



Sergio Carrà, Maurizio Masi
Politecnico di Milano
sergio.carra@polimi.it

IMPIEGO DELLE ENERGIE “ALTERNATIVE”: OPPORTUNITÀ O VINCOLI PER LO SVILUPPO ECONOMICO?

Il perseguimento dell'efficienza energetica garantisce nel contempo la tutela dell'ambiente e il risparmio. Sotto quest'aspetto, quindi, l'efficienza energetica appare come la miglior fonte alternativa di energia. Se si tiene conto che nel bilancio energetico dei Paesi più sviluppati il 50% circa dell'energia impiegata è dissipata ne emerge che il miglioramento dell'efficienza energetica attraverso il progresso delle tecnologie offre la migliore prospettiva di conciliare il risparmio con la tutela dell'ambiente.

I binomio “energia e sviluppo” è da sempre indissolubile. Negli ultimi anni è stato arricchito con l'aggettivo “sostenibile”, facendo emergere interessanti prospettive per le fonti di energia rinnovabili che si presentano prive d'impatti ambientali e possono contribuire all'indipendenza energetica. Nessuna di esse ha acqui-

stato dimensioni tali da poter essere considerata alternativa all'energia prodotta dai combustibili fossili, che coprono l'85% del fabbisogno mondiale di energia. La loro estensione su ampia scala comporta infatti un'onerosa transizione tecnologica per cui le applicazioni sino ad ora ricevute sono state sussidiate dai Governi dei Paesi occi-

dentali. Anche se lo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili stimola la creazione di nuova occupazione è tuttavia chiaro che la politica degli incentivi può essere ragionevolmente sostenuta solo per un limitato periodo, trascorso il quale le nuove tecnologie dovranno avere la capacità di auto sostenersi nell'ambito dei prezzi stabiliti dal mercato. Nell'attuale panorama mondiale le problematiche sopra elencate si devono affrontare ponendo una particolare attenzione ai seguenti fattori:

- aumento dei consumi di energia: si assume ragionevolmente che entro la metà del presente secolo, gli attuali 15 TW di potenza consumati nel mondo raggiungano circa 25 TW^a. La dinamica di tale evoluzione è sostanzialmente motivata dalla deriva demografica e, in minor misura, dall'incremento del fabbisogno medio pro-capite (da circa 2,2 kW/persona a 3,3 kW/persona) [1-4];
- evoluzione climatica: è riconosciuta la necessità di controllare la produzione di anidride carbonica per limitare il riscaldamento globale, anche se l'influenza del contributo antropico appare ancora incerta, come risulta dal sostanziale insuccesso dell'ultimo convegno tenutosi a Copenaghen;
- combustibili fossili: sono oggi la fonte primaria prevalente poiché più dell'85% dell'energia viene prodotta attraverso il loro impiego e si presume che nel presente secolo eserciteranno ancora un ruolo importante [3].

Per poter affrontare in modo adeguato i problemi che nascono da questa situazione è opportuno avere piena consapevolezza delle ragioni per le quali i combustibili fossili dominano il mercato dell'energia. L'energia è un bene di largo consumo, appartenente alle cosiddette *commodities*, per i cui impieghi sono di grande rilevanza il "prezzo" e la "disponibilità". Riguardo al primo fattore, anche ai prezzi attuali del petrolio dell'ordine di 80 \$ al barile (corrispondenti a circa 0,50 \$/litro), l'energia elettrica prodotta, pur con qualche differenza tra olio combustibile, gas naturale e carbone, si aggira sugli 0,05 \$/kWh^b. Per quanto concerne il secondo fattore, esistono oggi ampie infrastrutture che sono in grado di rendere disponibile l'energia in ogni luogo, in qualunque momento e alla potenza desiderata. In particolare, per quanto riguarda il petrolio, sono presenti capacità di trasporto, estrazione e raffinazione del greggio per un ammontare di 1.000 barili al secondo. Inoltre il petrolio fornisce, in senso relativo, un ottimo vettore energetico costituito dalle miscele d'idrocarburi leggeri (per esempio, la combustione di un litro di benzina fornisce circa 31 MJ di energia termica).

Una condizione al contorno assai rilevante riguarda il rinnovato scenario che si presenta nel panorama mondiale, poiché l'economia è trainata dai Paesi emergenti che aspirano a raggiungere un grado di benessere confrontabile a quello dei Paesi occidentali. Il loro attuale sviluppo fruisce in gran parte della gratuità d'impiego di alcune importanti tecnologie, in particolare quelle energetiche che privilegiano i combustibili fossili. In questo quadro competitivo appare poco realistico ritenere che lo sviluppo economico dei Paesi occidentali possa essere sostenuto attraverso la produzione dell'energia

mediante tecnologie non competitive.

