

SALVARE IL PIANETA: ENERGIE RINNOVABILI, ECONOMIA CIRCOLARE, SOBRIETÀ - PARTE PRIMA

Vincenzo Balzani

Università di Bologna

A tre anni dalla pubblicazione dell'enciclica Laudato si', a due anni dall'entrata in vigore dell'Accordo di Parigi (4 novembre 2016) e alla vigilia del vertice COP 24 che si terrà a Katowice in dicembre, la transizione energetica dai combustibili fossili alle energie rinnovabili fa forti progressi nonostante le turbolenze politiche ed economiche e gli ostacoli posti dalle compagnie petrolifere. Per salvare il pianeta, però, non basta la transizione energetica. Sono necessarie anche la transizione dall'economia lineare all'economia circolare e dal consumismo alla sobrietà.



1. Introduzione

Più di 100 anni fa Giacomo Ciamician, lo scienziato che ha dato nome al Dipartimento di Chimica dell'Università di Bologna, aveva capito che non si sarebbe potuto contare per lungo tempo sui combustibili fossili come sorgente di energia e che il destino dell'umanità sarebbe stato quello di fare uso dell'energia solare [1]. Dopo la sbornia energetica a base di carbone, petrolio e gas iniziata nella prima metà del secolo scorso, nel 1973 la crisi causata dalla guerra del Kippur fra Egitto e Israele ci fece capire bene, forse per la prima volta, la fondamentale importanza di poter disporre liberamente di energia. Sperimentando le "domeniche a piedi", ci rendemmo conto che i combustibili fossili, anche se ancora abbondanti, avevano il difetto di non essere disponibili sempre e dovunque. Naturalmente si sapeva già che i combustibili fossili erano causa di inquinamento e quindi dannosi per la salute, ma non era ancora emerso il problema più grave: le enormi quantità di anidride carbonica prodotte ed immesse nell'atmosfera causano il riscaldamento globale (effetto serra) che è responsabile del cambiamento climatico. Quando questo problema incominciò a preoccupare, nel 1988 fu istituito sotto l'egida dell'ONU il Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC* [2]) con lo scopo di capire meglio quanto stava accadendo.

Al primo rapporto IPCC del 1990 fecero seguito altri documenti e alcune conferenze internazionali nelle quali emerse più chiaramente la gravità del problema e, di conseguenza, la necessità di ridurre l'uso dei combustibili fossili e di sviluppare forme di energia alternative: l'energia nucleare, già disponibile da decenni, ma in fase di stallo, e/o le energie rinnovabili, il cui sviluppo stava iniziando fra lo scetticismo generale e i commenti ironici della lobby dei combustibili fossili e dei sostenitori della rinascita dell'energia nucleare. Il fotovoltaico, usato da decenni nei satelliti artificiali e in situazioni particolari come i rifugi in alta montagna, incominciava a comparire timidamente sui tetti di qualche abitazione.

Verso la fine del secolo scorso aumentò la consapevolezza dei danni causati dai combustibili fossili alla salute e all'ambiente e, mentre la rinascita del nucleare non riuscì a decollare a causa di insormontabili problemi economici oltre che tecnici (collocazione delle scorie, possibilità di disastrosi incidenti), le energie rinnovabili iniziarono a crescere in maniera esponenziale. Oggi è opinione generale che il nucleare convenzionale (fissione) non potrà

umentare il suo contributo al mix energetico nei prossimi decenni [3, 4] e che la fusione nucleare, un processo molto complesso e tuttora di incerta realizzazione, non potrà fornirci energia prima del 2060 [5, 6]. Pertanto la transizione dai combustibili fossili alle energie rinnovabili si è andata sempre più affermando come l'unica realistica soluzione del problema energia-clima [7].

Nel 1992, al convegno di Rio de Janeiro, fu discussa la bozza di un accordo che prevedeva azioni specifiche per ridurre l'emissione di gas serra. Questo accordo fu successivamente modificato e approvato a Kyoto nel 1997 [8]. Con il Protocollo di Kyoto le Nazioni aderenti si impegnavano a diminuire entro il 2012 l'emissione di gas serra di una percentuale compresa fra il 5 e il 10% rispetto alle emissioni del 1990. Il Protocollo però è rimasto bloccato per lungo tempo a causa della mancata ratifica da parte di Stati Uniti, Australia e Russia e, anche quando è stato approvato, non ha avuto un grande impatto a causa della modesta entità delle riduzioni che prevedeva. Le conferenze dell'ONU sui cambiamenti climatici tenutesi a Bali nel 2007 e a Copenaghen nel 2009, nonostante grandi sforzi diplomatici, non hanno portato a sostanziali progressi. In un rapporto del 2014, IPCC ha ammonito che l'influenza delle attività umane sul cambiamento climatico è inequivocabile [9]: la Terra si riscalda, fondono i ghiacci, il livello del mare si alza, eventi meteorologici estremi sono sempre più frequenti. Nel dicembre 2015, dopo un lungo ciclo di negoziati formali ed informali, è stata convocata una Conferenza a Parigi (COP 21) [10], preceduta di alcuni mesi dall'importante enciclica *Laudato si'* di Papa Francesco nella quale il cambiamento climatico e problemi collegati erano affrontati con autorevolezza e preoccupazione [11]. Alla Conferenza di Parigi le delegazioni di tutte le Nazioni del mondo hanno unanimemente riconosciuto la responsabilità dei combustibili fossili riguardo il cambiamento climatico e hanno raggiunto un accordo di massima basato sui seguenti quattro punti [10]:

- 1) il cambiamento climatico rappresenta un rischio urgente e potenzialmente irreversibile per la società umana e per il pianeta;
- 2) è assolutamente necessario ridurre fortemente le emissioni di gas serra per limitare, al 2050, l'aumento della temperatura media globale a meno di 2 °C rispetto al livello pre-industriale e intensificare gli sforzi per mantenere l'aumento entro 1,5 °C;
- 3) nell'affrontare il problema del cambiamento climatico, i vari Paesi devono considerare, rispettare e promuovere tutti i diritti umani, in particolare il diritto alla salute, alle pari opportunità e all'equità intergenerazionale;
- 4) è urgente che le Nazioni sviluppate mettano a disposizione risorse finanziarie e tecnologiche per permettere ai Paesi in via di sviluppo di incominciare a ridurre le loro emissioni prima del 2020.

Per raggiungere questi obiettivi, i governi dei vari Paesi si sono impegnati ad attuare piani volontari sulla riduzione dei gas serra, con verifiche quinquennali degli impegni presi a partire dal 2023. L'accordo è stato firmato il 22 aprile del 2016 dai capi di Stato e di Governo di 197 Paesi ed è entrato in vigore il 4 novembre 2016. L'Accordo di Parigi ha indicato chiaramente la strada che ogni Paese deve percorrere: quella della transizione dall'uso dei combustibili fossili alle energie rinnovabili forniteci, direttamente o indirettamente, dall'energia solare, che è l'unica risorsa che il nostro pianeta riceve dall'esterno [7].

Al di là della poca concretezza degli impegni presi, l'Accordo di Parigi ha provocato un forte cambiamento culturale di cui oggi si incominciano a vedere i frutti, nonostante molte difficoltà: il ritiro degli USA deciso dal presidente Trump nell'agosto 2017, le turbolenze politiche in varie zone del mondo, gli ostacoli posti dai giganteschi interessi economici che sono in gioco e, non ultima, la grande complessità problema.

2. Il cambiamento climatico

Contrariamente a quanto si continua ad affermare [12], la scienza non è divisa in due fronti sul problema del cambiamento climatico. Gli scienziati che lo negano o che negano che sia generato dall'uso dei combustibili fossili sono una minoranza inferiore al 5% e, come dimostrato da diverse inchieste [13], parte di questa minoranza è sempre stata finanziata dalla lobby americana del carbone. Ancor oggi parte della stampa, anche in Italia, è influenzata per vari motivi dalle grandi compagnie petrolifere tanto che è praticamente impossibile pubblicare lettere di critica riguardo le strategie da esse adottate [14].

In questi ultimi anni ci stiamo accorgendo che non c'è settore economico e sociale che non sia colpito (se non addirittura sconvolto) dal cambiamento climatico [7, 15]: l'agricoltura, fortemente danneggiata dalla siccità e dagli eventi estremi; la sanità, che deve far fronte agli effetti diretti (canicola, inquinamento atmosferico) e indiretti (nuovi vettori di malattie) che mettono in pericolo la salute della popolazione; il territorio, degradato da disastri idrogeologici (frane, alluvioni); gli ecosistemi, devastati dai cambiamenti di temperatura; le inondazioni che colpiscono molte zone costiere; l'avanzata del deserto in certe zone dell'Africa e dell'Asia; le difficoltà di approvvigionamento idrico delle grandi città; fino al turismo, che in inverno spesso non può più contare sulla neve naturale e in estate è danneggiato dalla erosione delle spiagge. Il nostro Paese, collocato in mezzo al Mediterraneo, è una delle zone più critiche del pianeta in termini di impatto del riscaldamento globale.

