare il petrolio, ma anche quella spesa per portare il combustibile al punto di utilizzo e quella necessaria per mantenere le infrastrutture indissolubilmente legate all'uso del combustibile stesso (automobili, autostrade, ponti, reti di distribuzione commerciale).

Allo stesso modo, per stimare esaustivamente l'EROI di sistemi di produzione elettrica, si dovrebbe prendere in considerazione non soltanto l'energia spesa per fabbricare i convertitori (per esempio pannelli fotovoltaici, pale eoliche, turbine a vapore, alternatori), ma anche tutta l'energia dissipata nei processi di distribuzione e, eventualmente, di accumulo.

Si potrebbe poi scegliere di valutare anche il valore *sociale* delle varie fonti di energia, includendo nel calcolo dell'EROI parametri come l'energia del lavoro umano o l'energia necessaria per compensare l'impatto ambientale.

Un importante concetto correlato all'EROI è quello di *energia netta*, definita come la differenza tra E_{out} e E_{in} , cioè l'energia che effettivamente si guadagna:

$$\text{energia netta} = E_{out} - E_{in}$$

Se si divide l'energia netta per E_{out} , si ottiene l'energia guadagnata come percentuale del totale alla fonte:

$$\text{guadagno energetico percentuale} = \frac{\text{energia netta}}{E_{out}} = 1 - \frac{1}{\text{EROI}}$$

Come si può vedere nella figura 27, questo guadagno percentuale diminuisce rapidamente quando l'EROI scende sotto il valore 10; questa caduta repentina è spesso chiamata «baratro dell'energia netta».

La figura 27 mostra, per esempio, che un litro di combustibile con EROI pari a 100 eroga effettivamente (come energia netta) il 99% del proprio contenuto energetico alla società. Un litro di combustibile con un EROI pari a 2 eroga invece meno del 50% dell'energia disponibile alla fonte.

Questa dipendenza dell'energia guadagnata dall'EROI è il motivo per cui le quote di produzione di combustibili fossili da parte delle varie nazioni, pubblicate annualmente da aziende e agenzie internazionali, possono essere fuorvianti. Un au-

mento della produzione globale di petrolio, infatti, non corrisponde necessariamente a un aumento dell'energia disponibile alla società: se nel frattempo l'EROI è diminuito, l'energia disponibile può ridursi anziché aumentare.

Il grafico della figura 27 ha vari messaggi interessanti. Innanzitutto, le tecnologie energetiche tradizionali sono state caratterizzate da EROI elevati, superiori a 50 (al netto del costo energetico dei danni alla salute e al clima, che nessuno mai considera). Il prodigioso sviluppo economico e tecnologico che l'umanità ha conosciuto nell'ulti-

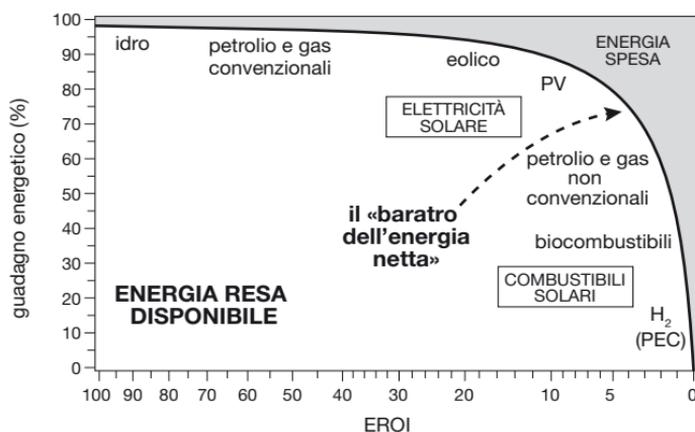


Figura 27. La percentuale di energia netta erogata come funzione dell'EROI per diverse forme di energia (PV = fotovoltaico). L'area grigia in alto e a destra rappresenta la porzione dell'energia alla fonte che occorre spendere per convertire l'energia primaria in energia utilizzabile. I valori dell'EROI indicati si basano su un vasto insieme di dati di letteratura. L'EROI per la produzione di idrogeno H₂ con celle fotoelettrochimiche (PEC), qui dedotto dai pochissimi studi oggi disponibili, è destinato ad aumentare in futuro grazie al progresso tecnologico.

mo secolo è anche il risultato di questo eccezionale – e forse irripetibile – dividendo energetico (a scapito dei danni inferti all'astronave Terra e ai suoi passeggeri).

