



Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
*Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica,
Matematica e Scienze Naturali*
138° (2020), Vol. I, fasc. 3, pp. 251-260
ISSN 0392-4130 • ISBN 978-88-98075-41-6

La transizione energetica *

NICOLA ARMAROLI **

* Prolusione tenutasi durante l'Assemblea Autunnale dei Soci del 10 dicembre 2020, per via telematica, a causa dalle restrizioni imposte dalla pandemia COVID-19.

** Socio dell'Accademia dei XL. Istituto per la Sintesi Organica e la Fotoreattività del CNR, Via P. Gobetti 101 - 40129 Bologna. ORCID: 0000-0001-8599-0901
E-mail: nicola.armaroli@cnr.it

Abstract – The energy transition from fossil fuels to renewable energies is the key tool to curb anthropogenic climate change which, without prompt action, endangers the survival of our civilization. The main energy resources available on the planet are described, emphasizing the relevance of solar energy, which can be used both in the production of electricity and fuels. The strategies for the transition must primarily target a higher efficiency of the energy system and the electrification of end-uses, because they can be implemented straight away. The key role of electrification in the conversion of the light-duty vehicle sector and in the heating of buildings is particularly emphasized and the main bottlenecks of the transition are briefly discussed, along with the role of hydrogen. The targets set by the European Union for 2030 and 2050 to reduce greenhouse gas emissions highlight the need to dramatically accelerate the energy transition. This is a huge challenge that, by comparison, will make the unprecedented and complex ongoing vaccination campaign a minor feat in a few years' time.

Keywords: Energy transition; climate change; fossil fuels; solar energy; electric transportation; hydrogen.

Riassunto – La transizione energetica dai combustibili fossili alle energie rinnovabili è lo strumento chiave per contrastare il cambiamento climatico antropogenico che, in assenza di azioni decise, mette a rischio la sopravvivenza stessa della nostra civiltà. Vengono qui descritte le principali risorse energetiche disponibili sul pianeta, sottolineando l'importanza decisiva dell'energia solare, che può essere usata sia nella produzione di elettricità che di combustibili. Le strategie per la transizione dovranno essere soprattutto basate sull'efficientamento del sistema energetico e l'elettificazione degli usi finali, perché realizzabili già oggi. Il ruolo chiave dell'elettificazione nella trasformazione del settore del trasporto leggero e nel riscaldamento degli edifici è particolarmente enfatizzato, assieme ai principali colli di bottiglia del processo di transizione e al ruolo dell'idrogeno. Gli obiettivi di abbattimento delle emissioni climalteranti fissati dall'Unione Europea per il 2030 e il 2050 evidenziano la necessità di accelerare fortemente la transizione energetica. Si tratta di una sfida colossale che al confronto, da qui a pochi anni, farà apparire l'imponente e complessa campagna vaccinale in corso un'operazione di modesta entità.

Parole chiave: Transizione energetica; cambiamento climatico; combustibili fossili; trasporto elettrico; idrogeno.

1. Introduzione

Per inquadrare la necessità di una transizione energetica dei combustibili fossili alle energie rinnovabili è utile partire da un breve cenno sull'andamento storico dei consumi. I primi insediamenti cittadini risalgono a circa 5500 anni fa. A partire da allora, per millenni, il consumo energetico globale è rimasto costantemente molto basso. Alla fine del Settecento, a partire dalla prima rivoluzione industriale, il consumo di energia ha iniziato a salire in maniera vertiginosa e, nel corso del XX secolo, i consumi di carbone sono aumentati di 5 volte, quelli di petrolio di 140 volte, quelli di gas di 380 volte e quelli di elettricità di oltre 500 volte (ARMAROLI, 2020). Tra il 2000 e il 2019, il consumo di petrolio è ulteriormente aumentato del 35% e quello di elettricità del 125%. Oltre l'80% del fabbisogno energetico *primario* mondiale è tutt'oggi fornito dai combustibili fossili (IEA, 2020). Questa situazione non è sostenibile nel medio-lungo termine per almeno tre motivi. Il primo è che l'uso massiccio di queste risorse energetiche sta compromettendo in maniera drammatica la stabilità climatica del pianeta. Il secondo è che la disponibilità di combustibili fossili anidate nella litosfera è molto abbondante ma non illimitata. Il terzo è che in un sistema chiuso come la Terra nessun fenomeno o processo può crescere all'infinito. Questa ovvia considerazione sembra non trovare spazio in alcune correnti di pensiero economico. Eppure è sufficiente osservare la natura per capire l'insussistenza fisica del paradigma della crescita infinita in un sistema finito. Una pianta di girasole ha una crescita esponenziale nei primi giorni di vita, la sua velocità di crescita inizia a diminuire attorno al trentasettesimo giorno (punto di inflessione) fino ad azzerarsi dopo circa 3 mesi (SMIL, 2019). Ogni attività umana è destinata a seguire un andamento analogo, semplicemente cambiando il punto di inflessione.

2. I consumi

Prima della pandemia 2020 e della conseguente contrazione economica globale, il consumo mondiale annuale di combustibili fossili ammontava a circa 17 miliardi di tonnellate: 9 di carbone, 5 di petrolio, 3 di gas. Si tratta di numeri che sfuggono totalmente alla nostra capacità immaginativa e occorre uno stratagemma per renderli accessibili (ARMAROLI *et al.*, 2017).

Una persona in buona salute può generare per via muscolare, tramite le braccia e le gambe, una potenza di qualche centinaio di watt (W) per un tempo limitato. In

un'attività continuativa, protratta per 8 ore (un'ipotetica giornata lavorativa) può sviluppare una potenza di circa 50 W. Prendiamo allora questo valore come "unità di misura": 50 W equivalgono a una persona che sviluppa forza muscolare per alcune ore, senza sosta. Potremmo immaginarlo come una sorta di "operaio energetico".