Nel caso dell'Italia, la cui produzione energetica è atipica rispetto alla media mondiale per aver abolito il nucleare e privilegiato il gas naturale, è importante individuare i percorsi lungo i quali si possa recuperare una politica energetica equilibrata e competitiva, compatibile con quella dei Paesi con i quali vengono tenuti rapporti culturali ed economici. In questo quadro è importante ricordare che l'Italia è l'unico Paese al mondo che abbia alienato un patrimonio culturale e industriale distruggendo le centrali nucleari con gravi conseguenze sul bilancio energetico.

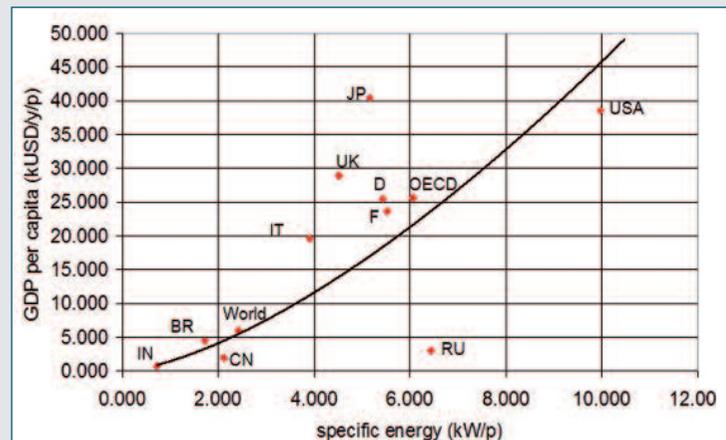


Fig. 1 - Relazione tra il prodotto interno lordo pro capite (migliaia di \$/anno/persona) di alcuni Paesi e loro intensità di fabbisogno energetico (kW/persona). Dati riferiti all'anno 2008 e attualizzati alla moneta dell'anno 2000

Ruolo dell'energia sullo sviluppo economico

Un'evidente testimonianza del ruolo esercitato dal consumo di energia sullo sviluppo economico è fornita dal fatto che, in prima approssimazione, i valori del prodotto interno lordo pro capite delle diverse nazioni, dall'Africa agli Stati Uniti, aumenta all'aumentare dell'intensità di consumo energetico pro capite, come illustrato dalla Fig. 1 [3]. Il Prodotto Interno Lordo, anche se è stato detto *che manca di tutto ciò che rende la vita veramente degna di essere vissuta* [5], viene correlato con lo standard di vita e quindi può essere ragionevolmente assunto come un indice di benessere. L'intensità energetica rappresenta il fattore moltiplicativo della capacità personale di produrre lavoro rispetto alla pura azione manuale. Energeticamente un uomo equivale a circa una lampadina a 100 W (2.600 kcal/24ore). Se prendiamo il dato riferito all'Italia, l'ausilio del lavoro delle macchine ci consente di moltiplicare di circa 40 volte le nostre capacità lavorative, più di due volte il valore corrispondente alla media del Mondo. Nell'ambito di un sistema in continua evoluzione è però necessario tenere conto della sua evoluzione. Ad esempio la recente crisi economica sta esercitando un'azione negativa sui consumi energetici, facendo crollare le emissioni dei gas serra, per cui risultano quasi raggiunti gli obiettivi che l'Unione Europea si era prefissa per l'anno 2020. Paradossalmente appare quindi che la crisi economica sia più efficace delle proposte avanzate dagli ambientalisti.

^a Qui e nel seguito si farà sempre riferimento ad unità di potenza in quanto la grandezza da monitorare è il fabbisogno energetico annuo. 1 TW corrisponde a 8.760 TWh/anno o 753,3 MTOE/anno (milioni di tonnellate di petrolio equivalente/anno).

^b Si tenga presente che questo è il costo di produzione del kWh di energia elettrica in grandi impianti, il costo dell'energia primaria necessaria (ossia il combustibile) per produrlo è circa 1/3 del valore finale. Il 60% dei costi dell'energia elettrica è dovuto al rendimento dei cicli termoelettrici e al costo degli impianti.

