

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 generato dalla produzione e dal consumo di energia sull'equilibrio della biosfera. Come abbiamo visto, i combustibili fossili sono ancora di gran lunga la fonte di energia primaria preponderante, ma varie opzioni alternative sono diventate competitive e crescono con vigore, specialmente nella produzione di energia elettrica.

Ora proveremo a delineare alcuni scenari per il futuro, consapevoli 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 sarebbero durate. Nel 1954 un autorevole scienziato dichiarò solen-

nemente, alla presenza del presidente degli Stati Uniti, che l'energia nucleare sarebbe presto diventata troppo economica per poter avere un prezzo. Fu probabilmente una delle previsioni meno azzeccate della storia dell'energia.

Queste errate previsioni suggeriscono la massima prudenza, ma non vogliamo 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, condizione essenziale per evitare il collasso climatico e una crisi profonda della civiltà moderna.

È una sfida molto difficile, ma molti fra gli ostacoli scientifici e tecnologici che essa comporta non sono insormontabili. Questo però non basterà: si tratta anche di una sfida politica, economica, etica e sociale che ci impone di avere ben presenti i limiti fisici della nostra casa comune, l'Astronave Terra. E di considerare che viviamo in un mondo complesso, con una grande varietà di condizioni socioeconomiche e culturali.

La transizione energetica richiede anche un cambiamento di abitudini e stili di vita comuni a molte persone, in particolare quelle che oggi godono delle migliori condizioni socioeconomiche. Questo non significa che vivremo peggio: semplicemente, vivremo in modo diverso.

Le energie rinnovabili possono bastare?

Questa è la domanda fondamentale ma evidentemente, per noi, è una domanda retorica. Non avremmo infatti intrapreso la fatica di scrivere questo libro – e di aggiornarlo tre volte nel corso di quasi un ventennio – se le risorse rinnovabili non fossero sufficienti, in linea di principio, a coprire ampiamente il fabbisogno presente e futuro di una civiltà umana avanzata.

Per stabilire il potenziale delle risorse rinnovabili disponibili sulla Terra è necessario compiere 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. Tuttavia non è tecnicamente è possibile sfruttare tutta l'energia solare che inonda un pianeta ricoperto per due terzi dagli oceani e pieno di impervie catene montuose. Allo stesso modo, le viscere della Terra sono roventi ovunque, ma la stima del potenziale geotermico cambia enormemente a seconda della profondità che consideriamo raggiungibile trivellando la superficie terrestre.

In secondo luogo, a questi limiti tecnici vanno aggiunti quelli ambientali ed economici. La situazione poi è ulteriormente complicata dal fatto che le condizioni possono cambiare anche in modo ra-

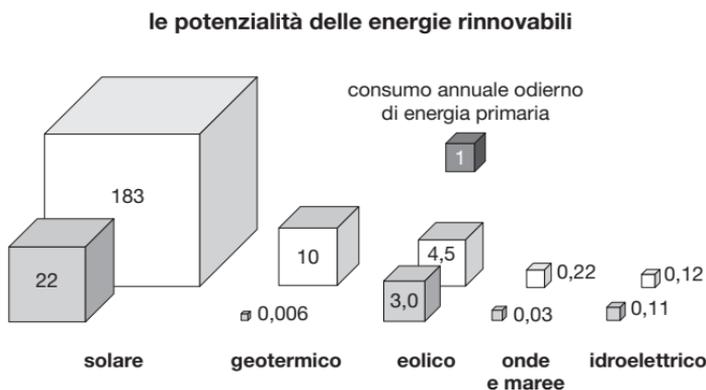


Figura 18. Il potenziale teorico annuale delle fonti energetiche rinnovabili (cubi bianchi) e la sua porzione già oggi tecnicamente sfruttabile (cubi grigi) confrontati con l'attuale consumo di energia primaria (cubetto nero). Questa stima è molto prudente rispetto ad altre che si trovano in letteratura. Fonte dei dati: N. Armaroli, V. Balzani, *Energy for a Sustainable World*, Wiley-VCH 2011

pido e imprevedibile, per via del progresso tecnologico o di mutamenti del quadro geopolitico. Nonostante queste incertezze, esiste un larghissimo 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 ha già più di 8 miliardi di abitanti, in ulteriore crescita.

Un quadro della situazione è descritto dalla figura 18. 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 disponi-

bile, 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, questo non accade? La ragione è che le transizioni energetiche, come dimostrano quelle già avvenute in passato, sono processi lunghi e complessi, che richiedono cambiamenti nell'organizzazione di ciascuna nazione, nelle relazioni internazionali e anche nelle abitudini delle persone.

Oggi, però, abbiamo fretta, molta fretta, perché i cambiamenti climatici sono già in atto e minacciano di travolgerci. Il passaggio dalla legna al carbone ha richiesto tutto il XIX secolo. Stavolta dovremo correre, poiché non abbiamo a disposizione 100 anni, ma meno di 30.