Una famiglia media italiana consuma ogni anno circa 25.000 kWh di energia (elettricità, gas, carburanti). Per sviluppare questa energia per via muscolare, dovrebbe assumere 173 operai energetici, facendoli lavorare per 8 ore al giorno tutto l'anno senza un giorno di riposo (ARMAROLI, 2020). Ad una tariffa lorda di 20 €/ora questo significherebbe un costo di oltre 10 milioni di euro. La spesa energetica media di una famiglia italiana si aggira sui 3000 €/anno: un numero su cui riflettere prima di lamentarci dei costi e delle tariffe energetiche. Il basso costo dell'energia è il presupposto chiave del sistema economico nel quale viviamo. Negli ultimi settant'anni si sono moltiplicate le cosiddette "guerre per il petrolio" (*oil wars*) il cui scopo era mantenere attivo il flusso energetico che ci tiene letteralmente in vita. Un altro confronto che aiuta a comprendere i concetti appena espressi è il seguente: oggi la benzina (1.5 €/L) costa meno di un litro di acqua minerale al ristorante (2 €), nonostante un carico fiscale molto più alto.

Tornando agli operai energetici, un treno Frecciarossa 1000 assorbe mediamente una potenza di 9,8 MW, equivalente al lavoro di 196.000 operai energetici. In pratica per un viaggio da Milano a Roma, ogni singolo passeggero è come se avesse a disposizione 430 persone che lavorano al proprio servizio. Non sorprende quindi che si possa percorrere il viaggio in sole tre ore.

È importante infine sottolineare che circa il 10% dei combustibili fossili viene utilizzato dall'industria petrolchimica per la produzione di numerosi prodotti tra cui composti chimici di base, fertilizzanti, termoplastiche, fibre, elastomeri, solventi, additivi, esplosivi. La produzione petrolchimica mondiale supera 800 milioni di tonnellate l'anno (LEVI *et al.*, 2018).

3. Il petrolio

Il petrolio è ancora oggi la principale fonte di energia: copre il 31,6% dei consumi primari mondiali (IEA, 2020). La sua preminenza è fortemente legata alle caratteristiche fisiche: liquido e ad alta densità di energia è molto facile da trasportare ed estremamente comodo e versatile da utilizzare. Il petrolio è il motore energetico dello straordinario sviluppo tecnologico e di benessere materiale che abbiamo raggiunto negli ultimi settant'an-

ni. Dalla sua raffinazione si ottengono diverse frazioni tra cui benzina, gasolio e kerosene, ognuna adatta per una specifica applicazione nei trasporti. La frazione più pesante (bitume) avrebbe tutte le caratteristiche per essere uno scarto, viene invece utilizzata per costruire le strade su cui si muovono gli automezzi che utilizzano le frazioni più leggere. Del petrolio non si butta praticamente nulla.

Le aziende energetiche hanno passato gli ultimi 70-80 anni a scandagliare ogni angolo del pianeta alla ricerca di petrolio. Questo prezioso liquido ormai si suddivide in due grandi categorie, anche se di questo si parla ancora poco. Da un lato c'è il petrolio "facile" detto *convenzionale*, quello che si può trovare ad esempio nei paesi che si affacciano sul Golfo Persico. In questa regione, basta trivellare un pozzo nel posto giusto e il petrolio esce spontaneamente per decenni. Oleodotti relativamente brevi e posati nel deserto possono trasportarlo agevolmente su enormi petroliere pronte a solcare i mari per portarlo laddove richiesto, in tutto il mondo. Questo petrolio è definito *convenzionale*: facile da estrarre e da trasportare e di ottima qualità.

Purtroppo le riserve di questo petrolio facile si stanno progressivamente assottigliando e i mercati si stanno muovendo verso un petrolio diverso, *non convenzionale* o «estremo» (ARMAROLI *et al.*, 2017). Ne esistono vari tipi: ottenuto dalle sabbie bituminose, liberato dalle viscere della terra con processi complessi come la fratturazione idraulica («fracking»), estratto in zone remote o estreme come l'Artico o le profondità degli oceani. Per ragioni di spazio, non entro nei dettagli tecnici della complessità legate alla estrazione e produzione di questo tipo di petrolio, oltre che del suo elevato costo economico e ambientale (ARMAROLI, 2020). Mi limito a sottolineare che oggi circa il 40% del petrolio mondiale è ormai ottenuto da giacimenti non convenzionali. Questa quota è quasi triplicata in vent'anni.

4. Un sistema inefficiente

Una delle caratteristiche salienti del sistema energetico mondiale è la sua altissima inefficienza. Ad esempio, su 100 unità di energia che entrano nel sistema economico degli Stati Uniti solo 32 vanno a beneficio dell'utilizzatore finale, mentre 68 sono dissipate, principalmente sotto forma di calore (LLNL, 2021). In questo contesto, il caso più eclatante è quello del petrolio: oltre il 70% del petrolio USA è impiegato nel settore dei trasporti, ma l'80% di questo input primario è dilapidato in calore a causa dell'inefficienza intrinseca dei motori termici,

che si attesta mediamente attorno al 25%. L'efficienza del sistema energetico europeo non è significativamente superiore e il cosiddetto Recovery Plan attualmente in discussione si propone di cambiare radicalmente questa situazione non più sostenibile.

Attraverso un'attenta analisi dei parametri che descrivono la qualità della vita (es. indice di sviluppo umano, mortalità infantile) è possibile stimare in maniera quantitativa l'efficienza di un sistema energetico (ARMAROLI *et al.*, 2016). Ad esempio il cittadino medio degli Stati Uniti consuma il doppio di energia primaria di un cittadino italiano; nonostante questo, la mortalità infantile negli USA è quasi doppia rispetto a quella italiana. In altre parole, aumentando il consumo energetico oltre questa soglia, parametri chiave come quelli indicati sopra non migliorano, anzi tendono spesso a peggiorare. Queste analisi mostrano che, agli attuali livelli di efficienza nella conversione energetica, un consumo *primario* pro capite *complessivo* di 30.000 kWh/anno è ottimale per garantire una vita più che confortevole, mentre ogni incremento rispetto a questo valore è sostanzialmente uno spreco. Questo valore tenderà a diminuire nel tempo con lo sviluppo tecnologico, che permetterà di aumentare la quota di energia finale estraibile dall'energia primaria.