Il cambiamento climatico non può essere fermato e tanto meno invertito, ma solo rallentato. I gas serra che abbiamo riversato nell'atmosfera, in particolare CO₂, sono stabili per decenni e continuando ad usare i combustibili fossili non facciamo altro che aggiungere altri gas serra a quelli che abbiamo già immesso finora. La quantità di CO₂ riversata nell'atmosfera ogni anno è aumentata dal 1950 fino al 2013, per stabilizzarsi nei tre anni successivi in seguito a una diminuzione delle emissioni in Cina e USA che hanno compensato l'aumento registratosi in altre Nazioni. Nel 2017 la quantità di CO₂ immessa nell'atmosfera è tornata ad aumentare (ca. 2%) a causa dell'aumento di consumi energetici nei Paesi emergenti. Data questa situazione, ovviamente, il livello di CO₂ misurato nell'osservatorio di Mauna Loa continua ad aumentare anno dopo anno e nel maggio 2018 ha raggiunto il valore di 411,2 ppm [16]. Nei prossimi anni si prevede, o almeno si spera, che la quantità di CO₂ generata raggiungerà un picco, per poi diminuire fino ad azzerarsi (Sezione 7.2, Parte Seconda), ma gli scienziati ci ricordano che il cambiamento climatico è più veloce delle nostre azioni per combatterlo [17].

Il riscaldamento globale continua ad aumentare da molti anni, anche se il 2017 è stato un anno leggermente meno caldo del precedente. Studi dettagliati hanno mostrato che la zona dell'Antartide è fra le più fragili. Dal 1992 al 2017 si sono sciolti circa 2 miliardi di tonnellate di ghiaccio, causando un aumento di circa 7 mm nel livello del mare [18]. In mancanza di misure per limitare il riscaldamento del pianeta, continuerà lo scioglimento irreversibile dei ghiacciai con una forte alterazione dell'albedo planetario e un ulteriore aumento nel livello del mare [19]. Proseguendo con questo ritmo, il livello del mare salirebbe di circa 65 cm nel 2100, con gravissime conseguenze in molte regioni del pianeta, ad esempio nelle zone del delta del Nilo, del Mekong, del Gange e di altri fiumi dove si coltiva circa la metà del riso prodotto al mondo.

Anche la Valle Padana potrebbe essere in parte sommersa Fig. 1.

I rapporti di IPCC prevedono un aumento in frequenza ed intensità degli eventi estremi e incrementi della temperatura media per fine secolo ben superiori al valore di 2 °C, cioè all'obiettivo minimo degli accordi di Parigi. Dagli anni Sessanta, il numero di inondazioni è aumentato di 15 volte, i morti per siccità di 10 volte, i tifoni tropicali stanno aumentando di frequenza e anche di intensità [20] e una recente analisi globale sui vari tipi di rischio che l'umanità deve fronteggiare mostra che gli eventi collegati ai cambiamenti climatici sono fra quelli più temuti nei prossimi 10 anni [21].

Bisogna anche ricordare che l'uso dei combustibili fossili causa gravi danni alla salute: su scala mondiale, si registrano circa 3 milioni di morti premature all'anno, a cui si devono sommare

altre 3,8 milioni di persone che nei Paesi più poveri muoiono prematuramente a causa all'inquinamento domestico causato dalla combustione di biomasse [22].



Fig. 1 - Come schematizzato in questo disegno, in seguito allo scioglimento dei ghiacci e al conseguente aumento del livello dei mari la valle Padana potrebbe essere sommersa

3. Una transizione complessa

Oggi, tutti dovrebbero sapere che la transizione dai combustibili fossili alle energie rinnovabili è inevitabile se vogliamo custodire il pianeta e noi stessi che lo abitiamo. È una transizione che richiede tempo perché è estremamente complessa dal punto di vista tecnico, economico, politico e anche culturale. Nella sua forma concentrata offerta dai combustibili fossili, l'energia è stata ed è ancora la base del potere industriale, militare e politico. L'uso dei combustibili fossili ha contribuito al nascere e allo svilupparsi di disuguaglianze all'interno di ciascuna Nazione e fra le Nazioni, nonché all'instaurarsi di equilibri internazionali molto complessi, basati sulla potenza economica e militare, che neppure l'avvento dell'energia nucleare a metà del secolo scorso ha sostanzialmente modificato. Tali equilibri, per quanto consolidati, non potranno però resistere alla transizione dai combustibili fossili alle energie rinnovabili. Si tratta infatti di passare dall'uso di fonti energetiche concentrate, localizzate in pochi Paesi, pericolose, inquinanti, causa di controversie economiche e commerciali, esposti ad attentati e particolarmente adatte ad alimentare le guerre, a fonti energetiche diluite, diffuse su tutta la Terra, non pericolose, non inquinanti, che non possono essere usate per la guerra e neppure essere oggetto di attentati. Infine, ma non ultimo elemento come importanza, bisogna ricordare che mentre più di un miliardo di persone non dispone oggi di elettricità, nei Paesi sviluppati l'abbondanza di energia ha forgiato la società consumistica dello spreco e dell'usa e getta, che non sarà facile modificare.

La transizione energetica, quindi, ancor più che un complesso problema tecnico, implica una vera rivoluzione culturale [11] in quanto riguarda il modo di vivere e di affrontare il futuro, interessa tutti i livelli organizzativi della società e ha profondi effetti economici e politici. La transizione che stiamo affrontando è quindi una grande sfida che può portarci a vivere in un mondo più giusto, più equo e più pacifico.

4. La rivoluzione energetica

La transizione comporta grandi cambiamenti nel modo di produrre, trasportare ed utilizzare l'energia. Le forme di energia che usiamo ogni giorno (energie di uso finale) sono calore, elettricità e energia meccanica (trasporti). Attualmente come energia primaria usiamo essenzialmente i combustibili fossili, con i quali generiamo calore (assieme a CO₂ e inquinamento, con le conseguenze già discusse) che si può usare direttamente, ad esempio per il riscaldamento degli edifici, oppure si può convertire, con bassa efficienza, in energia meccanica o energia elettrica (Fig. 2). Le energie primarie rinnovabili del Sole, del vento e dell'acqua, con le quali dobbiamo sostituire i combustibili fossili, non solo non producono CO₂ e inquinamento, ma hanno un'importante caratteristica: generano energia elettrica e non calore. L'energia elettrica è la forma di energia più pregiata perché può essere usata come tale, oppure può essere convertita con alta efficienza in calore e in energia meccanica (se necessario, anche in combustibili). Quindi, l'economia basata sulle fonti rinnovabili ha un'efficienza energetica molto maggiore dell'economia basata sui combustibili fossili (Fig. 2).

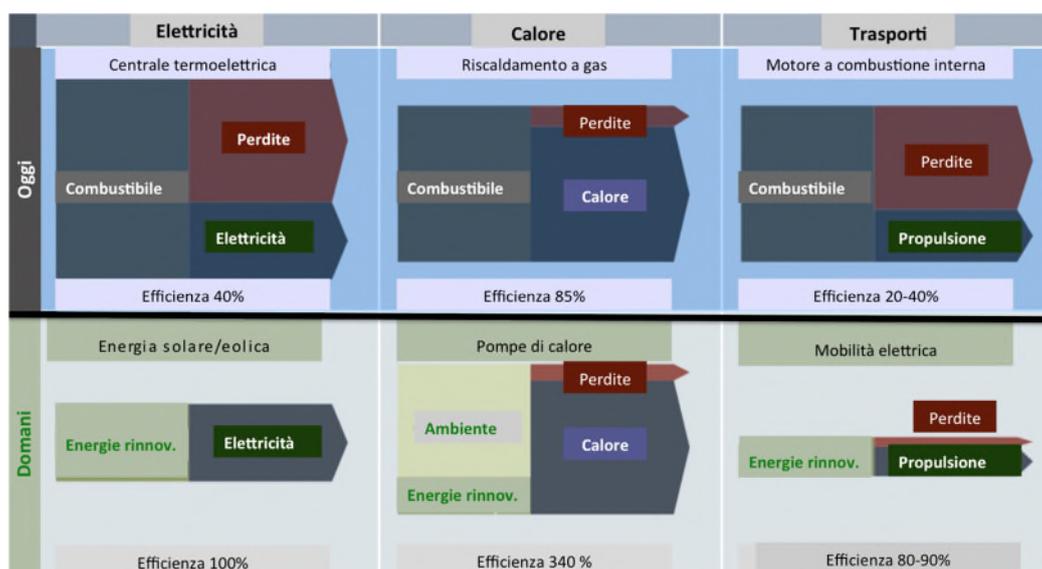


Fig. 2 - Conversione dell'energia primaria in energia di uso finale. Le energie rinnovabili hanno sempre maggiore efficienza dei combustibili