Riguardo alle energie rinnovabili la buona notizia è che le tecnologie elettriche in maggiore espansione – eolico e fotovoltaico – si posizionano già al di sopra del baratro dell'energia netta, con valori di EROI stimati superiori a 10-20. Queste tecnologie si possono quindi già classificare a pieno diritto come *energeticamente sostenibili*, anche perché limitano drasticamente le esternalità sanitarie rispetto ai combustibili fossili.

Si noti però che i biocombustibili e anche l'idrogeno prodotto tramite processi di fotosintesi artificiale si trovano nel baratro dell'energia netta. Questo conferma che la produzione sostenibile di combustibili solari resta la sfida principale nella transizione energetica: per garantire un tenore di vita accettabile, infatti, non basta che l'EROI sia superiore a 1; occorre che sia il più elevato possibile, idealmente con valori ben fuori dal baratro (EROI > 5).

Il concetto è illustrato schematicamente nella figura 28. A sinistra si vede che, in un sistema economico basato su energia a elevato EROI, soltanto una piccola frazione dell'energia primaria estratta dev'essere reinvestita nel processo di produzione e distribuzione energetica: la maggior parte dell'energia è quindi veramente disponibile per l'economia.

Parte di questa energia netta sarà usata per soddisfare i bisogni primari (come cibo, abitazioni, lavoro, welfare, istruzione, organizzazione gover-

nativa), mentre la parte restante può servire per attività ricreative (come tempo libero, sport, consumi non essenziali) o per la crescita economica (come nuove attività produttive e infrastrutture).

Se l'EROI cala, tuttavia, una frazione più grande dell'energia prodotta deve essere reinvestita per mantenere il flusso di energia complessiva. Come si vede a destra nella figura 28, perciò, non resta che erodere l'energia disponibile per le attività ricreative e la crescita economica.

Un'ulteriore diminuzione di EROI porterebbe a una situazione in cui l'energia netta diventa insufficiente a coprire persino il fabbisogno energetico per i bisogni primari.

Il passaggio a fonti di energia a EROI più basso - per esempio, dal petrolio convenzionale «facile» a quello di scisto - ha quindi profonde implicazioni economiche per la società. Non solo: EROI minori comportano anche un'intensificazione del tasso di acquisizione di risorse naturali, con conseguente

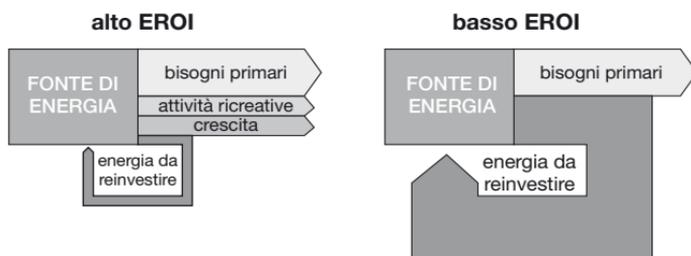


Figura 28. Il ruolo chiave del parametro EROI per la società. Quando l'EROI diminuisce, una porzione sempre più ampia della fonte energetica primaria deve essere reinvestita per rendere l'energia disponibile (freccia grigia scura); si riduce così la quota di energia a disposizione della società per la sostenibilità e il benessere sociale ed economico.

aumento del degrado ambientale. Questi concetti cruciali, purtroppo, sono spesso ignorati quando si discutono gli scenari della transizione energetica.

In conclusione, la gestione della complessa transizione energetica in corso richiede che il parametro EROI sia preso adeguatamente in considerazione, così da orientare le politiche energetiche basandole sull'evidenza scientifica e sul buon senso economico.

Infatti, il passaggio a tecnologie energetiche a EROI progressivamente più bassi evidenzia sempre più i limiti strutturali della crescita economica infinita.

Le scelte non sono tutte uguali

È ormai evidente che il tempo delle scelte decisive per la transizione energetica è adesso. Ed è altrettanto evidente che le scelte non sono tutte uguali.

Per capirlo basta pensare al caso dei trasporti: è il sistema che mostra la maggior inerzia al cambiamento, per una serie di ragioni sociali, tecniche ed economiche, a cominciare dalla sua capillare diffusione planetaria.