È possibile aumentare l'efficienza nell'uso dell'energia ma è importante sottolineare che questo ha un prezzo. Per illustrare questo concetto, prendiamo ad esempio tre dispositivi in grado di erogare lo stesso servizio: una lampadina a incandescenza, una fluorescente (CFL, compact fluorescent lamp), una a LED di prima generazione. A parità di lumen erogati la prima assorbe 60 W di elettricità, la seconda 13 W e la terza solo 10 W. Un'altra differenza importante è che CFL e LED hanno un tempo di vita circa 10 e 20 volte più lungo rispetto alla lampadina tradizionale a incandescenza. È evidente quindi che la soluzione LED è la migliore dal punto di vista dell'efficienza. Andando però ad analizzare il contenuto in metalli dei tre dispositivi, si scopre che la lampada a incandescenza contiene solo 1 g di metalli, quella CFL 10 g, quella a LED ben 170 g (LIM *et al.*, 2013) legati alla componentistica elettronica del dispositivo, totalmente assente in una lampada a incandescenza. L'efficienza energetica ha quindi un costo sostanziale, di tipo materiale.

5. La crisi climatica

La combustione di circa 17 miliardi di tonnellate di combustibili fossili l'anno, comporta l'immissione in atmosfera di oltre 34 miliardi di tonnellate di CO₂ (BP,

2020).¹ Questo enorme volume di gas a effetto serra, è il primo fattore di sbilanciamento antropogenico nel ciclo del carbonio, ovvero il principale responsabile, anche se non l'unico, del riscaldamento globale (VOLK, 2008).

La molecola di CO₂ resta stabile per secoli nell'atmosfera, che invece si rimescola completamente in circa un anno. Ne consegue che la concentrazione di CO₂ è uniforme su tutto il pianeta. Le misure sono cominciate nel 1958 nel laboratorio della National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) del governo degli Stati Uniti, che si trova a Mauna Loa, sulle Isole Hawaii. Da allora, la concentrazione media annuale di CO₂ in atmosfera è passata da 315 a 415 ppm: un aumento del 32% in poco più di 60 anni (NOAA, 2021). Di fatto, stiamo realizzando il più grande esperimento fuori controllo della storia: gli studi paleoclimatici mostrano che la concentrazione di CO₂ non è mai stata così alta negli ultimi 3 milioni di anni.

Per avere un'idea concreta del riscaldamento globale, è sufficiente digitare su un motore di ricerca "confronto ghiacciai". Si troveranno decine di fotografie di ghiacciai in ogni angolo del mondo scattate 50-100 anni fa, confrontate con fotografie scattate oggi nel medesimo punto. Queste immagini spiegano il riscaldamento globale più di quanto si possa raccontare a parole (NASA, 2021).

L'aumento più marcato delle temperature è osservato alle latitudini più settentrionali del pianeta. Oggi, a fine estate, la calotta artica ha perso mediamente il 30% in superficie e il 50% in volume, rispetto al 1979 (NSIDC, 2021). La possibilità che, fra un decennio, i ghiacci artici siano totalmente compromessi a fine estate non è più remota. Lo scioglimento della calotta artica non comporta aumento significativo del livello dei mari, poiché si tratta di un oceano e il ghiaccio ha un volume maggiore dell'acqua. Purtroppo però le altre due immense distese di ghiaccio terrestri, Groenlandia e Antartide, giacciono su terre emerse: ogni metro cubo disciolto di quei ghiacci che arriva in mare causa un aumento netto del volume degli oceani, con conseguente innalzamento. Un'accelerazione dello scioglimento dei ghiacci della Groenlandia e dell'Antartide rappresenta uno scenario da incubo per tutta l'umanità (QIU, 2017). Oggi infatti nelle zone costiere vivono oltre 2 miliardi di persone che, in caso di innalzamento dei mari, dovrebbero essere ricollocate al-

trove. I flussi migratori attuali, già difficili da gestire, apparirebbero ben poca cosa rispetto a uno scenario di questo tipo.

A partire dall'accordo internazionale di Parigi siglato nel 2015, le nazioni avrebbero dovuto cominciare a calare immediatamente le emissioni di CO₂, ma questo non è avvenuto tranne che in occasione della pandemia Covid-19, nel corso del 2020. Agli attuali livelli di emissione, la possibilità che la temperatura non salga oltre i 2 °C è praticamente nulla (TOLLEFSON, 2018). Due figure si sono molto spese per portare all'attenzione dell'opinione pubblica questo drammatico problema, che colpisce e colpirà soprattutto i più poveri e indifesi: Papa Francesco e il segretario generale delle Nazioni Unite Antonio Guterres. I loro frequenti appelli restano largamente inascoltati (BERGOGLIO, 2015).

In un tentativo estremo di invertire la rotta del cambiamento climatico, l'Unione Europea si è posta recentemente due obiettivi molto netti e ambiziosi (ARMAROLI, 2021a; EEA, 2021).

1) 2030: abbattere le emissioni climalteranti del 55% rispetto al 1990; tra il 1990 e il 2018 le abbiamo abbattute solo del 16%.

2) 2050: azzerare le emissioni nette per raggiungere la neutralità climatica, cioè eliminare ogni molecola di CO₂ residua che produrremo.

Di fatto, è un modo tecnico per dire che in soli 30 anni dobbiamo realizzare la più grande rivoluzione tecnologica, economica e sociale della storia: la transizione completa alle energie rinnovabili.

I combustibili fossili hanno reso possibile un enorme miglioramento della qualità della vita a miliardi di persone, come mai avvenuto nella storia dell'umanità. Oggi però l'uso intensivo di queste preziose risorse comporta un rischio ormai esiziale per la nostra civiltà: la compromissione della stabilità climatica della biosfera. Nella partita decisiva che dobbiamo giocare non c'è spazio per investire preziose risorse su opzioni che hanno già dimostrato la loro complessità tecnica e insostenibilità economica, come il sequestro e la cattura della CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS). Semplicemente, buona parte dei combustibili fossili già scoperti e ancora da estrarre deve rimanere dov'è, mentre dobbiamo correre sempre più velocemente verso le energie rinnovabili (ARMAROLI, 2021a).