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 su una presa d'atto della realtà: le disparità

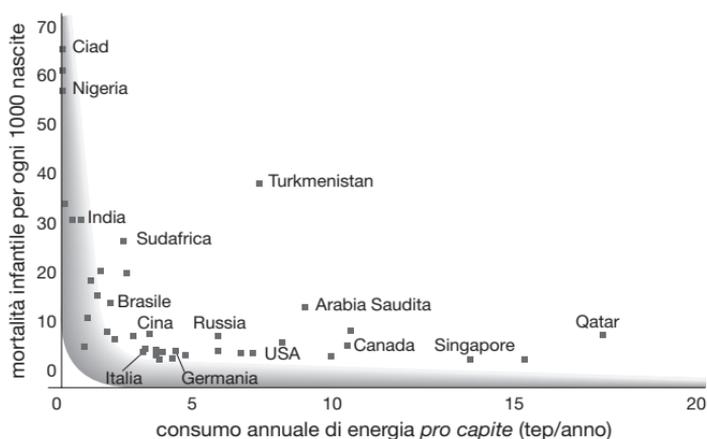


Figura 19. La mortalità infantile in funzione del consumo *pro capite* medio annuo di energia primaria di alcune nazioni (fonte dei dati: Energy Institute e ONU). L'andamento è del tutto analogo se, al posto della mortalità infantile, si esaminano altri parametri che descrivono la qualità della vita.

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 una delle minacce più concrete alla convivenza pacifica tra i popoli.

Un parametro utile a 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 indicatori molto diversi tra loro, che descrivono la qualità della vita: indice di sviluppo umano (HDI), mortalità infantile, longevità, accesso all'istruzione e molti altri. La figura 19, ad esempio,

mostra che la mortalità infantile diminuisce molto 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 di questo tipo mostrano, in modo chiaro, che quando superiamo un livello medio di consumo primario di circa 2,6 tep/anno a persona, stiamo solo sprecando energia e danneggiando la biosfera.

I dati sul consumo *pro capite* medio di energia di alcuni Paesi, riportati nella tabella 5, ci aiutano a disegnare una traccia di riferimento da qui al 2050. Attualmente il consumo mondiale medio individuale si attesta a 1,8 tep/anno, un valore ancora ben inferiore a quello «ideale» di 2,6 tep/anno, che abbiamo indicato in precedenza.

Si stima che, nel 2050, la popolazione mondiale sarà di 9,8 miliardi. Se a quella data tutti avessero a disposizione 2,6 tep/anno, il consumo complessivo di energia primaria salirebbe a 25500 Mtep (tabella 5 a pagina seguente): sarebbe cioè circa l'80% più alto rispetto a oggi.

In linea di principio non è un obiettivo impossibile, dato che negli ultimi 35 anni la domanda mondiale di energia è aumentata del 70%. La sfida rimane enorme, perché l'aumento dovrebbe essere accompagnato da una rimodulazione radicale del nostro mix energetico, con una drastica riduzione della dipendenza dai combustibili fossili e una

	Mtep TOTALI	tep/ABITANTE
Canada	338	8,7
USA	2290	6,9
Francia	200	3,0
Unione europea	1257	2,8
Cina	3806	2,7
Italia	147	2,5
Mondo 2050 (proiezione, v. testo)	25 500	2,6
Mondo 2023	14 800	1,8
Brasile	320	1,5
India	870	0,6
Etiopia	8,8	0,07

Tabella 5. Il consumo annuale di energia in alcuni Paesi e nel mondo, dati complessivi e *pro capite*.

ridistribuzione del consumo energetico tra i vari Paesi, cosa piuttosto improbabile. Ancor più improbabile è una equa redistribuzione all'interno di ciascun Paese.

Un'analisi dei dati della tabella 5 offre, comunque, spunti interessanti.

Al Canada e agli Stati Uniti vanno «con donate» alcune condizioni oggettivamente sfavorevoli (inverni rigidi, estati molto calde, trasporti su lunghe distanze), tuttavia pare evidente che il loro consumo di energia oltrepassa un livello ragionevole. Il consumo europeo è molto più basso e ormai prossimo al valore ideale. Questo è in linea con gli sforzi fatti dall'Europa per ridurre i consumi, ma in parte rappresenta anche la spia di un cambiamento del sistema economico, sempre più incentrato sui servizi,

piuttosto che sulla produzione industriale. La controprova è il fatto che la Cina, fabbrica del mondo, ha scalato posizioni in questa classifica anno dopo anno e il suo consumo *pro capite* ha ormai raggiunto e superato il valore «di sobrietà». Va anche sottolineato nuovamente, però, che i consumi energetici per la produzione di beni cinesi, esportati in tutto il mondo, sono attribuiti alla sola Cina, ma questo non è del tutto «onesto», evidentemente.

In molte altre nazioni il consumo medio individuale è largamente inferiore a un livello di dignità. I dati in tabella per l'India e l'Etiopia possono aiutare a comprendere – forse meglio di tante analisi politiche ed economiche – i flussi migratori oggi in corso.

È interessante notare che l'Italia, Paese industrializzato tra i primi 12 esportatori mondiali, riesce a unire elevati standard di vita al livello «ideale» di consumo energetico, nonostante i diffusi sprechi che possiamo ancora riscontrare nella vita quotidiana.

Dobbiamo anche considerare che il valore che abbiamo citato per il consumo *pro capite* primario ideale, 2,6 tep/anno, riflette l'attuale bassa efficienza media di conversione dalla fonte primaria all'uso finale, che non supera il 35%. Nel corso di questo secolo, possiamo e dobbiamo aumentare la nostra efficienza energetica, grazie soprattutto all'elettrificazione.

Se passassimo da 2,6 a 1,5 tep/anno a persona di consumo primario, nel 2050 avremmo un consumo globale di 14700 Mtep, praticamente iden-

tico 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 in Svizzera e che diversi scienziati considerano raggiungibile.