Le energie rinnovabili hanno anche altri vantaggi rispetto a quelle fossili. I combustibili fossili sono presenti allo stato grezzo, sotto la crosta terrestre e solo in certe regioni del mondo. Quindi vanno estratti scavando miniere o pozzi, poi devono essere raffinati e infine trasportati nei luoghi d'uso. Tutte queste operazioni sono pericolose e spesso oggetto di incidenti, da quello della Deepwater Horizon costato alla BP 61,6 miliardi di dollari, a quello molto più piccolo, ma pure significativo, del 6 agosto in autostrada a Bologna [23]. L'energia primaria per produrre elettricità con fotovoltaico, eolico e idroelettrico piove dal cielo, non va trasportata né raffinata, dobbiamo solo raccoglierla. La sua conversione in elettricità non presenta pericoli (a parte l'idroelettrico). L'elettricità generata può essere trasmessa e distribuita tramite fili, senza eccessivi problemi. Le energie rinnovabili, però, rispetto ai combustibili fossili hanno lo svantaggio di essere intermittenti, difetto che si ripercuote sull'energia di uso finale che esse generano, l'elettricità. Per ovviare a questo inconveniente bisogna ricorrere a sistemi di accumulo per l'energia elettrica, di cui si parlerà più avanti (Sezione 8.2.2, Parte Seconda).

5. I combustibili fossili

5.1 Produzione e consumo

Nel 2017 il consumo di energia primaria, in aumento del 2,2% rispetto al 2016, è stato di 13.511 Mtep (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio), ripartito fra le varie fonti come segue: petrolio 34,2%, carbone 27,6%, gas 23,3%, rinnovabili 10,4%, nucleare 4,4% [24]. I Paesi che consumano più energia sono: Cina 23,2%, Stati Uniti 16,5%, India 5,6%, Russia 5,2%, Giappone 3,4%, Canada 2,6%, Germania 2,5%. I rispettivi consumi pro capite (in tep) ci danno un esempio delle grandi disuguaglianze che caratterizzano il nostro mondo: Cina 2,2, Stati Uniti 7, India 0,5, Russia 4,7, Giappone 3,5, Canada 9,2, Germania 3,9.

I primi tre Paesi produttori di petrolio sono Stati Uniti (571 Mtep; 13%), Arabia Saudita (561 Mtep; 12,8%) e Russia (554 Mtep; 12,6%). L'Italia produce 4,1 Mtep (0,1%) e consuma 60,6 Mtep. I primi tre consumatori di petrolio sono Stati Uniti (913 Mtep; 19,8%), Cina (608 Mtep; 13,2%) e India (221 Mtep; 4,8%). Gli Stati Uniti, pur essendo il primo Paese produttore di petrolio, per coprire il proprio fabbisogno importano una fetta consistente del resto della produzione mondiale.

Per quanto riguarda il gas naturale, il cui componente principale è il metano, i primi tre Paesi produttori (miliardi di metri cubi, Gm^3) sono: Stati Uniti ($767 Gm^3$; 20%), Russia ($636 Gm^3$; 17%) e Iran ($224 Gm^3$; 6%). L'Italia produce $5,3 Gm^3$ (0,1%) e consuma $72,1 Gm^3$. I primi tre consumatori di gas sono Stati Uniti ($739 Gm^3$; 19,8%), Russia ($424 Gm^3$; 11,6%) e Cina ($240 Gm^3$; 6,6%). Il gas naturale spesso è associato al petrolio e a volte viene bruciato all'uscita dei pozzi (Fig. 3).



Fig. 3 - Il gas che esce dai pozzi di petrolio, dalle raffinerie e dagli impianti chimici è spesso considerato un rifiuto che viene bruciato senza produzione di energia (gas flaring)

Per il carbone, i primi tre Paesi produttori sono Cina (1.747 Mtep; 46%), Stati Uniti (371 Mtep, 9,9%) e India (294 Mtep; 7,8%). I primi tre consumatori sono Cina (1.892 Mtep; 50,7%), India (424 Mtep; 11,4%), Cina e Stati Uniti (332 Mtep; 8,9%).

Gli Stati Uniti (325 milioni di abitanti) sono sempre fra i primi nelle classifiche, sia come produttori che come consumatori di combustibili fossili; la Cina (1.400 milioni di abitanti) consuma molto più petrolio e gas di quello che produce e consuma tutto il carbone che produce; l'India (1.350 milioni di abitanti) consuma molto petrolio che non ha e più carbone di quello che produce. L'Arabia Saudita, come tutti sanno, esporta petrolio e la Russia sia petrolio che gas. Un'analisi più dettagliata mostra che il Giappone non compare mai fra i primi dieci

produttori e sempre fra i primi dieci consumatori e che i Paesi occidentali, tranne Canada e Norvegia, consumano molto più di quello che producono [24].

Con riferimento all'effetto serra, ricordiamo che, a parità di energia prodotta, la benzina (derivato del petrolio) genera il 42% in meno di CO₂ rispetto al carbone; il metano, costituente principale del gas naturale, genera il 66% in meno di CO₂ rispetto al carbone e il 24% in meno rispetto alla benzina.

I prezzi di carbone, petrolio e gas sono collegati poiché per alcune applicazioni, ad esempio la produzione di energia elettrica, il loro uso è intercambiabile. Il combustibile più pregiato è il petrolio, il cui prezzo è molto influenzato da fattori politici (crisi in Venezuela, problemi in Libia e Iran) e il cui costo di produzione varia moltissimo nei vari Paesi per una complessa combinazione di fattori geografici e geologici. La produzione a basso costo (inferiore a circa 40 dollari al barile) è tutta concentrata nei Paesi del Medio Oriente. Il petrolio russo è molto più costoso, così come quello statunitense e ancor più quello canadese ottenuto dalle sabbie bituminose.

Un caso particolare è quello di petrolio e gas intrappolati in rocce argillose (scisti) estratti negli USA con il metodo *fracking* [7], proibito in altre Nazioni, fra le quali la Francia. Si tratta di una tecnica di trivellazione orizzontale che richiede l'uso di cariche esplosive seguite dalla iniezione di miscele di acqua, sabbia e composti chimici. L'acqua che risale in superficie è classificata come "rifiuto speciale"; per liberarsene, viene iniettata altrove causando a volte problemi sismici. Il *fracking* è una tecnica con forte impatto ambientale, applicabile solo in zone di bassa densità abitativa (più di un milione di pozzi già trivellati negli USA!). La produzione di questo petrolio è aumentata moltissimo negli ultimi anni [24], tanto che gli Stati Uniti sono oggi il Paese che ha la più alta produzione di petrolio e di gas. Non tutti sanno, però, che l'aumento è stato ottenuto costruendo una montagna di debiti. I bacini di petrolio e gas di scisto, infatti, si esauriscono rapidamente (fino al 60% in un anno) per cui bisogna procedere continuamente con altre trivellazioni che richiedono nuovi investimenti. Poiché il rapporto fra energia ottenuta e energia impiegata per produrla (EROI)¹ è molto basso, nessuna delle 33 imprese impegnate nelle perforazioni ha avuto un bilancio in attivo dal 2012 al 2017. In un commento sulla insostenibilità economica di questa attività un esperto è giunto a dire: "L'industria del petrolio di scisto negli Stati Uniti è una truffa, un esempio di industria che per rimanere in vita cannibalizza se stessa e gli investitori" [25].

Il gas naturale americano viene esportato allo stato liquido (LNG, *Liquified Natural Gas*) mediante navi metaniere e deve essere riconvertito in gas nei porti di arrivo. Il presidente Trump confida che l'Europa costruirà molti impianti di rigassificazione per importare gas americano, ma non sembra una cosa probabile perché l'Europa sta utilizzando solo il 25% del gas che già potrebbe importare, tramite metanodotti e a prezzi più bassi, da Russia e Norvegia.

5.2 Le riserve

Le riserve [24] di petrolio accertate ammontano a 239 miliardi di tonnellate, il 48% è nel Medio Oriente. Al ritmo attuale saranno sufficienti per 50 anni. Le riserve di gas sono 193 mila miliardi di metri cubi, sufficienti per 52 anni ed equivalenti a circa 165 miliardi di tonnellate di petrolio. Le riserve di carbone ammontano a più di 1 milione di milioni di tonnellate, sufficienti per 134 anni. C'è quindi grande abbondanza di combustibili fossili e se ne stanno cercando ancora. Ma è stato calcolato che per avere almeno il 50% di probabilità che l'aumento della temperatura del pianeta nel 2100 non superi i 2° C, limite superiore stabilito dall'Accordo di Parigi, le emissioni totali di CO₂ dal 2011 al 2050 non devono superare 1.100 Gt (vedi anche Sezione 7.2, Parte Seconda). Questo equivale a dire che devono rimanere sotto terra, inutilizzate

¹Energy Return Over Investment (EROI) è il rapporto fra l'energia ottenuta e quella usata [42].