6. La transizione

Dopo essersi alimentata con biomasse per diversi millenni, circa 200 anni fa l'umanità è entrata in una lunghissima transizione energetica, nella quale siamo anco-

¹ Durante la combustione, il carbonio si lega con l'ossigeno atmosferico. Ne consegue che la quantità di CO₂ emessa è più che doppia rispetto alla quantità di combustibili fossili consumati. È un dato stechiometrico ovvio per un chimico, ma l'esperienza di conferenziere mi suggerisce che non lo è affatto per il cittadino medio.

ra immersi (SMIL, 2010), che è destinata a durare ancora qualche decennio. Dagli inizi dell'Ottocento, il carbone ha progressivamente preso il posto di legna e biomasse. Successivamente, agli albori del Novecento, il petrolio ha cominciato a sostituire e integrare il carbone. A sua volta, il petrolio è stato affiancato e in parte sostituito dal gas al termine del secondo conflitto mondiale. L'ascesa del gas è stata poi affiancata da quella del nucleare e delle rinnovabili. Queste ultime non hanno avuto un percorso comune: l'ascesa di idroelettrico e geotermico coincide temporalmente con quella, rispettivamente, di petrolio e gas. L'eolico ha cominciato la sua crescita alla fine degli anni '90 del Novecento, mentre il fotovoltaico circa un decennio dopo. Da questo lungo e complesso processo emerge un dato netto: da oltre 60 anni sistema energetico mondiale è inchiodato a una dipendenza dai combustibili fossili superiore all'80%. Cambiare un regime così consolidato, sarà inevitabilmente difficile (ARMAROLI, 2020).

7. Le risorse a disposizione

Questo minuscolo frammento di universo che si chiama Terra, è stipato e inondato da una quantità colossale di energia. Tralasciando le enormi risorse energetiche annidate nella crosta terrestre come combustibili fossili – che sono il problema che dobbiamo risolvere e non la soluzione che cerchiamo – restano quattro categorie principali di flussi energetici (ARMAROLI, 2020).

Quella di gran lunga più rilevante in termini di quantità, è *l'energia solare*: può essere sfruttata, per via diretta (es. pannelli solari termici e fotovoltaici) o indiretta (impianti eolici, idroelettrici, a biomasse, correnti marine). Inutile sottolineare che il sole è una fonte rinnovabile, dato che continuerà a illuminare la terra per centinaia di milioni di anni. La seconda è *l'energia nucleare* da fissione o da fusione, ottenibile a partire da particolari elementi chimici o isotopi. La terza è *l'energia geotermica*, ovvero il calore del sottosuolo ad alta temperatura (che emerge in alcune regioni del pianeta) o a bassa temperatura (disponibile ovunque). La quarta è *l'energia di interazione gravitazionale* Terra-Luna e Terra-Sole che in alcune regioni muove enormi masse d'acqua.

Delle quattro carte che possiamo giocare per la transizione energetica ne liquido due con poche parole, per ragioni di spazio. Il nucleare da fissione è un'opzione destinata a diventare sempre più marginale, poiché caratterizzato da una forte insostenibilità sia tecnica che, ancor più, economica (ARMAROLI *et al.*, 2017). La fusione nucleare, d'altro canto, è da molti decenni in uno stadio di

sviluppo iniziale, quindi non potrà concretamente contribuire al processo di transizione che dobbiamo in gran parte realizzare entro la metà del secolo. L'opzione gravitazionale, infine, non può che essere minoritaria per una serie di questioni tecniche legate sia alla bassa densità di potenza che alla esposizione degli impianti tecnologici, immersi nelle acque marine (ARMAROLI *et al.*, 2011a).

8. Sole e Terra

In meno di un'ora il Sole invia sulla Terra una quantità di energia pari a quella che l'umanità consuma in un anno. La quantità *media* di potenza solare che raggiunge ogni singolo metro quadro del globo è pari a 170 W. Pur tenendo conto che parte di questa energia non può essere utilizzata (es. in mare aperto) o serve ad alimentare processi naturali vitali (fotosintesi, ciclo dell'acqua, riscaldamento della biosfera, ecc.), possiamo contare su un flusso di radiazione solare realmente sfruttabile pari a centinaia di volte il fabbisogno energetico dell'umanità (ARMAROLI *et al.*, 2011a). Evidentemente la materia prima non è un problema, tuttavia questo gigantesco flusso solare è soggetto a due limitazioni che debbono essere attentamente considerate.

1) La radiazione luminosa è molto diluita e discontinua su scala locale, quindi occorre raccogliere e convogliare il gigantesco e diluito flusso di energia solare per utilizzarlo con "l'intensità" necessaria dove richiesto, a cominciare dai punti di maggiore consumo: città e distretti industriali.

2) L'energia solare, come tale, serve a poco: deve essere convertita e accumulata in energia utile *di uso finale*, essenzialmente elettricità e combustibili. Ma per produrre convertitori e accumulatori di energia rinnovabile (pannelli fotovoltaici, generatori eolici, batterie, collettori di calore, celle a combustibile, ecc.) occorrono risorse minerarie, che si trovano annidate nella crosta terrestre, esattamente come i combustibili fossili. Quindi in un sistema energetico alimentato al 100% da energie rinnovabili dovremo continuare a scavare nel sottosuolo. Non più alla ricerca di petrolio, carbone e gas, ma di risorse minerali per costruire i convertitori e gli accumulatori che rendono fruibile il gigantesco flusso solare che ci raggiunge (ARMAROLI *et al.*, 2017; ARMAROLI, 2020).

Un'altra risorsa energetica di grande importanza è il sottosuolo, un immenso serbatoio di calore ad alta temperatura, che talvolta raggiunge spontaneamente la superficie con manifestazioni spettacolari come i geysir. Questo vapore caldissimo e già pronto può essere utilizzato per impianti di teleriscaldamento o per produrre

elettricità. Un'opzione geotermica più largamente accessibile e molto pratica è l'utilizzo del sottosuolo come serbatoio di calore a temperatura costante e relativamente bassa (15-20 °C) che può essere sfruttato per riscaldare e raffrescare in modo efficiente gli edifici mediante pompe di calore azionate dall'energia elettrica. In questo modo è possibile svincolare gli usi termici dal consumo di combustibili fossili (ARMAROLI, 2020).

9. Usi finali: elettricità e combustibili

Nella nostra vita quotidiana utilizziamo due forme finali di energia: elettricità e combustibili. L'elettricità è facile da trasportare ma difficile da immagazzinare: tutti sanno che le batterie tendono a scaricarsi anche se non utilizzate. Al contrario i combustibili sono difficili da trasportare (specie se solidi o gassosi) ma possono mantenere il loro contenuto energetico per tempi indefiniti.