I materiali per la transizione

Abbiamo già sottolineato che lo sterminato flusso di luce solare che colpisce la superficie terrestre rende fattibile la transizione energetica. Questa buona notizia, però, non deve indurci a pensare che in un futuro alimentato al 100% dalle rinnovabili – in larga parte solari dirette e indirette – potremo scialacquare 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 o energia meccanica elementare (mulini a vento, imbarcazioni a vela), ma la civiltà moderna ha bisogno di forme di energia di uso finale – elettricità e combustibili – che siano flessibili, potenti e capaci di integrarsi a vicenda.

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 dispositivi come pannelli fotovoltaici, pale eoliche, batterie, elettrolizzatori. Tutti questi dispositivi sono fabbricati con risorse minerali che non piovono 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 l'uso delle tecnologie energetiche più avanzate da materiali talvolta poco abbondanti. Per esempio, per i magneti degli aerogeneratori servono metalli relativamente rari come neodimio e disprosio e, al momento, non è garantita la loro disponibilità per raggiungere i tassi di crescita di produzione eolica previsti nel medio e lungo termine. E ancora, per alcuni tipi di batterie serve il cobalto, per alcune celle a combustibile occorre il platino e per l'elettrificazione del sistema energetico occorreranno inevitabilmente grandi quantità di rame.

Per ogni specifica applicazione bisogna impiegare elementi con particolari proprietà chimico-fisiche (magnetiche, conduttive, elettrochimiche, catalitiche ecc.), elementi che oggi – e probabilmente anche in futuro – sono difficilmente sostituibili. La tavola periodica nella figura 20 a pagina seguente fornisce una visione immediata della relativa concentrazione degli elementi sulla crosta terrestre e fa capire come esistano enormi differenze nella disponibilità. Ma facciamo qualche esempio numerico per approfondire la questione, che è sottile.

Se tutti i veicoli leggeri del mondo (1,2 miliardi di auto e furgoni) fossero alimentati elettricamen-

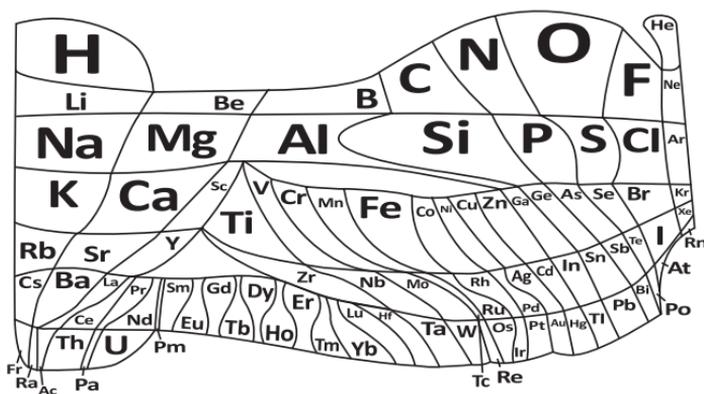


Figura 20. Ciascuna casella di questa tavola periodica ha un'area proporzionale all'abbondanza relativa di quell'elemento chimico nella crosta terrestre. Alcuni tra gli elementi necessari per fabbricare dispositivi di conversione e accumulo di energia rinnovabile sono relativamente rari. Fonte dei dati: Element Scarcity – EuChemS Periodic Table – EuChemS, 2023.

te, possiamo stimare una domanda annuale di elettricità di circa 4,8 PWh (petawattora), ipotizzando un consumo di 0,20 kWh/km e una percorrenza di 20000 km/anno. La conversione elettrica sarebbe del tutto gestibile in un processo che può ragionevolmente durare circa 20 anni, dato che il mondo genera già oggi circa 9 PWh/anno di elettricità dalle sole fonti rinnovabili.

Passando alle batterie, invece, la situazione si complica. Ogni veicolo leggero (auto e furgoni) richiede mediamente 8 kilogrammi di litio; sarebbero quindi necessarie circa 640000 tonnellate/anno di questo metallo se tutti gli 80 milioni di veicoli leggeri venduti ogni anno nel mondo fossero a batteria. Questo valore è 3,5 volte l'attuale produzione mondiale annuale. È possibile aumentare la produzione

mondiale di litio diverse volte, ma questa tendenza non è sostenibile all'infinito. Il riciclo intensivo delle batterie al litio (una realtà che si sta consolidando) e lo sviluppo di nuove tecnologie (per esempio batterie al sodio) sono essenziali per garantire la transizione verso la mobilità elettrica, consentendo un uso sostenibile delle riserve mondiali sfruttabili – attualmente stimate in 28 milioni di tonnellate – che devono coprire anche molte altre applicazioni, oltre alle batterie per veicoli. La buona notizia è che i livelli di riciclo sono in aumento, mentre le riserve di litio sono più che raddoppiate negli ultimi 10 anni, nella corsa a trovare nuove fonti sfruttabili di questo metallo. Tuttavia, passano tipicamente 5-10 anni dalla scoperta di un giacimento minerario all'estrazione su scala industriale.