(*stranded*), il 30% delle riserve di petrolio, metà di quelle di gas e l'80% di quelle di carbone [26, 27].

Ogni compagnia petrolifera ha sue riserve, misurate in anni rispetto alla sua produzione corrente. Per le dieci più importanti compagnie, queste riserve vanno da 21 anni per la russa Rosneft, a 9 anni per Shell. Le compagnie dovrebbero essere consapevoli che, in base ai dati sopra riportati e gli impegni presi a Parigi da tutti i governi, non ha senso continuare a cercare combustibili fossili.

5.3 Le scelte

Le industrie dei combustibili fossili, in realtà, si trovano in una situazione difficile: da un lato, non possono non riconoscere che la transizione dai combustibili fossili alle energie rinnovabili è ineluttabile; dall'altro, ritengono, o almeno sperano, che le fonti fossili saranno utilizzate ancora per decenni. Si trovano, quindi, davanti ad un bivio. Se vogliono mantenere posizioni di leadership nel settore energetico, devono sviluppare attività nel campo delle energie rinnovabili con una corrispondente diminuzione degli investimenti nei combustibili fossili. Alcune compagnie europee stanno mettendo in atto questa strategia. La norvegese Statoil, ad esempio, ha eliminato dal nome l'ingombrante "oil" che la caratterizzava; con il nuovo nome, Equinor, ha iniziato a sviluppare piattaforme per impianti eolici [28], senza però rinunciare a estrarre quantità crescenti di gas naturale. La spagnola Repsol ha annunciato il 15 maggio 2018 che cesserà di cercare petrolio e gas e si impegnerà totalmente per la lotta al cambiamento climatico [29]. Anche Dong (Danish Oil and Natural Gas) ha cambiato nome: Orsted, e si occuperà principalmente di energia eolica [30].

Le compagnie petrolifere più importanti, però, sono molto riluttanti ad abbandonare i combustibili fossili. Iniziare attività nel campo delle energie rinnovabili comporta un grande salto culturale, complicato da compiere in un ambiente che ha sempre avuto gli occhi rivolti al passato. Inoltre è difficile, anche psicologicamente, che imprese economiche molto floride (almeno in apparenza) accettino di investire nello sviluppo di innovazioni dalle quali, poi, saranno distrutte.

Le compagnie petrolifere maggiori non solo sperano che l'accordo di Parigi non venga rispettato, ma operano in questo senso. Confidano in un elevato uso di combustibili fossili anche nei prossimi decenni, pur nella consapevolezza dei rischi climatici e con timide aperture alle rinnovabili [31].

Per non inimicarsi l'opinione pubblica queste compagnie devono però far vedere che combattono i cambiamenti climatici e per dimostrarlo pubblicizzano con grande enfasi il loro scarso impegno nelle le energie rinnovabili, che spesso si riduce a operazioni di facciata (*greenwashing*). Shell, ad esempio, ha annunciato la sua intenzione di investire 2 dei 30 miliardi di dollari del suo bilancio in una nuova divisione energetica e sta promettendo ai suoi clienti energia più "pulita" [32]; si interessa anche a stazioni di rifornimento per auto elettriche, in competizione con BP che, a sua volta, ha promesso di investire nelle rinnovabili 0,5 dei 15 miliardi di dollari del suo bilancio. Il capo dell'esecutivo di Shell in un'intervista al *Financial Times* del 5 luglio 2018 ha definito superfluo stabilire obiettivi riguardo la diminuzione delle emissioni di CO₂ e ha aggiunto che la società deve semplicemente fidarsi di lui. Dietro l'arroganza dei loro dirigenti, nelle grandi compagnie c'è in realtà la consapevolezza dei rischi che stanno correndo le loro attività (si veda, ad es. [33]): l'insorgere di conflitti militari o economici, la concorrenza delle energie rinnovabili, i problemi legali che possono sorgere nei Paesi nei quali operano, il possibile intensificarsi di eventi meteorologici estremi che potrebbero danneggiare gli impianti e, soprattutto, la possibilità di trovarsi con riserve inutilizzabili (*stranded assets*). Per ora la maggior parte dei disinvestimenti dalle compagnie dei combustibili fossili avviene per ragioni etiche e non economiche, ma gli investitori mostrano

segni di nervosismo e, come la storia insegna, la caduta di fiducia degli investitori spesso è improvvisa (Sezione 8.4, Parte Seconda).

5.4 Il gas naturale

Non avendo interesse nel carbone, le compagnie petrolifere sono tutte d'accordo riguardo la progressiva sostituzione delle centrali termoelettriche a carbone con centrali a gas (che è principalmente metano), vedendo in questa trasformazione non solo un modo di ridurre le preoccupazioni dell'opinione pubblica, ma anche un interesse economico. Le compagnie petrolifere hanno inoltre capito che l'uso del gasolio per i trasporti non sarà difendibile a lungo dopo il *diesel gate* e i problemi causati dall'inquinamento atmosferico; quindi, spingono per l'uso del gas anche in questo settore. Ufficialmente sostengono che è necessario usare il gas come energia ponte verso le rinnovabili, ma in realtà, come è emerso alla World Gas Conference (Washington, 29 giugno 2018), pensano al gas come il combustibile del futuro.

Per quanto riguarda il clima, è vero che a parità di energia prodotta la quantità di CO₂ generata dal metano è inferiore di circa il 66% rispetto al carbone, ma anche sostituendo tutte le centrali elettriche a carbone con centrali a gas non si otterrebbe la diminuzione di emissioni di CO₂ che è necessario realizzare se si vuole raggiungere l'obiettivo di Parigi, cioè limitare l'aumento di temperatura a meno di 2 °C [34]. Ma c'è un altro, più grave problema. Il metano è un gas serra 72 volte più potente di CO₂ quando l'effetto è misurato su 20 anni (25 volte più potente quando misurato su 100 anni). Poiché nella lunga filiera del metano si stima ci siano perdite di almeno il 3% rispetto alla quantità di gas usato, è chiaro che passando al metano non si combatte affatto il cambiamento climatico [35]. La necessità di monitorare le fughe di metano è un problema finora trascurato, ma importante e urgente perché questo gas ha raggiunto nell'atmosfera una concentrazione di quasi 2 parti per milione.

Per la stessa ragione, la sostituzione del gasolio con il metano nel settore dei trasporti, che è una delle ultime carte in mano alle compagnie dei combustibili fossili, non è affatto vantaggiosa per il cambiamento climatico. Non lo è neppure per la salute dell'uomo: il particolato prodotto dalla combustione del metano è, come massa, inferiore a quello prodotto dal gasolio, ma i motori alimentati con metano producono particelle in numero superiore e più piccole, quindi, potenzialmente più pericolose per la salute [36].

5.5 Eni e Enel

Nel periodo 2008-2015 le compagnie petrolifere europee hanno scoperto in media riserve pari a 0,3 volte la propria produzione; Eni ne ha scoperte pari a 2,4 volte e ha in progetto di scoprire altri 2 miliardi di barili di combustibili fossili perforando 115 pozzi in 25 Paesi, compreso il mare Mediterraneo, l'Adriatico e la zona dell'Artico [37]. Molto recentemente ha ottenuto dalle autorità egiziane una nuova concessione di 739 km² alla foce del Nilo. Poiché Eni è un'azienda sotto il controllo dello Stato, questa politica espansiva è in evidente contraddizione con l'Accordo di Parigi firmato dal nostro Governo. Si tratta anche di una politica rischiosa dal punto di vista economico, perché se l'Accordo di Parigi sarà osservato Eni si ritroverà con riserve inutilizzabili (*stranded assets*) e quindi con perdite economiche che si riverteranno sui contribuenti. Nel campo dei trasporti, oltre che sul metano Eni fa molto affidamento sui biocombustibili, in netta contraddizione con la realtà dei fatti. In effetti, quello che gli esperti prevedono non è una sostituzione significativa dei combustibili fossili con biocombustibili, ma una rapida, dirompente diffusione delle auto elettriche come sarà discusso nella Sezione 8.2.4, Parte Seconda. Anche Eni sa che è conveniente mostrare, perlomeno, interesse alle energie alternative. Ha annunciato quindi che installerà 1 GW di energie alternative entro il 2021, di cui 220 MW di fotovoltaico su aree industriali dismesse, e ha investito 50 milioni di euro in *Commonwealth Fusion System*, un'azienda privata americana impegnata nello sviluppo della fusione nucleare. Mentre numerosi esperti giudicano

inaffidabile questo progetto, l'AD di Eni è molto ottimista: "Eni compie un notevole passo avanti verso lo sviluppo di fonti energetiche con un sempre minor impatto ambientale. La fusione è la vera fonte energetica del futuro, un traguardo che noi di Eni siamo sempre più determinati a raggiungere in tempi brevi" [37]. Come vedremo nella Sezione 7.2, Parte Seconda, nessuno degli scenari prevede che la fusione nucleare possa contribuire a risolvere il problema del cambiamento climatico. Sarebbe bene che Eni abbandonasse gradualmente la sua attività nei fossili e usasse i soldi dei contribuenti per sviluppare le vere energie rinnovabili, quelle del Sole, del vento e dell'acqua. Meglio ancora se, come recentemente suggerito [38], lo Stato vendesse la sua quota di Eni (oltre 16 miliardi) per creare una società completamente pubblica che investa in rinnovabili, tecnologie "verdi" e risparmio energetico.