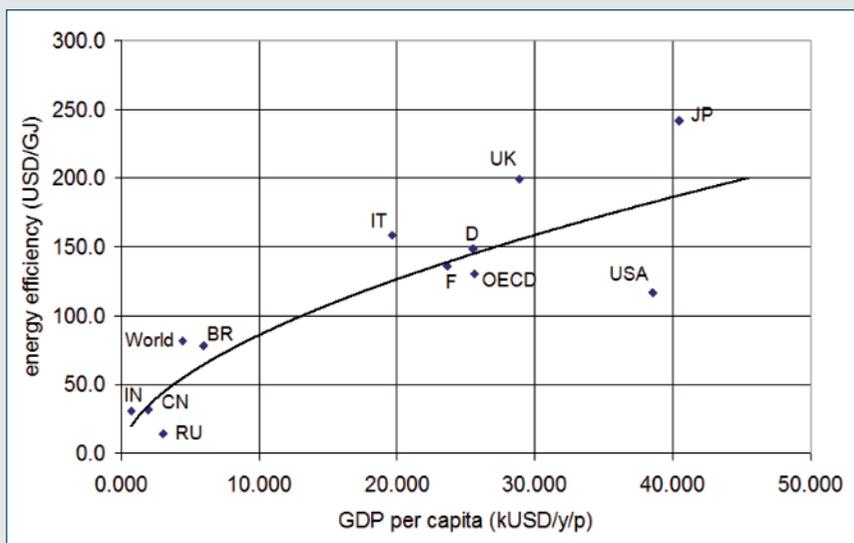


Fig. 2 - Efficienza economica dell'energia per diversi Paesi (\$PIL/GJ di energia consumata) in funzione del prodotto interno lordo pro capite (migliaia di \$/anno pro capite). Dati riferiti all'anno 2008 e attualizzati alla moneta dell'anno 2000

In realtà tale riduzione dell'inquinamento è dovuta a quella dei consumi per cui non costituisce una scelta ma viene imposta dalla crisi economica. Essa si ripercuote in particolare sulle energie rinnovabili poiché sta diminuendo lo spazio per gli investimenti mentre i finanziamenti tendono ad essere devoluti a vantaggio delle esigenze di carattere sociale.

Un ulteriore aspetto riguarda le azioni solitamente accomunate nel binomio "risparmio" ed "efficienza energetica". In accordo al classico approccio termodinamico introdotto da Sadi Carnot nel 1832, l'efficienza è definita dal rapporto fra l'energia che viene utilizzata per esercitare qualunque tipo di attività produttiva e quella che viene spesa. Pertanto l'energia utilizzata è espressa dalla differenza fra l'energia spesa e quella dissipata per la presenza delle irreversibilità che fatalmente accompagnano ogni evento naturale. Quindi tanto più raffinata sarà la tecnologia impiegata e tanto più alto sarà il valore di tale efficienza poiché si avvicina a quella ideale. Un'esemplificazione concreta si riscontra proprio nel funzionamento delle macchine e dei motori termici. La macchina a vapore di Newcomen del 1712 aveva un'efficienza dell'1%, quella di Watt del 1764 del 10%, un motore a combustione interna ha una efficienza media del 30% ed un impianto termoelettrico a ciclo combinato raggiunge il 60%. Come pubblicato sull'*American Scientist* [11], un'indagine effettuata presso diversi istituti di ricerca ha messo in evidenza che esistono concrete prospettive di miglioramento del rendimento dei motori a combustione interna quantificabili con il loro costo. Risulta ad esempio che con un aumento del costo delle automobili del 15% si potrebbe realizzare con un risparmio del 17% nell'impiego dei combustibili e conseguentemente delle relative emissioni di inquinanti, in particolare anidride carbonica.

Se teniamo ora conto che nel bilancio energetico dei

Paesi sviluppati il 50% circa dell'energia impiegata viene dissipata ne emerge che il miglioramento dell'efficienza offre le più interessanti prospettive per conciliare il risparmio con la tutela dell'ambiente. Occorre però precisare che tale risultato è raggiungibile solo persistendo negli investimenti orientati al progredire dello sviluppo tecnologico.

Generalizzando l'analisi precedente è utile definire un indicatore più semplice ma altrettanto efficace: il prodotto interno lordo per unità di consumo energetico, qui espresso in \$/GJ. La Fig. 2 mostra che la tecnologia a disposizione dei Paesi sviluppati consente di ottenere una maggiore quantità di "lavoro utile" (il PIL) a parità di input energetico. I Paesi in via di sviluppo godono della gratuità delle tecnologie più datate e pertanto sono energeticamente meno efficienti.