In ogni caso, una civiltà alimentata da energie rinnovabili sarà *meno* intensiva di materiali rispetto al sistema tradizionale alimentato dai combustibili fossili. Questo concetto chiave può essere chiarito con un esempio. Occorrono 200 tonnellate di materiali per produrre un megawatt (MW) di pannelli fotovoltaici al silicio da installare a terra; un MW di fotovoltaico produce 40 GWh di elettricità nei suoi 30 anni di vita. Per produrre la stessa quantità di elettricità occorrono 14000 tonnellate di carbone, oltre 70 volte di più! Nei due casi vi è poi una differenza cruciale: il dispositivo fotovoltaico è riciclabile, mentre il carbone viene continuamente disperso in atmosfera come CO₂. In pratica, il sistema rinnovabile utilizza un *numero* maggiore di elementi chimici «sostanziosi» (per es. silicio, argen-

to, rame), mentre l'enorme quantità di carbone è invece molto «semplice». In altre parole, il sistema rinnovabile è a più elevata intensità di conoscenza, ma a più bassa intensità di materiale, rispetto al carbone. Inoltre, la «materialità» del fotovoltaico riguarda il convertitore e non la materia prima energetica, che è immateriale (la luce del Sole).

Nel complicato processo della transizione energetica, il collo di bottiglia non è costituito dai fotoni generati dal Sole, ma, semmai, dagli atomi reperibili sulla Terra. La transizione richiede quindi una strategia irrinunciabile: riciclare, riciclare, riciclare. Oggi, purtroppo, il tasso di riciclo dei metalli è ancora basso ma la legislazione europea sta rapidamente cambiando per stimolare un'inversione di rotta. I rifiuti devono diventare preziose «risorse secondarie», anziché scarti inutili e dannosi per l'ambiente e la salute. Per riciclare i rifiuti, però, specie quelli elettronici, occorre spendere energia. Questo conferma che l'energia è il problema dei problemi.

Un sistema energetico rinnovabile al 100% dovrà dunque riservare una quota adeguata della sua produzione per alimentare la cosiddetta *economia circolare*, che valorizza i rifiuti; ne riparleremo 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. Affinché quella benzina sia effettivamente una fonte di energia, occorre quindi che il suo contenuto energetico sia superiore all'energia già consumata per produrla.

Il problema si può descrivere quantitativamente usando un 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 reso 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 un parametro facile da misurare; valutare E_{in} , invece, è complicato perché entrano in gioco molti fattori spesso non ben definiti che rendono incerto il valore ottenuto. 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 CO_2 o 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 negli ultimi 50 anni. Il petrolio da giacimenti marini in acque ultra profonde ha un EROI probabilmente inferiore a 10, mentre l'EROI per il petrolio da

fracking è molto controverso e si trovano stime in una forbice molto ampia, 2-30. Nel caso dell'energia solare l'EROI è definito dal rapporto tra l'energia prodotta da un dispositivo di conversione (come un pannello 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 esaurientemente 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.

Un importante concetto correlato all'EROI è quello di *energia netta*, definita come la differenza

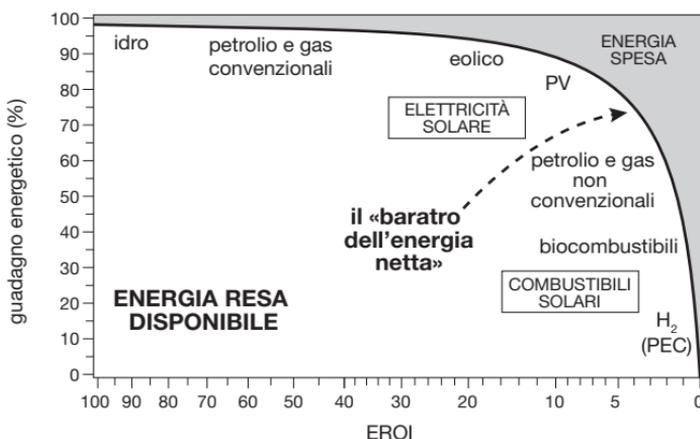


Figura 21. La percentuale di energia netta erogata come funzione dell'EROI per diverse forme di energia (PV = fotovoltaico). L'area grigia in alto e a destra rappresenta la porzione dell'energia alla fonte che occorre spendere per convertire l'energia primaria in energia utilizzabile. I valori dell'EROI indicati si basano su un vasto insieme di dati di letteratura. L'EROI per la produzione di idrogeno H_2 con celle fotoelettrochimiche (PEC), qui dedotto dai pochissimi studi oggi disponibili, è destinato ad aumentare in futuro grazie al progresso tecnologico.

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:

$$\begin{aligned} \text{guadagno energetico percentuale} &= \\ &= \text{energia netta} / E_{out} = 1 - 1/\text{EROI} \end{aligned}$$

Come si può vedere nella figura 21, questo guadagno percentuale diminuisce rapidamente quando

l'EROI scende sotto il valore 10; questa caduta è spesso chiamata «baratro dell'energia netta». La figura 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 aumento 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 21 contiene 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'ultimo 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. Si possono quindi già classificare a pieno diritto come *energeticamente sostenibili*; e lo sono ancor più perché limitano drasticamente le esternalità sanitarie e ambientali rispetto ai combustibili fossili.

I biocombustibili e l'idrogeno prodotto con la fotosintesi artificiale si trovano invece nel baratro dell'energia netta. Questo conferma che la produzione sostenibile di combustibili solari è una sfida molto difficile da vincere: per un tenore di vita accettabile, infatti non è sufficiente disporre di energia con EROI superiore a 1; occorre che EROI sia il più elevato possibile, idealmente con valori ben fuori dal baratro ($EROI > 5$).