Da quando ha abbandonato l'avventura nucleare in cui voleva trascinare il Paese, Enel ha scelto di guardare al futuro: energie rinnovabili, mobilità elettrica, efficienza e digitalizzazione [39]. Enel Green Power è oggi la principale azienda a livello mondiale per le energie rinnovabili. Entro il 2020 Enel conta di ridurre la capacità dei suoi impianti termici da 46,6 GW a 39,6 GW e per il 2025 dovrebbe centrare l'obiettivo dell'uscita dal carbone. Nel contempo, entro il 2020 aumenterà la capacità installata di rinnovabili dagli attuali 48 GW a 55,8 GW. Per proseguire sulla strada della decarbonizzazione, il piano strategico Enel 2018-2020 prevede 8,3 miliardi di euro di investimenti per la crescita delle rinnovabili, un terzo dei 25 miliardi complessivi. Enel è anche all'avanguardia nelle reti di distribuzione digitalizzate e collabora a progetti estremamente innovativi come il *vehicle-to-grid* (V2G), che consente di impiegare le auto elettriche - quando non utilizzate - per bilanciare la rete elettrica. Come dice un proverbio cinese, quando soffia il vento dell'innovazione alcuni erigono muri, altri lo sfruttano.

6. Le energie rinnovabili

6.1 Antiche, recenti, future

Alcune energie rinnovabili, come l'energia ottenuta bruciando le biomasse, l'energia idroelettrica, l'energia geotermica e l'energia eolica [5, 7], sono conosciute e più o meno usate da molto tempo. Altre, come l'energia fotovoltaica, sono conquiste recenti della tecnologia e stanno facendo forti progressi anno dopo anno. Altre ancora, come l'energia delle correnti marine o delle onde del mare, sono da poco tempo oggetto di studi e ricerche.

La transizione energetica, se vogliamo salvare il pianeta, dovrà essere completata in qualche decina di anni. Quindi bisogna puntare soprattutto su energie rinnovabili collaudate, in fase di rapido sviluppo, con basso impatto ambientale, basate su strutture riciclabili, poco costose e di uso più generale. Per indicarle, nella letteratura scientifica si usa comunemente l'acronimo WWS: *water, wind, sun* [40].

Le energie rinnovabili hanno oggi una potenza pari a 2.195 GW e forniscono circa il 10% dell'energia primaria [24] e il 26,5% dell'energia elettrica [41]. Per raggiungere l'obiettivo dell'accordo di Parigi (<2 °C di innalzamento della temperatura nel 2050) dovranno svilupparsi fino a generare il 100% dell'energia elettrica entro il 2035-2040 e il 100% dell'energia primaria entro il 2050 (Sezione 7.2, Parte Seconda)

6.2 Energia dall'acqua

L'energia idroelettrica oggi è la più sviluppata delle energie rinnovabili: fornisce il 6,7% dell'energia primaria e il 16,4% dell'energia elettrica. La potenza accumulata ammonta a 1.114 GW, in aumento dell'1,8% rispetto al 2016 [41].

Nel 2017 il *Levelised Cost of Electricity* (LCOE)² per nuovi impianti idroelettrici era di circa 50 dollari per MWh [42]. I classici impianti idroelettrici utilizzano salti di grandi quantità d'acqua

²*Levelised Cost of Electricity* (LCOE) è il costo della elettricità generata, comprendente tutte le voci di spesa, dall'ammortizzazione del capitale finanziario iniziale a tutti i costi operativi [42].

trattenuta a un livello alto da dighe; recentemente, tuttavia, vengono realizzati anche piccoli impianti che sfruttano la corrente dei fiumi (mini idroelettrico), eliminando la necessità di costruire grandi opere. A livello mondiale ci sono almeno 800.000 dighe, 45.000 delle quali sono alte più di 15 metri. La diga più alta, 335 m, si trova sul fiume Vakhsh in Tajikistan, mentre l'impianto di maggiore potenza è quello della Diga delle Tre Gole (*Three Gorges Dam*) in Cina dove una diga alta 185 metri trattiene l'acqua in un bacino di 108.400 ettari; ha una potenza di 22,5 GW e un potenziale di produzione annuo di 104 TWh [7]. Le Nazioni con maggiore capacità idroelettrica sono Cina, Brasile, Stati Uniti e Canada. Brasile e Canada coprono con l'idroelettrico rispettivamente l'80% e il 61% dei consumi elettrici. In Italia la potenza idroelettrica installata è pari a 22 GW, circa il 20% della produzione elettrica nazionale complessiva.

Le centrali idroelettriche generano elettricità a basso costo e in modo molto flessibile: si stima che producano una quantità di energia fino a 200 volte superiore a quella necessaria per costruirle (EROI circa 200) [41]. Un grande vantaggio dell'idroelettrico sta nel fatto che gli impianti, se opportunamente progettati, possono essere utilizzati anche come centrali di pompaggio: nelle ore di bassa richiesta di energia l'acqua viene pompata da un serbatoio che si trova in basso a uno collocato in alto, che viene quindi riempito in modo da essere pronto per un nuovo impiego. Impianti di questi tipo consentono di equilibrare domanda e offerta delle energie rinnovabili intermittenti (eolico e fotovoltaico). I bacini idroelettrici possono essere utili anche per l'irrigazione e per il controllo delle inondazioni, ma presentano due notevoli controindicazioni: occupano enormi estensioni di territorio e possono avere conseguenze negative dal punto di vista ecologico.

Gli impianti con grandi dighe continueranno a svilupparsi nei Paesi in cui sono presenti condizioni orografiche favorevoli non ancora sfruttate (Asia, America del Sud, Africa). Si prevede anche una diffusione sempre più ampia di impianti di piccole dimensioni, meno invasivi per l'ambiente, così che nel giro di uno o due decenni la potenza idroelettrica totale installata potrebbe raddoppiare.

6.3 Energia dal vento

Gli impianti eolici possono essere installati sulla terra (*onshore*) oppure, con costi più alti, in mare (*offshore*). La potenza eolica installata a fine 2017 ha raggiunto i 539 GW, con un aumento del 9,6% rispetto all'anno precedente (Fig. 4) [41].

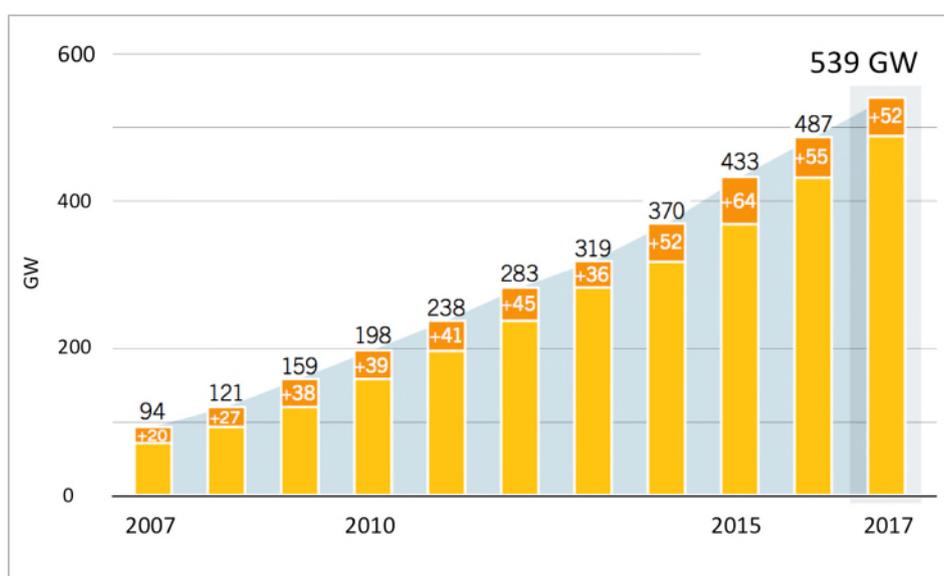


Fig. 4 - Lo sviluppo della energia eolica, 2007-2017
(per la figura originale, si veda [41])

Anche per l'eolico, come per tutte le energie intermittenti, la capacità effettiva (*capacity factor*)³ [42] è minore della capacità installata (o nominale). Per le turbine più recenti la capacità annuale effettiva è superiore al 40%. A livello globale per la capacità effettiva si può assumere un valore medio di circa il 35%. I 539 GW dell'eolico 2017 hanno quindi generato una quantità di energia paragonabile a circa 180 reattori nucleari da 1.000 MW. *LCOE* per impianti *onshore* nel 2017 è stato in media 60 dollari per MWh, mentre per quelli *offshore* è sceso a 100 dollari per MWh e quindi anche questi impianti sono competitivi con le centrali termoelettriche [42].