Il dibattito pubblico sull'energia è tipicamente dominato dalle tecnologie elettriche (fotovoltaico, eolico, nucleare). Oggi però solo un quarto del consumo finale di ogni cittadino è costituito da elettricità: tre quarti sono combustibili che servono per scaldare gli ambienti in cui viviamo (case, luoghi di lavoro, edifici pubblici ecc.) e per alimentare i mezzi di trasporto (auto, camion, bus, aerei, navi) (ARMAROLI *et al.*, 2017). Anche una frazione consistente dell'elettricità è prodotta bruciando combustibili fossili (in Italia la quota è circa del 55%, principalmente gas).

Nella fase attuale le uniche tecnologie rinnovabili già dislocate su vasta scala e totalmente competitive sul mercato sono elettriche, in particolare fotovoltaico ed eolico. Al contrario, purtroppo, la produzione di combustibili utilizzando flussi energetici rinnovabili è invece a uno stadio di sviluppo più arretrato (ARMAROLI *et al.*, 2016). La buona notizia, però, è che esistono già le tecnologie che possono sostituire i combustibili con l'elettricità in settori molto importanti ed energivori: trasporto su strada e riscaldamento. Questo è un punto chiave della transizione, poiché i motori elettrici sono più efficienti dei motori termici e permettono un abbattimento dei consumi di energia primaria.

10. La transizione elettrica: mobilità e riscaldamento

Da anni quasi il 70% della nuova potenza elettrica installata nel mondo è basata su eolico e fotovoltaico. Una stima conservativa suggerisce che nel 2019 queste due tecnologie hanno prodotto l'equivalente di 360 centrali nucleari o a carbone da 1000 MW, pari al 7% della do-

manda elettrica mondiale (ARMAROLI, 2020). Nessuno avrebbe potuto prevedere un successo di questo tipo anche solo un decennio fa. E siamo solo all'inizio.

Il settore che oggi meglio illustra l'inarrestabile passaggio alla elettrificazione è quello dell'automobile, che si trova agli inizi di una rivoluzione che lo cambierà per sempre. La «tecnologia abilitante» che ha reso possibile questo processo è la batteria agli ioni di litio, i cui inventori sono stati insigniti del premio Nobel per la chimica nel 2019. Questo dispositivo ha sostanzialmente aumentato la densità energetica (intesa come energia per unità di volume) degli accumulatori, tanto che oggi è possibile produrre modelli elettrici che in termini di dimensioni e peso sono del tutto comparabili alle auto tradizionali (ARMAROLI *et al.*, 2019). Vi è però una sostanziale differenza: nell'auto tradizionale il componente più pesante e ingombrante è il motore, nell'auto elettrica è la batteria. Circa metà del peso della batteria è costituito dai materiali che compongono gli anodi e i catodi delle singole celle (in una batteria vi sono centinaia di celle) cui si va ad aggiungere l'elettrolita. I metalli e materiali più comuni presenti in questi componenti sono litio, cobalto, nichel, ferro, manganese e grafite. Tra questi, il più difficile da reperire è il cobalto, per cui si tende sempre più a limitarne l'uso. La chimica dei catodi delle batterie varia a seconda delle aziende produttrici e degli utilizzi specifici dei dispositivi (auto, telefoni cellulari, elettrodomestici, ecc.).

Una batteria agli ioni di litio con una capacità di 75 kWh (auto di lusso) pesa circa 480 kg; un'auto equivalente con motore a combustione richiede solo 25 kg di benzina per fornire la stessa quantità di energia alle ruote. Tra le due auto esiste però una differenza sostanziale. Un veicolo elettrico è un sistema chiuso che scambia con l'ambiente esterno solo energia elettrica, mentre un'auto termica è un sistema aperto caratterizzato un incessante flusso in entrata di carburanti liquidi trasformati in un flusso in uscita di sostanze gassose. Dopo 250.000 km, un'auto diesel che consuma 18 km/L, ha bruciato oltre 10 tonnellate di carburante (pari a circa 8 volte il peso dell'intera vettura e oltre 20 volte il peso di una batteria da 75 kWh) ed emesso 35 tonnellate di CO₂, circa 25 volte il suo peso. Un'auto elettrica non ha tubo di scarico: porta sempre con sé la sua pesante e sofisticata batteria, ma in compenso non rilascia rifiuti nell'ambiente (ARMAROLI, 2020). Quando una batteria per auto si ricarica solo per l'80% è considerata esausta, questo tipicamente avviene dopo circa 200.000 km. A questo punto è pronta per il cosiddetto utilizzo di seconda vita, di solito come stoccaggio per impianti da fonti rinnovabili intermittenti. Quando diventa completamente inutilizzabile,

una batteria di automobile deve essere presa in carico dal costruttore che l'ha immessa sul mercato, secondo la legislazione vigente che prevede la cosiddetta «responsabilità estesa del produttore». Da un punto di vista tecnico una batteria agli ioni di litio è integralmente riciclabile: essa diviene la “miniera” per le generazioni successive di batterie. In altre parole, l'auto elettrica è una esemplificazione di economia circolare in cui il rifiuto diventa una risorsa mentre l'auto termica rappresenta la quintessenza del concetto di economia lineare tradizionale: il suo principale rifiuto, la CO₂, viene indiscriminatamente immesso nell'ambiente causando un grave danno alla stabilità climatica della Terra.

Giova sottolineare che l'opzione elettrica è nettamente preferibile anche rispetto ai biocombustibili, soprattutto in termini di ottimizzazione nell'uso del flusso solare che colpisce la superficie terrestre. 1 m² di terreno coltivato a colza per produrre biodiesel permette, in un anno, di produrre una quantità di combustibile pari al consumo di un'auto a gasolio per 2 km. La luce che colpisce 1 m² di terreno ricoperto di un pannello al silicio cristallino che alimenta un'auto elettrica di uguale potenza permette, in un anno, di percorrere 900 km, la distanza che separa Roma da Monaco di Baviera. Il frustrante risultato del primo caso è la conseguenza di tre processi, il primo dei quali a bassissima efficienza: fotosintesi naturale (resa media inferiore all'1%), produzione di biodiesel (50%), utilizzo di motore a combustione interna (22%) (ARMAROLI *et al.*, 2017). Il silicio cristallino ha un'efficienza del 20% nel convertire la luce solare, cioè 1-2 ordini di grandezza superiore ai sistemi fotosintetici naturali, mentre il motore elettrico ha un'efficienza 3-4 volte superiore rispetto al motore termico.