Il concetto è illustrato schematicamente nella figura 22. 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 governativa), 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

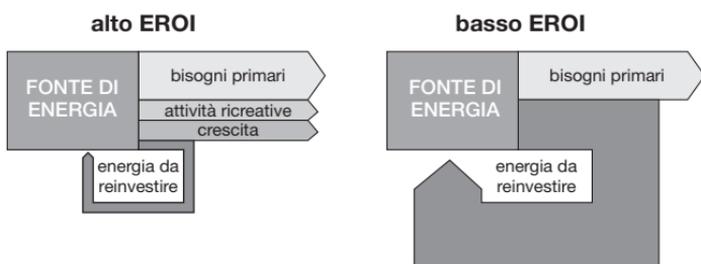


Figura 22. Il ruolo chiave del parametro EROI per la società. Quando l'EROI diminuisce, una porzione sempre più ampia della fonte energetica primaria deve essere reinvestita per rendere l'energia disponibile (freccia grigia scura); si riduce così la quota di energia a disposizione della società per la sostenibilità e il benessere sociale ed economico.

si vede a destra nella figura 22, 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 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 in corso richiede che il parametro EROI sia preso adeguatamente in considerazione, così da orientare le politiche energetiche basandole sull'e-

videnza 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

Le scelte da compiere affinché la transizione energetica abbia successo non sono tutte uguali. Basta pensare ai trasporti, che sono il sistema che mostra la maggior inerzia al cambiamento, per una serie di ragioni sociali, tecniche ed economiche, a cominciare dalla capillare diffusione planetaria, per terra, mare e cielo.

Diversi anni fa, uno studio analizzò in dettaglio le due alternative 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 calcolò 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 10000 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%, (oggi possiamo indicare almeno il doppio, ma lasciamo i dati dello studio originale), distribuzione di energia elettrica 92%, stoccaggio di energia elettrica nelle batterie 80%, motore elettrico 87%. L'efficienza complessiva risultava pari al 5,4%, (oggi sarebbe il doppio) cioè 200 volte superiore a quella del bioetanolo.

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% dei terreni arabili 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% del suolo arabile. Ma ne basterebbe 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 con auto elettriche alimentate da pannelli fotovoltaici. In sintesi: la filiera del bioetanolo da mais negli Stati Uniti non ha senso, né lo avrà mai.



Figura 23. 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

Per l'Italia i calcoli danno risultati altrettanto inequivocabili. Immaginiamo 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 23, l'auto elettrica coprirebbe una distanza circa 250 volte superiore rispetto all'auto a biodiesel. Il risultato si commenta da solo.

L'opposizione irrazionale all'auto elettrica

A proposito di ragionevolezza, il dibattito pubblico degli ultimi anni sull'auto elettrica, soprattutto in Italia, illustra molto bene l'enorme difficoltà di realizzare scelte essenziali per la transizione energetica di fronte alle resistenze dello *status quo*.

Oggi nel mondo utilizziamo ogni anno circa 4 miliardi di tonnellate di petrolio per alimentare il sistema dei trasporti, 3 delle quali vengono letteralmente buttate come calore poiché l'efficienza media dei motori a combustione non supera il 25%. Di fatto, da decenni facciamo guerre per il petrolio per poi buttarne la maggior parte. I maggiori responsabili di questo spreco sono gli automezzi leggeri, cioè automobili e furgoni, che consumano oltre il 60% del petrolio impiegato nei trasporti.

La principale ragione per sostituire le auto a combustione con le auto elettriche è puramente tecnico-scientifica: un'auto a batteria consuma mediamente 4 volte meno energia per fare gli stessi chilometri di un'auto tradizionale a benzina o gasolio. Questo sarebbe più che sufficiente, in un mondo razionale, a fare ogni sforzo per promuovere questa transizione tecnologica, anche perché la produzione elettrica rinnovabile è in costante crescita mentre, come abbiamo visto, il petrolio è sempre più «estremo» e sporco. Ma c'è molto altro.

Ci sono infatti schiaccianti motivazioni economiche e di sicurezza energetica per cambiare strada. Abbiamo legato le nostre economie a un flusso immenso e continuo di petrolio (e gas) che

non può essere interrotto senza minare alla radice il nostro benessere. Questo è largamente al di fuori dal controllo di noi europei, e il fatto che i nostri fornitori includano da sempre alcuni dei regimi più liberticidi e sanguinari del mondo ci rende ancora più deboli. Oggi un manipolo di dinastie che abbiamo arricchito a livelli spaventosi compra qualsiasi «nostra» cosa a suon di *petrodollari*: eccellenze industriali, banche, e persino calciatori e manifestazioni sportive. C'è il forte dubbio che parte di questo denaro finanzia organizzazioni terroristiche.

Nonostante questo, assistiamo da anni a una sorta di tiro al bersaglio contro l'auto elettrica, con motivazioni tra l'inconsistente e l'insensato. Trentacinque anni fa in Italia si fabbricavano 2,2 milioni di auto l'anno, oggi sono meno di 0,5 milioni. È a dir poco stravagante indicare l'auto elettrica come il nemico da abbattere per salvare l'auto italiana, in crisi nera da almeno 20 anni, a causa della totale mancanza di una politica industriale per il settore. Per aumentare la confusione, si grida all'invasione delle auto elettriche cinesi, quando dal Dragone arrivano ancora oggi soprattutto auto endotermiche, onda lunga di uno tsunami asiatico partito dal Giappone 30 anni fa e proseguito dalla Corea del Sud in anni più recenti, senza che nessuno avesse nulla da eccepire.