Per fissare le idee, 150 \$/GJ equivalgono a 4,83 \$/L di benzina (il cui potere calorifico è 31 MJ/L). Considerato

l'esoso prezzo italiano di circa 1,5 \$/L, del quale oltre il 66% è dovuto ad imposte, il moltiplicatore tra spesa (l'energia non è gratis) e risultato è pari a circa 3 (circa 9,5 se si fa riferimento al prezzo antecedente la tassazione).

La Fig. 3 mostra anche che per ottenere efficienza energetica è necessario disporre di maggior ricchezza, poiché l'innovazione è costosa. L'incremento di efficienza nei sistemi ad alto rendimento risulta infatti più costoso. Pertanto, i Paesi sviluppati hanno l'onere, anche morale, di guidare l'innovazione tecnologica.

Una società soggetta all'aumento della sua popolazione e alla diffusa aspirazione ad una più estesa ripartizione del benessere non può quindi sottrarsi allo sviluppo economico che, come abbiamo già visto, è legato ai consumi energetici. Un mero "risparmio energetico" non connesso ad un incremento dell'efficienza si tradurrebbe inevitabilmente (come è successo nella recente crisi economica mondiale) in una riduzione del benessere generalizzato.

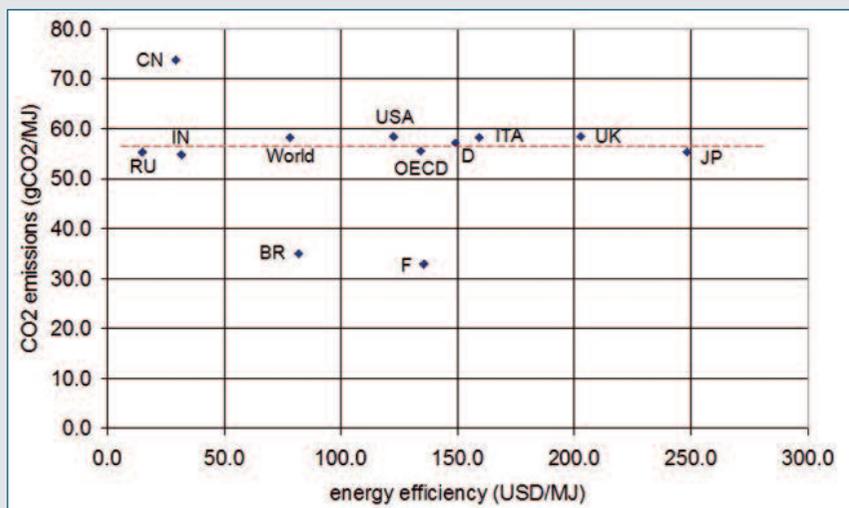


Fig. 3 - Emissione di CO₂ per unità di energia consumata in funzione dell'efficienza energetica

Se le riserve di combustibili fossili si stessero avviando all'esaurimento, il risparmio sarebbe di utilità modesta, mentre gli sforzi dovrebbero essere orientati a far decollare una o più fonti alternative di energia, creando i presupposti per un'era post petrolifera.

Nel compiere le scelte, è importante stabilire programmaticamente la ripartizione delle fonti, tenendo conto che la loro attivazione richiede ingenti investimenti distribuiti su un arco temporale esteso ed è necessario confrontarsi con le analoghe scelte fatte dai Paesi che sono nostri concorrenti o partner commerciali. Poiché all'impiego di ciascuna fonte primaria corrisponde un'emissione più o meno elevata di gas serra, la quantità di anidride carbonica emessa per unità di energia consumata fornisce un indice del "mix energetico" adottato. Come mostrato dalla Fig. 3, quasi tutti i Paesi si assestano sullo stesso valore medio delle emissioni a conseguenza dell'egemonia delle fonti fossili che rappresentano circa l'85% del "mix energetico" e che tale valore è poco influenzato dall'efficienza energetica del Paese [3]. Fanno eccezione la

Cina (vetustà delle tecnologie), la Francia (Paese fortemente nucleare) e il Brasile (con rilevante uso dei biocarburanti).

In questo quadro si conferma che non appare del tutto opportuno puntare sul risparmio fine a se stesso dell'energia la quale rappresenta la capacità di produrre lavoro e quindi, in ultima analisi, beni e servizi che contribuiscono al benessere. Viceversa si devono concentrare gli sforzi sul suo adeguato ed efficiente utilizzo. Il perseguimento dell'efficienza infatti garantisce nel contempo la tutela dell'ambiente e il risparmio, per cui essa appare come la miglior fonte alternativa di energia. Se si tiene conto che nel bilancio energetico dei Paesi più sviluppati il 50% circa dell'energia impiegata viene dissipata (ossia non produce lavoro utile), ne emerge che il miglioramento delle tecnologie offre la migliore prospettiva di conciliare il risparmio con la tutela dell'ambiente.