Uno studio recente ha analizzato in dettaglio le due alternative concrete ai combustibili fossili per il sistema dei trasporti su strada negli Stati Uniti: bioetanolo ed elettricità da fotovoltaico. Nella filiera del biocombustibile la biomassa prodotta dalla fotosintesi (mais) è convertita industrialmente in bioetanolo, da usare in motori a combustione interna. Nell'altro caso l'elettricità generata da pannelli

fotovoltaici è distribuita alla rete e immagazzinata nelle batterie che alimentano motori elettrici.

Lo studio ha calcolato l'efficienza di conversione energetica dei fotoni del Sole in energia meccanica delle ruote di un'automobile (*sun-to-wheels*) nei due casi.

Per il bioetanolo le efficienze dei vari passaggi sono: fotosintesi 0,2%, lavorazione industriale 47%, motore a combustione interna 27%. Il rendimento complessivo, dato dal prodotto delle tre efficienze, è un modesto 0,03% (soltanto 3 fotoni ogni 10 000 convertiti in energia utile!), principalmente a causa della bassissima efficienza della fotosintesi.

La filiera del fotovoltaico impiega un maggior numero di passaggi, ma tutti molto più efficienti: cella solare 8,4%, distribuzione di energia elettrica 92%, stoccaggio di energia elettrica nelle batterie 80%, motore elettrico 87%. L'efficienza complessiva è pari al 5,4%, cioè ben due ordini di grandezza superiore a quella del bioetanolo (per confronto, la benzina e il gasolio hanno efficienze di conversione «da giacimento a ruota» del 10-15%).

È chiaro che la scelta migliore per una mobilità alternativa ai combustibili fossili è l'auto elettrica, anche perché, con la tecnologia attuale, la coltivazione del mais per bioetanolo (che secondo alcuni studiosi ha addirittura un EROI negativo!) richiederebbe più del 100% delle terre arabili nazionali per soddisfare l'intero fabbisogno degli Stati Uniti. Invece la superficie da coprire con pannelli fotovoltaici, per ottenere un'energia equivalente, sarebbe

soltanto lo 0,7% delle terre arabili (in realtà basta molto meno, visto che si possono tranquillamente utilizzare superfici non coltivabili, in particolare tetti di edifici e infrastrutture).

È interessante anche notare che l'efficienza teorica massima per la filiera dei biocarburanti è stimata allo 0,35%, molto più bassa del rendimento già ottenibile oggi con auto elettriche alimentate da pannelli fotovoltaici.

In sintesi: la filiera del bioetanolo da mais negli Stati Uniti non ha senso oggi, né lo avrà mai.

Risultati altrettanto inequivocabili si ottengono facendo calcoli simili per l'Italia. Immaginiamo per esempio di avere un giardino e dedicarne un metro quadrato alla coltivazione di colza, usando poi l'intero raccolto annuale per produrre biodiesel che metteremo nel serbatoio di un'auto a gasolio. Su un altro metro quadrato di giardino possiamo invece un pannello fotovoltaico al silicio cristallino, usando poi l'intera produzione elettrica annuale per alimentare la batteria di un'auto elettrica.

Quanta strada riusciremo a percorrere nei due casi? Come è illustrato nella figura 29, l'auto elettrica coprirebbe una distanza 250 volte superiore rispetto all'auto a biodiesel. Il risultato si commenta da solo.

Dunque le scelte non sono tutte uguali e anche le loro conseguenze possono essere clamorosamente diverse. Soltanto un dialogo costruttivo tra scienziati e decisori politici può guidare la transizione energetica su binari ragionevoli.

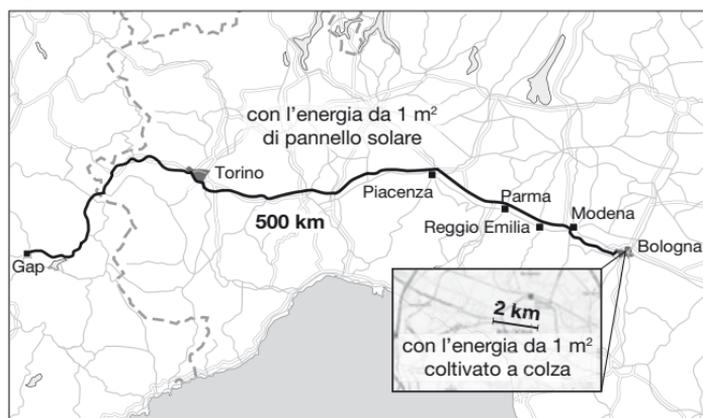


Figura 29. Un'auto a gasolio, usando il biodiesel prodotto in un anno da 1 m² di terreno coltivato a colza, si fermerebbe dopo 2 km. Un'auto elettrica, con l'elettricità prodotta in un anno da 1 m² di pannello fotovoltaico al silicio cristallino (con l'insolazione tipica dell'Italia settentrionale) può percorrere 500 km. Fonte dei dati: Giorgio Lulli e Caterina Summonte, IMM-CNR, Bologna