L'energia eolica oggi è utilizzata in più di 90 Paesi, in 30 dei quali la capacità installata supera 1 GW. Nel 2017 la Cina con 19,7 GW installati era al primo posto come capacità aggiunta, anche se c'è stato un rallentamento rispetto all'anno precedente per inadeguatezza della rete. Seguono Stati Uniti (7 GW), Germania (6,1 GW) e India (4,1 GW) [43]. L'Italia si colloca al decimo posto, con un aumento di 0,3 GW. Alla fine del 2017, l'Europa con 153 GW *onshore* e 15,8 GW *offshore* ha coperto con l'eolico il 12% del fabbisogno elettrico; la Danimarca il 43%, la Germania quasi il 19% e l'Italia circa il 10%. Continuano ad espandersi anche le turbine a piccola scala (<100 kW) usate per varie applicazioni come pompaggio di acqua, desalinizzazione, telecomunicazioni e sostituzione di motori diesel in località isolate. Alla fine del 2016 gli impianti di questo tipo erano circa un milione.

Nei primi anni Ottanta una pala eolica tipica aveva altezza del mozzo di 20 metri, turbine di 15 metri di diametro, potenza elettrica di 50 kW e fattore capacità di circa 20%. Nel 2016 il diametro delle pale per gli impianti *offshore* è salito a 200 metri, la potenza a 8,8 MW e la capacità ha superato il 40% [42]. Una sola rotazione dell'elica fornisce l'energia necessaria ad una abitazione per un giorno. Per i più recenti sviluppi, si veda la Sezione 8.2.2, Parte Seconda. Nell'ultimo ventennio, a fronte di un aumento di oltre 100 volte della potenza delle turbine, si è avuto un calo del 90% dei costi di produzione elettrica. Ogni volta che la capacità globale installata raddoppia, i costi di investimento diminuiscono del 9% e il costo dell'elettricità prodotta diminuisce del 15%, cosicché il prezzo dell'energia eolica è oggi competitivo con quello degli impianti termoelettrici, anche senza conteggiare i benefici economici legati ai danni evitati alla salute pubblica e all'ambiente. In molti Paesi l'eolico, sia *onshore* che *offshore*, si sviluppa anche senza incentivi. Molto estesa è la pratica del *repowering*, cioè la sostituzione nei campi eolici di turbine piccole e poco efficienti con un minor numero di turbine più grandi, più alte, meno rumorose e più efficienti perché controllate da software migliori. Un notevole progresso nell'*offshore* è lo sviluppo di impianti flottanti, non più condizionati dalla profondità del mare e potenzialmente interessanti anche per la conversione di piattaforme petrolifere. Gli impianti eolici restituiscono in pochi mesi l'energia investita per costruirla ($EROI > 20$) [42], primeggiando fra tutte le tecnologie elettriche anche in termini di ritorno economico. Gli impianti eolici comportano un uso ridotto del territorio perché l'agricoltura continua normalmente nei terreni su cui vengono installati. Le turbine eoliche non hanno bisogno di acqua per il raffreddamento, quindi non scaricano inquinamento termico nell'ambiente. Una fattoria eolica richiede una manutenzione minima e in fase di dismissione i materiali utilizzati possono essere riciclati quasi integralmente. Oltre all'intermittenza, fra i difetti dell'eolico vengono spesso citati l'impatto sul paesaggio (che molte volte viene abbellito!) e la rumorosità degli impianti, problema risolto perché le turbine eoliche più recenti sono addirittura meno rumorose dello stesso sibillare del vento.

³*Capacity factor*: per *capacity factor* (capacità effettiva) di un impianto che genera energia si intende il rapporto fra l'energia generata in un certo periodo di tempo e l'energia che avrebbe generato se avesse potuto operare con continuità nello stesso periodo di tempo con la sua capacità massima [42].

6.4 Energia dal Sole

6.4.1 Solare termico

La conversione dell'energia solare in calore a bassa temperatura si può ottenere mediante collettori solari, detti anche pannelli solari termici. Si tratta di una tecnologia semplice, affidabile e poco costosa [7, 42]. In alcune Nazioni le nuove abitazioni indipendenti hanno per legge l'obbligo di installazione dei collettori solari. Il solare termico è una tecnologia che non consuma suolo, non presenta pericoli di alcun tipo e non crea danni ambientali. I materiali utilizzati sono tutti riciclabili.

I collettori sono di vario tipo e si possono mettere sui tetti o sulle facciate degli edifici. I più semplici contengono tubi di rame dove un liquido riscaldato dalla luce solare è utilizzato per scambiare calore con una riserva d'acqua. Un collettore di circa 3 m² è sufficiente, alle nostre latitudini, per fornire da aprile ad ottobre acqua calda a uso domestico per una famiglia media. Un collettore solare ha una durata di almeno 30 anni, richiede soltanto piccole manutenzioni e in due anni produce una quantità di energia pari a quella che è stata necessaria per fabbricarlo. Si vanno rapidamente diffondendo anche collettori sotto vuoto di varie dimensioni e collettori a concentrazione, sia per usi industriali che per ottenere aria condizionata e raffreddamento.

La capacità termica nel 2017 (dato preliminare) era di 472 GW_{th}, con un aumento del 3,3% rispetto all'anno precedente [41]. I primi quattro Paesi riguardo l'aumento di capacità nel 2017 sono stati la Cina (26,1 GW_{th}; 37,26 milioni di m² di collettori), dove il governo cerca di eliminare i boiler a carbone, la Turchia, l'India e il Brasile. La Cina è anche di gran lunga il Paese che ha la maggior capacità globale installata (71,2%); gli 11 Paesi che la seguono in classifica totalizzano collettivamente 18,4%. Oltre agli impianti per singole abitazioni, si vanno estendendo anche grandi impianti di teleriscaldamento per luoghi pubblici, condomini e interi quartieri (*district heating technologies*) [41]. Il solare termico si va affermando come la tecnologia più conveniente dal punto di vista economico per decarbonizzare il settore del riscaldamento, particolarmente nelle città europee. Alla fine del 2017 erano in funzione 296 impianti di larga scala, ciascuno con capacità maggiore di 350 kW_{th} e collettori estesi per 500 m². In questo settore la Danimarca è all'avanguardia con 935 MW_{th} installati (il 76% del totale globale).

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

6.4.2 Solare a concentrazione

La conversione dell'energia solare in energia elettrica si può ottenere anche sfruttando l'energia meccanica del vapore generato da un liquido portato a temperature di centinaia di gradi, come accade nelle centrali termoelettriche tradizionali. Per ottenere le alte temperature necessarie si focalizzano i raggi solari mediante un campo di specchi o con collettori parabolici lineari che concentrano la luce su un tubo dove circola un fluido che assorbe il calore [7]. Il fluido è costituito da sostanze (per esempio sali fusi) che possono rimanere ad alta temperatura per molte ore, tanto da essere utilizzabili anche di notte. Si stima che nel 2017 gli impianti di accumulo di energia termica basati su sali fusi abbiano accumulato 13 GWh [41]. Il solare a concentrazione è una tecnologia particolarmente adatta a luoghi con alta insolazione; non presenta pericoli, non crea danni ambientali e i materiali usati sono tutti riciclabili. Nel 2017 LCOE del solare termico era valutato fra 200 e 300 dollari per MWh, ma è previsto in forte diminuzione [41, 42].

Il solare a concentrazione nel 2017 ha fornito 4,9 GW, con un aumento del 2% rispetto all'anno precedente. La Nazione leader è la Spagna con 2,3 GW (che nel 2017 hanno generato 5,35 TWh), seguita dagli Stati Uniti con 1,7 GW. Grandi impianti sono in costruzione in Marocco e in Nazioni del Medio Oriente [41].