L'accusa di passare da una dipendenza dal petrolio arabo a quella delle batterie cinesi non ha senso. Il petrolio non l'abbiamo e non l'avremo mai. Con le batterie la situazione è ben diversa. Innanzitutto, noi europei non siamo condanna-

ti per sempre a importarle, sappiamo bene come si producono e possiamo ricominciare a farlo, se saremo dotarci di una politica industriale all'altezza. In secondo luogo, una volta che le batterie arrivano in Europa diventano «nostre» anche le materie prime. Ad esempio, il litio per la seconda generazione di accumulatori è già a nostra disposizione ma, di nuovo, solo se saremo realizzare una politica industriale del riciclo, che diventerà un enorme affare economico.

La dipendenza è ben diversa anche per un altro motivo. Una crisi di forniture petrolifere mette in crisi all'istante tutto il parco circolante, senza distinzioni. Una crisi delle forniture di batterie (o di impianti rinnovabili per alimentarle) non colpisce il parco esistente. In altre parole, con il petrolio siamo schiavi per sempre. Con le batterie e le rinnovabili possiamo cominciare a liberarci.

Contro l'auto elettrica si arriva a sostenere che, sull'intero ciclo di vita, emette più CO₂ di un'auto termica a causa delle emissioni prodotte durante la fase di fabbricazione e smaltimento della batteria. È un'affermazione smentita da decine di studi delle più autorevoli istituzioni scientifiche internazionali. Altrettanto capziose le argomentazioni sul numero di posti di lavoro che andrebbero persi nella produzione degli automezzi a combustione, senza mai conteggiare i nuovi che si possono creare, come sempre accade nelle transizioni tecnologiche.

È probabile che il clima di ostilità verso l'auto a batteria non cambierà. Almeno fino a quan-

do, come già avvenuto per il segmento delle auto di lusso, le auto «a elettroni» costeranno meno di quelle a benzina. L'obiettivo non è lontano. La gloriosa auto a motore endotermico ha cambiato il mondo, rendendolo più connesso, più piccolo, più ricco, più divertente. E anche più inquinato. Dopo 150 anni, ha fatto il suo tempo ed è giunto il momento di cedere il passo. Le vetture elettriche sono un'inevitabile transizione tecnologica, resa possibile della batteria al litio, i cui inventori hanno ricevuto il premio Nobel per la chimica nel 2019. Siamo solo agli inizi e spetta solo a noi decidere se vogliamo governare il processo o subirlo.

L'auto a batteria è, di fatto, il nemico numero uno del conglomerato industriale più ricco e potente di sempre, quello petrolifero. Dopo 200 000 km, un'auto a benzina ha consumato 8 volte il suo peso in carburante. Chi mollerebbe facilmente un cliente così vorace? Non deve stupire che il settore petrolifero abbia messo in campo tutta la sua potenza economica e mediatica per screditare l'auto a batteria presso l'opinione pubblica. Stupisce piuttosto che molti opinionisti, alcuni dei quali si dichiarano progressisti e ambientalisti, si siano messi a dare loro una mano.

Elettrificazione e scenari rinnovabili al 100%

Nell'ultimo decennio scienziati, centri di ricerca e agenzie internazionali hanno elaborato piani per una massiccia conversione alle rinnovabili. Tut-

ti hanno come obiettivo principale una massiccia elettrificazione dei consumi energetici finali. I motivi di questa scelta, oltre alla riduzione dell'inquinamento atmosferico, sono due: a) i motori elettrici sono molto più efficienti dei motori a combustione; b) diverse tecnologie di produzione elettrica rinnovabile sono già ampiamente disponibili e risultano essere le più competitive sul mercato.

I due settori dove l'elettrificazione è già partita sono il trasporto leggero (moto, auto, furgoni) e il riscaldamento degli edifici, dal momento che le relative tecnologie sono già disponibili: veicoli a batteria e pompe di calore.

Il piano di transizione più famoso, a livello di singola nazione, è quello della Germania. Si chiama *Energiewende* («Transizione energetica»), fu approvato dal parlamento tedesco nel settembre 2010 e rafforzato alcuni mesi dopo, in seguito al disastro di Fukushima. *Energiewende* mira a una riduzione delle emissioni di CO₂ rispetto al 1990 pari al 65% nel 2030 ed emissioni zero nette nel 2050. A metà secolo le energie rinnovabili dovranno fornire il 60% dei consumi primari tedeschi (oggi 20%) e l'80% di quelli elettrici (oggi 50%) 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. Tra le altre misure, il piano prevedeva l'uscita definitiva dal nucleare entro il 2022, avvenuta nei tempi previsti, e mira all'uscita dal carbone entro il 2038.

I centri di ricerca, le università e le aziende tedesche sono parte integrante del progetto, che mira a

garantire alla Germania la *leadership* europea della transizione energetica e a beneficiare la sua industria manifatturiera. Nonostante goda di consenso popolare e sia appoggiato dai principali partiti politici, il piano è stato anche oggetto di severe critiche. C'è chi sostiene che la Germania non abbia investito a sufficienza nell'espansione e nel consolidamento della rete elettrica e dei sistemi di stoccaggio, che sono cruciali per sostenere l'aumento della produzione eolica e solare e garantire stabilità al complesso sistema energetico di un grande Paese industriale. Qualcuno poi ritiene che sia irrealistico abbandonare in 15 anni sia il nucleare che il carbone, senza far massiccio ricorso al gas. Quest'ultima opzione però è diventata molto più difficile a causa della interruzione totale delle forniture di gas dalla Russia in seguito all'invasione dell'Ucraina.