Scenari rinnovabili al 100% (o quasi)

Nell'ultimo decennio scienziati, centri di ricerca e agenzie internazionali hanno elaborato piani per una massiccia conversione alle rinnovabili di singole nazioni (Stati Uniti, Australia, Germania, Finlandia) e anche del mondo intero.

A livello di singole nazioni, il piano *Energiewende* («Transizione energetica») della Germania è quello allo stadio più avanzato. Fu approvato dal parlamento tedesco nel settembre 2010 e rafforzato alcuni mesi dopo, in seguito al disastro di Fukushima. L'obiettivo primario del piano è un cambiamento totale della politica energetica, basato su (a) un mercato incentrato sull'offerta e non più sulla

domanda di energia e (b) il passaggio da una produzione centralizzata a una distribuita, con energia elettrica prodotta da piccoli impianti diffusi sul territorio. Lo scopo è di abbattere la sovrapproduzione e gli sprechi per promuovere il risparmio energetico e l'efficienza del sistema.

Il piano tedesco prevede una riduzione delle emissioni di CO₂ rispetto al 1990 pari al 55% nel 2030 e a oltre l'80% nel 2050. A metà secolo le energie rinnovabili dovranno fornire il 60% dei consumi primari e l'80% di quelli elettrici e il consumo di energia primaria dovrà essere ridotto alla metà di quello del 2008, grazie all'aumento dell'efficienza e all'espansione dell'uso dell'elettricità.

I centri di ricerca, le università e le aziende tedesche sono parte integrante del progetto, che mira a garantire alla Germania la leadership mondiale della transizione energetica e a consolidare il suo ruolo di superpotenza manifatturiera. Tra le altre misure, il piano prevede l'uscita definitiva dal nucleare entro il 2022 e l'uscita dal carbone entro il 2050.

Nonostante goda di un vastissimo consenso popolare e sia appoggiato da tutti i principali partiti politici tedeschi, il piano *Energiewende* è stato anche oggetto di critiche.

C'è chi ritiene che i suoi costi, stimati in almeno 1000 miliardi di euro, siano proibitivi e c'è chi pensa sia utopistico rinunciare a una fonte energetica abbondante come il carbone, di cui la Germania ha consistenti riserve. I sostenitori però ribattono che i vantaggi per l'economia e i cittadini tedeschi saranno molto maggiori.

Al momento è impossibile prevedere se il piano raggiungerà i suoi obiettivi. L'unica certezza è che la Germania continua imperterrita sulla strada della *Energiewende*, e lo fa come «sistema Paese».

Viene da augurarsi che anche altre nazioni europee manifatturiere e povere di risorse, come l'Italia, non perdano questa occasione storica di sviluppo.

Tra i numerosi piani energetici saliti alla ribalta nel corso di questi anni il più celebre e ambizioso, e quindi anche il più controverso e criticato, è quello di Mark Jacobson, Mark Delucchi e colleghi delle università di Stanford e Berkeley (California), Berlino (Germania) e Aarhus (Danimarca).

Questo piano è chiamato wws (*wind, water, sunlight*) in quanto prevede unicamente l'utilizzo di vento, acqua e sole come sorgenti primarie nel 2050. Sono quindi esclusi il gas e il nucleare (usati invece come «energie-ponte» in alcuni piani concorrenti), i biocombustibili e le biomasse di qualsiasi tipo, le tecnologie per la cattura e la conversione della CO₂ e persino gli accumulatori elettrici.

Il piano wws viene periodicamente aggiornato; nella sua versione più recente propone un piano d'azione per la transizione energetica al 2050 di 139 Paesi, quasi il mondo intero. Le ambizioni del wws appaiono però oggettivamente eccessive; basti dire che per i trasporti su strada prevede l'uso esclusivo di veicoli elettrici o ibridi elettrico-idrogeno con celle a combustibile. Queste tecnologie sono raccomandate persino per i trasporti via mare su brevi distanze e per quelli aerei sino 1000 km.