Un altro cruciale passo verso la transizione riguarda l'elettrificazione degli impianti di riscaldamento/raffrescamento attraverso le pompe di calore, che comporterebbe un sostanziale calo del consumo di combustibili fossili, in particolare gas nel periodo invernale. Le più efficienti pompe di calore sono quelle geotermiche: ogni unità di energia elettrica permette di estrarre dal sottosuolo circa 4 unità di energia termica. Questo tipo di approccio consente la realizzazione di edifici totalmente alimentati da elettricità rinnovabile, se dotati di un impianto fotovoltaico di adeguata potenza e una batteria di accumulo per i surplus produttivi nelle ore di maggiore irraggiamento solare. Progettazioni di questo tipo permettono anche di coprire l'intero fabbisogno elettrico di un'auto che percorre 15 mila km l'anno, producendo quindi in casa il fabbisogno energetico per la mobilità personale (ARMAROLI, 2020).

11. Combustibili dal sole e idrogeno

Il perno della transizione energetica è l'elettrificazione. Per alcune applicazioni, tuttavia, i combustibili (soprattutto liquidi) restano insostituibili, grazie alla loro elevata densità di energia. Ad esempio, è presumibile che dovremo utilizzare ancora per lungo tempo un combustibile liquido per sollevare in cielo aerei da centinaia di tonnellate, facendoli viaggiare fino a 20 ore a oltre 10 mila metri e a 50 gradi sottozero. Inoltre, per svincolarci dai combustibili fossili, dobbiamo anche trovare una soluzione per la quota (circa 10%) che alimenta l'industria chimica. Sono in fase di studio avanzate strategie per produrre sia combustibili che prodotti chimici mediante la luce solare (fotosintesi artificiale), con la mediazione di fotosensibilizzatori che facilitano l'attivazione fotochimica di molecole stabili (tipicamente H₂O, CO₂) e di catalizzatori che agevolano i processi di trasferimento elettronico e indirizzano le reazioni verso i prodotti desiderati (ARMAROLI *et al.*, 2016).

Un processo molto importante e più consolidato lungo la via della transizione è la produzione di idrogeno molecolare (H₂) tramite l'elettrolisi dell'acqua, utilizzando elettricità rinnovabile. L'idrogeno così ottenuto può poi essere riconvertito in energia elettrica con celle a combustibile. In questo modo esso diventa un «vettore» energetico capace di accumulare momentaneamente elettricità rinnovabile sotto forma di energia chimica e avviare all'intermittenza di solare ed eolico, convertendosi poi nuovamente in elettricità quando richiesto (ARMAROLI *et al.*, 2011b). L'idrogeno prodotto da tecnologie rinnovabili ed elettrolisi dell'acqua (definito «verde») può essere usato per produrre metanolo ed etanolo (combustibili artificiali), ammoniaca (fertilizzanti), oppure può essere impiegato direttamente come riducente chimico dell'industria pesante al posto del carbone, ad esempio nel settore dell'acciaio. Per quanto riguarda i trasporti, la principale prospettiva di utilizzo dell'idrogeno è il trasporto pesante (camion, navi, treni), con grandi centri di produzione localizzati, senza necessità di reti di distribuzione (il trasporto dell'idrogeno è un processo tecnologicamente complicato) (ARMAROLI, 2021b). È invece improbabile che esso possa competere con le batterie nel settore del trasporto leggero (automobili, motocicli, biciclette), dovendo confrontarsi con una tecnologia che dispone di una rete di distribuzione già esistente, quella elettrica, con la quale ogni utente può agevolmente ricaricare il proprio mezzo con un impianto domestico.

È importante sottolineare che *solo* l'idrogeno verde, interamente prodotto da fonti rinnovabili, è una strada

utile per la transizione energetica. Oggi però molte aziende energetiche cercano di promuovere il cosiddetto «idrogeno blu», cioè estratto dal metano intrappolando la CO₂ di scarto nel sottosuolo (ARMAROLI, 2021b). È sostanzialmente una riproposizione, in versione gas, dei progetti di carbone pulito lanciati 20 anni fa, che dovevano dimostrare la possibilità di produrre energia elettrica da centrali a carbone iniettando la CO₂ di scarto nel sottosuolo. Il risultato è stato un colossale fiasco tecnico ed economico: non esiste oggi al mondo un singolo esempio di impianto a carbone pulito, dopo che sono state spese decine di miliardi (ARMAROLI, 2021a). L'idrogeno blu è destinato a ripercorrere la traiettoria di questi progetti fallimentari. È auspicabile che non vengano spese risorse pubbliche per sostenere questa idea, specie nell'ottica del Recovery Plan attualmente in fase di preparazione.

12. I colli di bottiglia

Non esistono soluzioni facili a problemi complessi, e la transizione è decisamente uno di questi. Numerosi colli di bottiglia rendono la sfida particolarmente difficile, vediamo brevemente alcuni (ARMAROLI, 2020).

– *Disponibilità di risorse.* Come già accennato, la transizione richiede l'uso di ingenti risorse materiali (in particolare metalli, ma non solo) per fabbricare trasformatori e accumulatori di flussi rinnovabili. In altre parole, la luce solare che raggiunge la Terra può coprire interamente i nostri fabbisogni energetici, ma non elimina la necessità di un uso sostenibile e condiviso delle limitate risorse naturali presenti sul nostro pianeta (ARMAROLI *et al.*, 2017). Tornando di nuovo all'auto elettrica, se tutte le auto italiane fossero a trazione elettrica, si può stimare un consumo di 80 TWh, che sarebbe del tutto gestibile in un processo che può ragionevolmente durare 10-20 anni, dato che già oggi l'Italia produce 120 TWh solo di rinnovabili. Passando alle batterie la situazione però si complica (ARMAROLI *et al.*, 2019). Ogni auto richiede circa 10 kg di litio, e occorrerebbero 800.000 ton/anno di questo metallo se tutti gli 80 milioni di autovetture vendute ogni anno nel mondo fossero elettriche. Questo valore è circa 10 volte la produzione mondiale annuale odierna (USGS, 2021). È sicuramente possibile incrementare la produzione mondiale di litio anche di 10 volte rispetto a oggi, ma questo andamento non è sostenibile in maniera indefinita nel corso del tempo. Il riciclo intensivo del litio nelle batterie è quindi l'unica strada percorribile per permettere la transizione alla mobilità elettrica, garantendo un uso sostenibile dei circa 21 milioni di tonnellate di riserve di litio attualmente stimate (USGS, 2021), che debbono coprire anche molti altri usi.