Energiewende dimostra che è possibile mettere in campo un progetto globale di transizione in un paese avanzato, se la classe politica è determinata a portarlo avanti. D'altro canto, esso mostra anche quanto sia importante essere pronti e flessibili, a seguito di eventi esterni non prevedibili. Certamente questo piano ha un costo economico notevole: si stima che siano già stati spesi oltre 500 miliardi di euro ed è ancora in fase iniziale. Ma è altrettanto evidente che i costi del non-fare, rimanendo legati al sistema energetico tradizionale – con le sue dipendenze, volatilità ed enormi costi diretti e indiretti – sono insostenibili. Solo il tempo potrà dirci quanto *Energiewende*, che comunque procede, sia stato realistico e lungimirante.

Anche l'Unione Europea si è data obiettivi ambiziosi. Tuttavia, siglare accordi tra 27 Paesi, ognuno dei quali con un equilibrio politico interno da rispettare, è un esercizio molto complicato. L'obiettivo attuale è una riduzione delle emissioni di gas serra del 55% entro il 2030 e del 90% entro il 2040, rispetto ai livelli del 1990. La quota rinnovabile del consumo finale di energia nella dovrà passare al 42,5% nel 2030, dall'attuale 23%. Al fine di raggiungere i suoi ambiziosi target, la UE ha emesso direttive vincolanti, a cominciare dal bandire la vendita delle auto a motore endotermico entro il 2035 e alle misure di efficientamento energetico degli edifici da realizzare entro il 2040. Indicare scadenze precise a 10-15 anni non mira a vessare i cittadini – come afferma qualche politico in cerca di facili consensi – ma a fornire ai sistemi legislativi e agli apparati industriali una cornice temporale adeguata ad avviare le azioni che saranno imprescindibili per contrastare la crisi climatica. È certamente preferibile provare a governare un processo, piuttosto che subirlo.

L'UE ha aperto la strada all'azione internazionale per la salvaguardia del clima e ora deve mantenere una difficile rotta. La sfida è raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni, mantenendo la coesione sociale (o come spesso si dice: «la transizione non deve lasciare indietro nessuno») e creando nuove opportunità per l'industria nei settori delle tecnologie energetiche pulite.

Tra i numerosi piani energetici saliti alla ribalta il più celebre e discusso dal punto di vista scientifico

è quello di Mark Jacobson e collaboratori, dell'Università di Stanford (California). In una serie di articoli e successivamente in due corposi volumi, Jacobson ha esposto un piano a livello mondiale chiamato wws (*Wind, Water, Sunlight*) in quanto prevede solo l'utilizzo di vento, acqua e Sole come sorgenti primarie di energia nel 2050, senza l'uso di nuove tecnologie «miracolose». Sono esclusi gas, nucleare, biocombustibili e biomasse di ogni tipo e anche le tecnologie per la cattura e la conversione della CO₂. Questo differenzia il piano wws da altri analoghi esercizi, ad esempio la famosa (quanto criticata) *roadmap Net Zero by 2050* dell'Agenzia Internazionale per l'Energia, dove il sequestro e la cattura del carbonio e, in parte, anche il nucleare giocano un ruolo non marginale. Il piano di Jacobson propone su scala mondiale una transizione all'80% di energia da vento, acqua e Sole entro il 2030, per poi raggiungere il 100% non più tardi del 2050. In questo modo il livello di CO₂ nell'aria entro il 2100 si ridurrebbe a 350 ppm, il valore che si riscontrava nel 1988 e che viene ritenuto da molti scienziati la soglia di sicurezza climatica da non oltrepassare. Questo permetterebbe di evitare il superamento della soglia dei 2°C, che si verificherebbe nel 2041 se continuassimo a emettere CO₂ al ritmo attuale. Secondo Jacobson, il piano ridurrebbe anche l'inquinamento atmosferico, che causa circa 7 milioni di morti l'anno. Creerebbe poi decine di milioni di posti di lavoro permanenti e dal 2050 farebbe risparmiare 50 000 miliardi di dollari l'anno, sotto forma di danni climatici e ambientali evitati.

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, porterebbe una riduzione dei consumi primari del 43%. L'unico combustibile ipotizzato è l'idrogeno, prodotto tramite elettrolisi dell'acqua sfruttando gli eccessi di elettricità rinnovabile, ma ha un ruolo piuttosto ridotto. Il piano prevede che il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici sia interamente basato su pompe di calore elettriche, mentre il solare termico dovrebbe essere utilizzato come tecnologia di accumulo di calore nei picchi giornalieri di insolazione.

Un piano di questa portata richiederebbe la produzione di quasi due miliardi di nuovi dispositivi per la produzione di energia elettrica rinnovabile e investimenti per migliaia di miliardi. Gli obiettivi di Jacobson al 2030 sono oggettivamente irrealistici, ma il piano ha il pregio di evidenziare le dimensioni quantitative della sfida che abbiamo davanti. Tuttavia, se vogliamo ancorare un ragionevole quanto necessario ottimismo alla complessità del mondo reale, occorre sottolineare alcuni punti cruciali:

1. Attualmente i convertitori e gli accumulatori di energie rinnovabili sono fabbricati soprattutto con energie fossili. Nel prossimo futuro si dovranno produrre dispositivi rinnovabili usando le energie rinnovabili stesse, chiudendo così definitivamente l'era fossile. È difficile stimare le quantità di combustibili fossili che sarà necessario usare in questa fase di «inseminazione» e quindi quale sarà il loro impatto sul clima e sull'ambiente.