Il piano prevede la messa in rete di 11,8 TW di elettricità rinnovabile, prodotta con il seguente mix di fonti: 48% da fotovoltaico, 37% da turbine eoliche, 10% da solare termico a concentrazione, 4% da idroelettrico, 1% da geotermico, moti ondosi e maree. A questo totale va aggiunto un ulteriore 6% di solare a concentrazione usato come tecnologia di accumulo.

Sostanzialmente il wws è un piano di conversione integrale del sistema energetico mondiale all'elettricità. Grazie alla maggiore efficienza dei motori elettrici rispetto a quelli a combustione, ciò permetterebbe una drastica riduzione dei consumi primari.

L'unico combustibile ipotizzato è l'idrogeno, prodotto essenzialmente da elettrolisi dell'acqua tramite fonti rinnovabili, e con un ruolo piuttosto ridotto. Il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici è previsto unicamente tramite pompe di calore elettriche, il solare termico è considerato come tecnologia di accumulo di calore nei picchi giornalieri di insolazione.

Secondo Jacobson e colleghi il piano creerebbe 24 milioni di posti di lavoro permanenti, eviterebbe ogni anno quasi 5 milioni di morti premature a causa dell'inquinamento e nel 2050 farebbe risparmiare ben 50000 miliardi di dollari l'anno, sotto forma di danni climatici e ambientali evitati.

Un piano di questa portata – che richiederebbe in 30-35 anni quasi due miliardi di nuovi dispositivi per la produzione di energia rinnovabile e investimenti per migliaia di miliardi – è utopistico, ma

ha il pregio di evidenziare le dimensioni quantitative della sfida che abbiamo davanti.

Il fiorire di progetti che mirano a dimostrare la fattibilità di un mondo rinnovabile al 100% conferma che siamo veramente in una fase storica cruciale per la transizione energetica e fa sperare in un'ulteriore accelerazione del processo.

Se si vuole ancorare un ragionevole ottimismo alla realtà complessa delle cose, però, occorre sottolineare alcuni punti-chiave:

1. la prima generazione di convertitori e accumulatori di energie rinnovabili viene oggi fabbricata utilizzando principalmente energie fossili. Soltanto nelle fasi successive si potranno produrre dispositivi rinnovabili usando le energie rinnovabili stesse e chiudendo così definitivamente l'era dei combustibili fossili. L'attuale fase di «inseminazione» richiederà una quota non irrilevante delle riserve fossili rimanenti e avrà un impatto sul clima e sull'ambiente che è difficile da stimare;
2. la disponibilità effettiva di risorse minerali e la capacità di riciclo delle filiere energetiche saranno fattori fondamentali per il successo di una transizione che possa garantire la salvaguardia della biosfera e una pacifica condivisione delle risorse energetiche;
3. occorre valutare con la massima attenzione se un mondo al 100% rinnovabile possa garantire valori di EROI sufficientemente alti, ossia compatibili con una civiltà tecnologicamente avanzata, in un pianeta abitato da oltre 9 miliardi di persone;
4. la transizione dovrà far gradualmente aumentare l'impiego dell'elettricità negli usi finali, a scapito dei combustibili (che oggi invece usiamo per il 75% circa). Questo è auspicabile, come previsto dal piano wws, perché già oggi abbiamo tecnologie rinnovabili avanzate per la produzione di elettricità - ma

- non di combustibili! - e perché i motori elettrici hanno un'efficienza almeno tripla rispetto a quelli a combustione interna;
5. La transizione energetica richiede un aumento poderoso degli investimenti in ricerca e sviluppo, un ammodernamento e consolidamento delle reti elettriche e dei sistemi di accumulo, un adeguamento dell'infrastruttura energetica globale e un cambiamento radicale del sistema dei trasporti, la progressiva uscita di scena dei motori a combustione per far spazio a veicoli elettrici. In pratica, tutto questo richiede una ristrutturazione del sistema finanziario ed economico internazionale;
 6. I Paesi più ricchi dovranno ridurre i propri consumi energetici, anche in maniera consistente.

In conclusione, la transizione energetica è una sfida possibile, affascinante e avvincente, ma non sarà una passeggiata. Siccome però non abbiamo alternative, non ci resta che impegnarci a fondo per realizzarla.