– *La scala colossale del processo.* Anche qui è utile farsi aiutare da un esempio. Oggi nel mondo si producono 70 milioni di tonnellate l'anno di idrogeno molecolare in impianti dedicati (altri 50 milioni di tonnellate sono ottenuti in vari processi chimici). Se fosse prodotto utilizzando elettrolisi dell'acqua questo processo assorbirebbe, da solo, il 15% della domanda elettrica mondiale, ovvero circa 6 volte l'attuale produzione globale di fotovoltaico (SUNRISE, 2020). È quindi evidente che occorre una gigantesca espansione della capacità rinnovabile per fare in modo che l'idrogeno verde possa contribuire in modo significativo alla transizione energetica. Gli attuali 70 milioni di tonnellate di idrogeno sono utilizzati per la sintesi della ammoniaca e nel settore petrolchimico. Per dare un'idea del valore quantitativo di questo numero, potrebbe alimentare circa il 50% della flotta mondiale attuale di auto, se fossero a idrogeno.

– *Il ritorno energetico.* Per ottenere energia utile occorre consumare energia. Un litro di benzina venduto in Europa è tipicamente estratto da un pozzo di petrolio in un altro continente, forse in mezzo all'oceano a chilometri di profondità. Ha percorso lunghi tragitti per oleodotti, mari, strade; è passato da una raffineria che lo ha trasformato in combustibile per motori. In pratica, un litro di benzina ha consumato molta energia prima di erogare quella in esso contenuta. Il concetto è quantitativamente descritto utilizzando il parametro EROI (Energy Return On Investment), cioè il rapporto tra l'energia che ottengo da una data fonte e quella necessaria per renderla disponibile. È largamente riconosciuto che se la quantità di energia che ottengo non è almeno 5 volte quelle investita, alla lunga il sistema non è più economicamente e tecnicamente sostenibile (ARMAROLI *et al.*, 2016). Il sistema energetico tradizionale (es. petrolio del Golfo Persico, idroelettrico) è stato caratterizzato da fonti e tecnologie con EROI anche superiori a 50-100. È grazie anche a questo che siamo cresciuti così velocemente. Ma non è detto che sia una situazione sempre replicabile in futuro.

– *Il numero crescente di consumatori.* In assenza di eventi catastrofici imprevedibili, la popolazione mondiale si attesterà attorno ai 9,5/9,7 miliardi di abitanti nel 2050 (ONU, 2019). Una Cina in più, in termini di abitanti, da qui alla metà del secolo: un incremento analogo a quello avvenuto dall'anno 2000 ad oggi. Mentre aumenta la platea dei consumatori di energia, è presumibile che le limitate risorse necessarie al processo saranno sempre più contese. È auspicabile che la lezione della pandemia Covid-19 abbia aumentato la consapevolezza che tutta l'umanità ha un destino comune: nessuno si salva da solo.

– *Le disparità.* Un italiano consuma 270 volte più energia di un abitante del Ciad. È lecito chiedersi se il mio consumo energetico fosse 270 volte inferiore, come sarebbe la mia vita? Cosa farei? Probabilmente cercherei di fuggire altrove. Abbattere la disparità nell'accesso all'energia è lo strumento chiave per aumentare le opportunità delle persone, dando la possibilità di sfuggire alla povertà senza obbligarle a scappare dalla loro terra, alla ricerca di un sogno che spesso si trasforma in un incubo. Eliminare le disparità energetiche è un obiettivo difficile, ma cruciale, della transizione, affinché essa sia anche socialmente sostenibile (ARMAROLI *et al.*, 2017, 2007).

13. Considerazioni finali

La transizione alle energie rinnovabili è lo strumento chiave per porre rimedio al cambiamento climatico antropogenico, che mette a rischio la sopravvivenza della nostra civiltà. Gli ostacoli tecnici ed economici lungo la strada di questo epocale processo di trasformazione sono molteplici e spesso enormi. Oltre a tutto questo, abbiamo una spina nel fianco: l'*urgenza*. Dobbiamo cioè dar corpo a una trasformazione da realizzare in gran parte entro solo 30 anni, un tempo molto più breve delle transizioni energetiche susseguitesesi negli ultimi due secoli. Dobbiamo correre, non c'è un solo giorno da perdere (ARMAROLI, 2020). Per questo motivo occorre (a) spingere al massimo sulle cose che sappiamo già fare, perché possono portare risultati consistenti nei tempi richiesti (elettrificazione ed efficientamento, a cominciare dai settori dei trasporti e del riscaldamento); (b) investire in ricerca su quelle che potranno aiutarci nel medio (idrogeno verde) e lungo termine (fotosintesi artificiale, fusione nucleare, tecnologie avanzate di abbattimento della CO₂ (HEPBURN *et al.*, 2019)); (c) abbandonare le opzioni che hanno già mostrato insostenibilità economica o ambientale, vulnerabilità e infattibilità tecnica (idrocarburi non convenzionali, fissione nucleare, sequestro della CO₂ nel sottosuolo).

Le crisi pandemiche, come quella che stiamo vivendo, hanno la caratteristica di essere a picco, cioè sono destinate a passare. Un'onda epidemica ha un profilo definito: il contagio cresce esponenzialmente nelle fasi iniziali, la sua velocità di diffusione raggiunge un picco per poi rallentare fino allo spegnimento dell'evento.