2. La disponibilità effettiva di risorse minerali e – ancora di più – la capacità di condivisione tra le nazioni e il riciclo delle filiere energetiche saranno fattori *essenziali* per il successo di una transizione che possa garantire la salvaguardia della biosfera.
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 quasi 10 miliardi di persone.
4. La transizione energetica eviterà enormi costi, ma avrà a sua volta un costo, che implica una ristrutturazione del sistema finanziario ed economico internazionale. Questo incontrerà enormi resistenze, a cominciare da quelle del settore petrolifero. È molto difficile quantificare l'impatto della spinta alla conservazione, già messa in campo in forze, sui tempi del processo di transizione.
5. La transizione energetica richiede un ammodernamento e consolidamento delle reti elettriche e dei sistemi di accumulo, un adeguamento dell'infrastruttura energetica globale, un cambiamento radicale del sistema dei trasporti, un aumento degli investimenti in ricerca e sviluppo. Anche tutto questo richiederà tempi lunghi, che è oggettivamente difficile stimare.
6. I Paesi più ricchi dovranno ridurre i propri consumi energetici, in maniera consistente. Questo richiederà un'estesa attività di sensibilizzazione ed educazione a ogni livello, che pure susciterà resistenze e richiederà tempi non facilmente prevedibili.

La transizione energetica è un'impresa molto complessa dal punto di vista scientifico, tecnologico, economico e sociale. Ogni alternativa però è certamente peggiore, quindi non resta che metterci

al lavoro. Portandola a termine, riusciremo a contrastare due problemi che minacciano l'umanità e la biosfera: il cambiamento climatico e l'inquinamento. Forse, potremo anche fare passi avanti verso un contesto sociale più solidale e un mondo più pacifico e meno diseguale.

I piani 100% rinnovabile per l'Italia

Per l'Italia sono stati proposti diversi piani di transizione a un sistema energetico a emissioni zero, sia a livello istituzionale (RSE, Terna) che da associazioni e gruppi di lavoro. Tutti i piani considerano una profonda elettrificazione degli usi finali a cominciare, naturalmente, dai trasporti e dal riscaldamento residenziale.

Il piano presentato dal nostro collega Marco Giusti, molto solido e ben argomentato, viene declinato in tre «gambe» principali: Efficienza ed Elettrificazione (E&E), Rinnovabili (R), Moderazione (M), a cui attribuisce un peso, rispettivamente del 40, 40 e 20%. Riassumiamo qui i principali punti, rimandando alla lettura del corposo testo per i dettagli (v. *Le fonti di questo libro*).

Il piano considera un fabbisogno lordo di energia primaria di quasi 2500 PJ (petajoule), da soddisfare con rinnovabili elettriche (80%), biometano (11%) e biomasse (9%). La frazione elettrica (550 TWh, 1,7 volte l'attuale consumo complessivo italiano) è prodotta per il 56% da fotovoltaico e per il 28% da eolico, il resto è suddiviso tra idroelettri-

co (9%), biomasse (5%), geotermoelettrico (3%). L'ammacco solare invernale viene prima mitigato dalla fonte eolica (stagionalmente opposta e complementare al fotovoltaico) e per il restante coperto da centrali termoelettriche a gas, alimentate da metano di sintesi ottenuto a partire da idrogeno e CO₂; il primo è prodotto, tramite elettrolizzatori, con gli eccessi di produzione elettrica solare nei mesi estivi. Il metano prodotto in estate viene immagazzinato nei siti di stoccaggio geologico già presenti in Italia. Il processo è a bassa efficienza complessiva (60 TWh di elettricità estiva da fotovoltaico sono convertiti in 20 TWh termoelettrici invernali) ma è ritenuto sostenibile.

Le analisi delle superfici necessarie per gli impianti rinnovabili suggeriscono obiettivi alla portata. Il bilanciamento del sistema a livello mensile, settimanale e giornaliero è reso possibile da una varietà di azioni e tecnologie, a cominciare da un adeguato mix tecnologico, da azioni di gestione della domanda, da accumulo nei bacini idroelettrici, dalle batterie delle auto connesse alla rete (*Vehicle-To-Grid*, v2G) e solo nella parte residuale e marginale da batterie dedicate. La sostenibilità economica del processo è per molti aspetti tutt'altro che proibitiva (per esempio potenziamento reti elettriche di trasmissione e distribuzione, elettrolizzatori), anche se i costi saranno elevati. L'ostacolo maggiore, come facilmente intuibile, è l'efficientamento energetico degli edifici con la annessa elettrificazione dei consumi. Qui i numeri sono davvero elevati: 6,5 miliardi di m³ da riscald-

dare, pari a 24 milioni di abitazioni equivalenti. La spesa si aggira attorno ai 1000 miliardi di euro, da sostenere quasi esclusivamente con capitali privati. Per questa operazione, il ruolo della mano pubblica nell'aiutare soprattutto i meno abbienti sarà cruciale.

In conclusione, la comunità scientifica italiana e internazionale ha già lavorato su piani credibili di transizione energetica per l'Italia. Forse il piano migliore deve ancora essere scritto: magari è un mix dei piani già disponibili. In ogni caso, un Paese che, nonostante tutto, è ancora una delle maggiori economie mondiali, dovrebbe lavorarci sopra seriamente, come accade in Germania, Francia, Regno Unito o altri Paesi.

Qui, per ora, si parla invece molto di tecnologie che non esistono (come la fusione nucleare) o si lanciano crociate contro l'elettificazione della mobilità. Se non cambiamo rotta, andremo a sbattere. E sarà un bel botto.