6.4.3 Fotovoltaico

Il fotovoltaico è sempre più usato nei Paesi sviluppati per fornire elettricità ad abitazioni e industrie e si va diffondendo nei Paesi in via di sviluppo, rendendo possibile un grande salto di civiltà per 1,5 miliardi di persone che non hanno accesso all'elettricità (Fig. 5). Il suo grande vantaggio è quello di poter generare energia elettrica in qualsiasi luogo illuminato dal sole.

Nei diffusissimi pannelli a silicio, il fotovoltaico converte l'energia solare in energia elettrica con un'efficienza del 15-20%. Grazie alla sua alta efficienza, il fotovoltaico non richiede molto spazio e può essere installato su superfici non altrimenti utilizzate: capannoni industriali, tetti dei centri commerciali e delle abitazioni, parcheggi, pareti antirumore delle autostrade, terreni aridi e anche bacini e laghi. Il *capacity factor* del fotovoltaico dipende ovviamente dall'insolazione del luogo e dall'orientazione dei pannelli [42]. Va anche detto però che nessun sistema di produzione elettrica (includendo le centrali nucleari o a combustibili fossili) funziona al 100% del tempo disponibile a causa delle interruzioni per manutenzione, rotture e altri fattori.

Fig. 5 - Il fotovoltaico rende possibile l'accesso all'elettricità anche nei luoghi più isolati

La Fig. 6 mostra l'aumento della capacità totale fotovoltaica negli ultimi 10 anni [41]. Nel 2017 ha raggiunto 402 GW, con un aumento del 24% rispetto al 2016. L'energia generata dal fotovoltaico nel 2017 è paragonabile a quella ottenibile da 80 centrali nucleari da 1.000 MW. L'85% del fotovoltaico installato nel mondo usa pannelli in cui il materiale fotoattivo è una sottilissima lamina di silicio. Si tratta di una tecnologia ben collaudata: i pannelli hanno un'efficienza di circa il 15-20%, una durata di almeno 25-30 anni con una piccola riduzione di efficienza (<1% all'anno) e a fine vita sono riciclabili al 95%. In 1-3 anni generano l'energia spesa per produrli (EROI da 10 a 30) [44, 45].



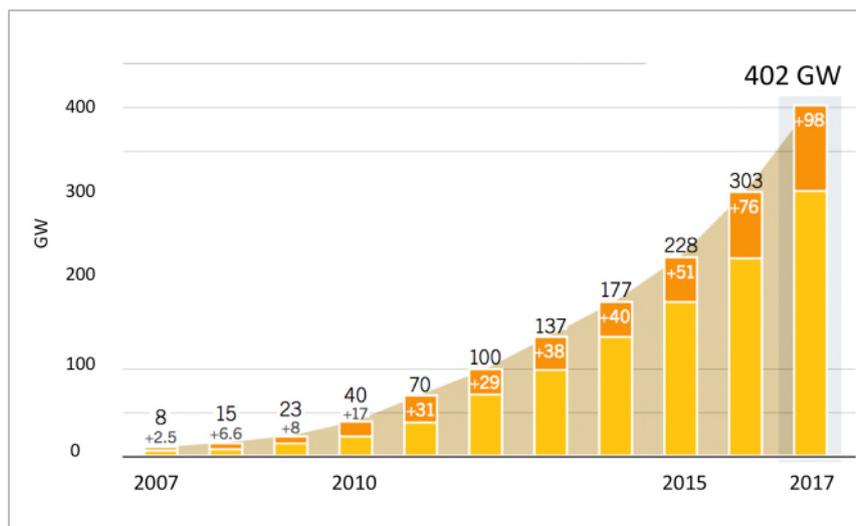


Fig. 6 - Lo sviluppo del fotovoltaico (per la figura originale, si veda [41])

Il fotovoltaico è la tecnologia più efficiente per convertire la potenza solare in energia di uso finale. Basti pensare che la fotosintesi naturale, che converte l'energia solare in energia chimica, ha normalmente un'efficienza dello 0,1-0,2%, cioè 100-200 volte inferiore a quella del fotovoltaico [5]. Nel settore del fotovoltaico c'è un'intensa attività di ricerca e sviluppo. In laboratorio, con materiali e tecniche speciali (celle *tandem*), si sono già ottenute efficienze superiori al 46% [45]. In futuro le celle fotovoltaiche saranno sempre più sottili. Sfruttando nuovi materiali e tecnologie simili a quelle oggi usate per la stampa sarà possibile realizzare su scala industriale pannelli flessibili da installare sulle pareti degli edifici e anche sulle automobili. Ulteriori ricerche potrebbero portare a celle solari incorporate in vernici.

Il prezzo dei moduli fotovoltaici continua a diminuire secondo una *learning rate*⁴ del 28% [42], come è sempre accaduto negli ultimi 40 anni (79 \$/W nel 1976, 0,37 \$/W nel 2017). Diminuiscono anche i prezzi degli altri componenti (es., inverter) e il costo degli impianti completi si dimezzerà ancora entro 17 anni. Nelle Nazioni sviluppate l'energia elettrica fotovoltaica è divenuta meno costosa dell'energia elettrica nucleare e in India lo sviluppo del fotovoltaico ha messo fuori mercato le centrali a carbone. LCOE per il fotovoltaico in molti Paesi è meno di 20 dollari per MWh e quindi è competitivo con gli impianti termoelettrici anche senza considerare le esternalità, ossia i danni risparmiati alla collettività in termini di salute e ambiente [42]. In alcuni Paesi africani e sudamericani nelle gare d'appalto per le nuove centrali elettriche il fotovoltaico è stato offerto a un prezzo che è la metà di quello offerto per le centrali termoelettriche a carbone.

La Cina è la nazione leader nella produzione di moduli fotovoltaici e anche nella loro installazione. Produce il 59% delle celle solari e nel 2017 ha installato 53,1 GW, più di quanto fu fatto nel 2015 da tutte le altre Nazioni prese assieme [41]. Grazie allo sviluppo del fotovoltaico e dell'eolico la Cina ha raggiunto con tre anni di anticipo l'obiettivo di riduzione di emissioni che il Governo si era posto per il 2020. Allo sviluppo del fotovoltaico in Cina e India (che ha installato 9 GW nel 2017) fa da contrappeso il rallentamento della crescita in USA a causa di incertezze politiche.

L'Italia gode di un'ottima insolazione, particolarmente nelle regioni del Sud. Nel nostro Paese il fotovoltaico ha conosciuto un rapido sviluppo dal 2010 al 2013, anche grazie a incentivi economici statali [7]. Negli anni seguenti il suo sviluppo è stato ostacolato da pastoie

⁴*Learning rate*: misura lo sviluppo di una tecnologia; è la diminuzione del prezzo per ogni raddoppio della produzione

burocratiche, ma ha raggiunto ugualmente senza incentivi la *grid parity*, cioè la competitività economica con i combustibili fossili.

Il fotovoltaico è oggi considerato una «tecnologia dirompente» [46] perché sta cambiando radicalmente il modo di produrre e distribuire elettricità e trascina con sé lo sviluppo di accumulatori e di auto elettriche (Sezione 8.2.2, Parte Seconda).

6.5 Altre energie rinnovabili

6.5.1 Energia geotermica

Il calore emesso all'interno del pianeta raggiunge la superficie terrestre con una potenza media di circa $0,06 \text{ W/m}^2$. In alcune zone della Terra la temperatura del sottosuolo è già piuttosto alta a profondità relativamente modeste, come in Italia a Larderello, dove la temperatura raggiunge i 300 °C a 300 m di profondità [7]. La presenza di rocce calde a basse profondità è una condizione necessaria, ma non sufficiente per ottenere energia sfruttabile dal sottosuolo. È essenziale, infatti, che queste «bolle» di calore entrino in contatto con acqua piovana, penetrata in profondità attraverso una conformazione favorevole della crosta terrestre, fatta di fratture e rocce permeabili. In questo modo si creano le condizioni per generare acqua calda e vapore. Quando questi rimangono imprigionati nel sottosuolo, per estrarli e sfruttarli è necessario perforare pozzi. Oltre che per produrre elettricità, il calore geotermico è impiegato anche per il riscaldamento diretto nel settore residenziale, sfruttando sorgenti con temperature relativamente basse ($30\text{-}150 \text{ °C}$). L'acido solfidrico generato dalla decomposizione di rifiuti organici nel sottosuolo è la causa dello sgradevole «odore di uova marce» che a volte accompagna i fenomeni geotermici.

I Paesi dove la geotermia è più sviluppata sono USA, Filippine, Indonesia, Messico, Nuova Zelanda e Italia. A livello mondiale nel 2017 era installata una potenza geotermica complessiva di circa $12,8 \text{ GW}$, con un aumento del 5% rispetto al 2016. Fornisce circa lo 0,3% del fabbisogno elettrico mondiale a costi competitivi. *LCOE* è di circa 70 dollari per MWh [41].