Possono manifestarsi ondate successive anche pesanti, ma l'evento è comunque destinato a essere transitorio: nessuna civiltà è mai scomparsa a causa di una pandemia. L'emergenza energia-clima ha invece una natura radicalmente diversa: è un baratro. Purtroppo non possiamo sapere se abbiamo già iniziato il viaggio senza ritorno nel baratro di sconvolgimenti che metteranno a rischio la stabilità della biosfera, cioè del presupposto chiave della civiltà che abbiamo costruito. Perché ovviamente è la nostra civiltà ad essere a rischio, non il sistema Terra, che sarà in grado di adattarsi come ha sempre fatto. Se l'Antartide inizierà a sciogliersi a ritmi ancor più sostenuti, sarà un processo senza ritorno sulla nostra scala temporale. Purtroppo non esistono singoli strumenti, efficaci e definitivi come un vaccino, per combattere le conseguenze della crisi energia-clima.

Vorrei concludere con un numero per dare l'idea della sfida che abbiamo davanti. L'obiettivo europeo di abbattimento delle emissioni climalteranti per il 2030 significa quanto segue: nei prossimi 10 anni dobbiamo ridurre le emissioni a una velocità *9 volte superiore* a quella che abbiamo tenuto negli ultimi 30 anni.² È un'operazione semplicemente ciclopica che impone sostanziali cambiamenti nelle infrastrutture energetiche, nelle filiere industriali, nelle catene di approvvigionamento e distribuzione dei beni, nel sistema finanziario, nei rapporti tra le nazioni, nella struttura del lavoro, nel trasporto delle merci e delle persone e persino nelle abitudini quotidiane di ognuno di noi.

In queste settimane stiamo vivendo le enormi difficoltà del piano di vaccinazione contro il Covid-19. È auspicabile che i decisori politici siano consapevoli che il raggiungimento degli obiettivi europei di emissione al 2030 e 2050 richiedono scelte così ardue e azioni così complesse che al confronto, tra pochi anni, questa difficile campagna vaccinale – la più imponente della storia – apparirà un'operazione di assai modesta entità.

² Le emissioni di gas serra in Italia furono 520 Mton di CO₂ equivalenti nel 1990. Nel 2018 siamo passati a 439 Mton con un calo del 15.7%. L'obiettivo -55% al 2030 significa che dobbiamo arrivare fra un decennio a 234 Mton, cioè dobbiamo diminuire le emissioni del 46,7% rispetto al 2018. Un taglio di emissioni del triplo in soli 10 anni anziché 30 anni, significa aumentare di nove volte la velocità del processo complessivo.

BIBLIOGRAFIA

- Armaroli, N. 2020. *Emergenza energia. Non abbiamo più tempo*. Edizioni Dedalo, Bari.
- Armaroli, N. 2021a. CCS, pozzo senza fondo. *Sapere* 88 (2), 5.
- Armaroli, N. 2021b. Da Fukushima all'idrogeno. *Sapere* 88 (1), 5.
- Armaroli, N., Balzani, V. 2007. The future of energy supply: Challenges and opportunities. *Angew. Chem. Int. Ed.* 46, 52-66.
- Armaroli, N., Balzani, V. 2011a. *Energy for a sustainable world. From the oil age to a sun powered future*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany.
- Armaroli, N., Balzani, V. 2011b. The hydrogen issue. *ChemSusChem* 4, 21-36. doi:10.1002/cssc.201000182
- Armaroli, N., Balzani, V. 2016. Solar electricity and solar fuels: Status and perspectives in the context of the energy transition. *Chem.-Eur. J.* 22, 32-57. doi:10.1002/chem.201503580
- Armaroli, N., Balzani, V. 2017. *Energia per l'astronave Terra. Terza edizione, l'era delle rinnovabili*. Zanichelli Editore, Bologna.
- Armaroli, N., Monti, F., Barbieri, A. 2019. Battery electric vehicles: Perspectives and challenges. *Substantia* 3, 75-89. doi:10.13128/Substantia-576
- Bergoglio J. 2015, Laudato si', lettera enciclica sulla cura della casa comune, http://www.vatican.va/content/francesco/it/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html
- BP 2020, BP statistical review of world energy, <http://www.bp.com>
- EEA (European Environment Agency) 2021, Total greenhouse gas emission trends and projections in Europe, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-7/assessment>
- Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E.A., Fuss, S., Mac Dowell, N., Minx, J.C., Smith, P., Williams, C.K. 2019. The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal. *Nature* 575, 87-97. doi:10.1038/s41586-019-1681-6
- International Energy Agency 2020, Key world energy statistics, <http://www.iea.org/>
- Levi, P.G., Cullen, J.M. 2018. Mapping global flows of chemicals: From fossil fuel feedstocks to chemical products. *Environ. Sci. Technol.* 52, 1725-1734. doi:10.1021/acs.est.7b04573
- Lim, S.-R., Kang, D., Ogunseitan, O.A., Schoenung, J.M. 2013. Potential environmental impacts from the metals in incandescent, compact fluorescent lamp (CFL), and light-emitting diode (LED) bulbs. *Environ. Sci. Technol.* 47, 1040-1047. doi:10.1021/es302886m
- LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) 2021, Energy flow charts, <https://flowcharts.llnl.gov>
- NASA (National Aeronautics and Space Administration) 2021, Global ice viewer, <https://climate.nasa.gov/interactives/global-ice-viewer>
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 2021, Trends in atmospheric carbon dioxide, <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- NSIDC (National Snow and Ice Data Center) 2021, Arctic sea ice news and analysis, <http://nsidc.org/arcticseaicenews/>
- ONU 2019, World population prospects 2019, <https://www.un.org/development/desa/pd/themes/population-trends>
- Qiu, J. 2017. Antarctica's sleeping ice giant could wake soon. *Nature* 544, 152-154. doi:10.1038/544152a
- Smil, V. 2010. *Energy transitions: History, requirements, prospects*. Praeger/ABC-CLIO, Santa Barbara, CA.
- Smil, V. 2019. *Growth. From microorganisms to megacities*. MIT Press, Cambridge, MA.
- SUNRISE EC Project 2020, Sunrise project technological roadmap, www.sunriseaction.com
- Tollefson, J. 2018. Can the world kick its fossil-fuel addiction fast enough? *Nature* 556, 422-425. doi:10.1038/d41586-018-04931-6
- USGS (US Geological Survey) 2021, Lithium statistics and information, <https://www.usgs.gov/centers/nmic/lithium-statistics-and-information>
- Volk, T. 2008. *CO₂ rising. The world's greatest environmental challenge*. MIT Press, Cambridge, MA.