Globalmente gli usi diretti del calore endogeno della Terra oggi forniscono anche una capacità di circa $21 \text{ GW}_{\text{th}}$. Negli ultimi anni è in forte crescita l'uso delle *pompe di calore* geotermiche, dispositivi che scambiano calore con il terreno o la falda acquifera utilizzando energia elettrica. Le prospettive di ricerca e sviluppo oggi vanno verso il cosiddetto EGT (*enhanced geothermal*), cioè l'estrazione di calore dal sottosuolo fino a 10.000 metri di profondità tramite iniezioni di acqua (oggi si arriva al massimo a 5.000 metri) [7]. EGT aprirebbe grandi possibilità di impiego dell'energia geotermica in tutto il mondo, non soltanto in quelle limitatissime zone in cui la natura la rende facile da sfruttare.

6.5.2 Biocombustibili

La biomassa sotto forma di legna da ardere fornisce ancora oggi gran parte della energia termica per usi domestici nelle Nazioni meno sviluppate, causando gravi problemi sanitari. La biomassa copre il 12,8% del consumo totale di energia finale [41].

Dalle biomasse di varia natura (prodotti di origine agricola o forestale, rifiuti urbani o zootecnici) si possono ottenere sostanze in grado di sostituire i combustibili derivati dalle fonti fossili.

Il biogas si ottiene per fermentazione anaerobica di residui organici di varia origine (liquami zootecnici, fanghi di depurazione, scarti agro-industriali); è costituito prevalentemente da metano ($50\text{-}80\%$) e, dopo opportuno trattamento, può essere immesso nella rete di distribuzione del gas naturale. La produzione di biometano è un ottimo modo per utilizzare i rifiuti e il suo uso è in costante crescita in Europa, particolarmente in Germania e Svezia dove fornisce oltre il 50% del metano utilizzato per autotrazione [7].

Il bioetanolo si ottiene dal granturco (50%), soprattutto negli Stati Uniti, e dalla canna da zucchero (30%), principalmente in Brasile. Nel 2017 ne sono stati prodotti 106 miliardi di litri

[41]. Si stima che circa il 3% della produzione mondiale di granoturco venga utilizzata per produrre bioetanolo che viene miscelato in diverse concentrazioni con la benzina. In Europa, i più forti produttori di bioetanolo sono Francia e Germania.

Il biodiesel è ricavato da oli vegetali (soia, girasole, palma, granoturco) o da grassi animali. La sua produzione è diffusa in molti Paesi e nel 2017 ha raggiunto i 31 miliardi di litri [41]. L'Unione Europea, nel tentativo di abbattere la produzione di CO₂, ha fornito sussidi per la produzione di biodiesel da miscelare al gasolio di origine fossile. Il biodiesel viene prodotto in massima parte con olio di palma proveniente da Paesi equatoriali. Si è calcolato però che il biodiesel prodotto con olio di palma genera quantità di CO₂ maggiori del gasolio fossile. Il motivo è che la palma da olio cresce in aree equatoriali, normalmente occupate da foreste che vengono abbattute e quindi viene a mancare la loro azione positiva sul clima. Inoltre, sotto le aree forestali ci sono spesso terreni torbosi che, una volta deforestati e drenati, si decompongono rapidamente o addirittura bruciano, liberando enormi quantità di CO₂ in atmosfera. Di fronte a questo disastro, che gli scienziati avevano previsto, il Parlamento Europeo, nel gennaio scorso ha votato per escludere entro il 2020 l'olio di palma dai sussidi per il biodiesel perché si è finalmente accorto di aver adottato un rimedio peggiore del male [47].

BIBLIOGRAFIA

¹G. Ciamician, *Science*, 1912, **36**, 385.

²https://www.ipcc.ch/ipccreports/far/wg_i/ipcc_far_wg_i_full_report.pdf

³N. Armaroli, V. Balzani, N. Serpone, *Powering Planet Earth - Energy Solutions for the Future*, Wiley-VCH, 2013.

⁴http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/2018/03/Nuclear-disaster_EPR_EN.pdf

⁵N. Armaroli, V. Balzani, *Energy for a Sustainable World - From the Oil Age to a Sun-Powered Future*, Wiley-VCH, 2011.

⁶V. Balzani, *Sapere*, 2018, ottobre, 22-27.

⁷N. Armaroli, V. Balzani: *Energia per l'astronave Terra*, Terza edizione, L'era delle rinnovabili. Zanichelli, 2017.

⁸<http://www.rff.org/files/sharepoint/WorkImages/Download/RFF-RPT-kyotoprot.pdf>

⁹www.ipcc.ch/report/ar5/syr/

¹⁰<http://unfccc.int/resource/docs/2015/Cop21/eng/I09r01.pdf>

¹¹Francesco, *Laudato si'*, Lettera enciclica sulla cura della casa comune, Paoline Libri, 2015.

¹²A. Clò, *Energia e clima. L'altra faccia della medaglia*, Il Mulino, 2017.

¹³<https://www.theguardian.com/environment/2012/feb/15/leak-exposes-heartland-institute-climate>

¹⁴V. Balzani, *Lettere ai giornali*

<https://ilblogdellasci.wordpress.com/2018/07/02/due-lettere-a-repubblica/>

<https://ilblogdellasci.wordpress.com/2018/09/07/lettera-aperta-alla-saipem/>

¹⁵F.C. Moore, D.B. Diaz, *Nature Climate Change*, 2015, **5**, 127.

¹⁶<https://esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

¹⁷<https://www.bbc.com/news/science-environment-45471410>;

http://www.ipcc.ch/news_and_events/pdf/press/ma-p48.pdf

¹⁸The IMBIE team, *Nature*, 2018, **558**, 219.

¹⁹<https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>

²⁰<https://www.gfdl.noaa.gov/global-warming-and-hurricanes/>

²¹The Global Risks Report 2018, 13th Edition, World Economic Forum, 2018.

²²<https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-05-01/air-pollution-kills-7-million-people-a-year-who-reports#tictocnews>

²³<https://ilblogdellasci.wordpress.com/2018/08/15/ascoltare-la-scienza-lincidente-di-bologna-e-la-transizione-energetica/>

²⁴BP Statistical Review of World Energy, 2018.

²⁵<https://srsroccoreport.com/u-s-shale-oil-industry-swindling-stealing-energy-stay-alive/>

²⁶C. McGlade, P. Ekins, *Nature*, 2015, **517**, 187.

- ²⁷https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf
- ²⁸<http://www.rechargenews.com/transition/1453400/statoil-to-change-name-to-equinor>
- ²⁹<https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-05-15/repsol-said-to-end-pursuit-of-oil-growth-amid-energy-transition>
- ³⁰<http://www.rechargenews.com/transition/1356364/dong-changes-name-to-orsted-to-reflect-black-to-green-journey>
- ³¹<https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/shell-energy-transition-report.html>
- ³²<https://www.shell.it/energia-e-innovazione/il-futuro-energetico.html>
- ³³https://www.eni.com/docs/en_IT/enicom/publications-archive/publications/reports/rapporti-2017/Integrated-Annual-Report-2017.pdf
- ³⁴<https://about.bnef.com/new-energy-outlook/#toc-download>
- ³⁵<http://priceofoil.org/2017/11/09/burning-the-gas-bridge-fuel-myth/>
- ³⁶T. Wang *et al.*, *Environ. Sci. Technol.*, 2017, **51**, 6990.
- ³⁷https://www.eni.com/it_IT/investitori/strategia.page
- ³⁸<http://temi.repubblica.it/micromega-online/altro-che-eni-serve-una-societa-pubblica-al-100-per-energia/?printpage=undefined>
- ³⁹<https://corporate.enel.it/it/media/news/d/2017/11/piano-2018-2020-enel-accelera-su-digitalizzazione-e-clienti>
- ⁴⁰M.A. Delucchi, M.Z. Jacobson, *Energy Policy*, 2011, **39**, 1170;
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.045>
- ⁴¹www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/
- ⁴²<http://www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017;>
<http://www.irena.org/publications/2018/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2018>
- ⁴³<https://www.bp.com/energytransition>
- ⁴⁴N. Armaroli, V. Balzani, *Chem. Eur. J.*, 2016, **22**, 32.
- ⁴⁵Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report, updated 19 June 2018.
- ⁴⁶T. Seba, Clean disruption of energy and transportation, Clean Planet Ventures, Cal., 2014.
- ⁴⁷<http://www.lastampa.it/2016/11/29/blogs/in-diretta-da-greenpeace/il-biodiesel-di-eni-il-clima-e-le-foreste-ReuoQzYbtSVMBH0IJ5CIOO/pagina.html>