Per quanto concerne la transizione a fonti non fossili, le possibili vie da percorrere riguardano rispettivamente l'avvio di un impiego innovativo delle biomasse fruendo dei risultati dell'ingegneria genetica, l'incentivazione delle altre fonti di energia rinnovabili e l'incremento nell'impiego della fonte nucleare. Si tratta di un percorso che se viene perseguito con successo permette d'inserirsi in un cammino nel quale lo sviluppo economico non rischia di essere penalizzato da una crisi energetica.

Prima di procedere è necessario precisare che i consumi energetici sono, in prima approssimazione, pressoché equamente suddivisi tra i trasporti, la produzione di energia elettrica e la produzione del calore impiegato per rispondere alle necessità industriali e a quelle domestiche civili. In questo quadro le fonti energetiche rinnovabili potranno avere in primo luogo un impatto diretto sulla produzione di energia elettrica, in concorrenza con l'energia nucleare, dato che al momento esistono modeste prospettive per una massiccia sostitu-

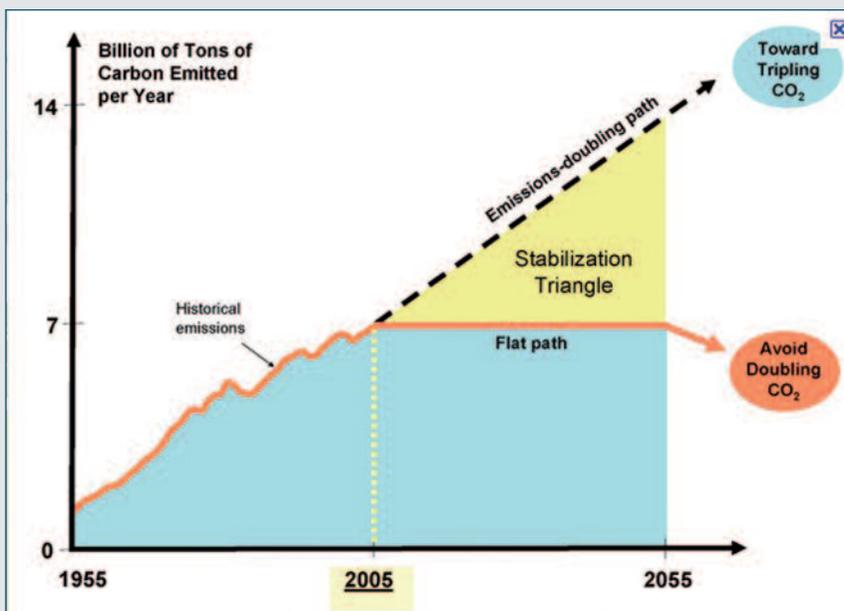


Fig. 4 - Diagramma di Sokolov nel quale viene individuato il triangolo nel quale stabilite le strategie di mix energetico da implementare per stabilizzare la concentrazione dell'anidride carbonica atmosferica ad un valore prefissato

zione dei derivati petroliferi nel campo dei trasporti, in attesa che si verifichino significativi progressi nelle tecnologie concernenti le prestazioni delle batterie elettriche, dei sistemi di produzione e d'immagazzinamento dell'idrogeno, della produzione di biocombustibili. In aggiunta, anche il fabbisogno di calore nei processi industriali, tipicamente ad alta temperatura, non potrà essere agevolmente ed economicamente fornito per effetto Joule mediante elettricità, con l'eccezione dei processi elettrometallurgici. Viceversa il fabbisogno di riscaldamento civile potrebbe essere fornito in parte da energia elettrica e ricorrendo a sistemi geotermici di bassa entalpia, con la riduzione quindi del ricorso ai combustibili fossili destinati a tale bisogno.

Fonti "carbon-free"

Le fonti di energia "carbon-free" si contrappongono ai combustibili fossili poiché non contemplano emissioni di anidride carbonica; esse includono il nucleare e tutte le sorgenti rinnovabili. Il modo più efficace per valutare quale rilevanza dovranno avere viene offerto dal diagramma di Robert Sokolov, attualmente responsabile della *Carbon Mitigation Initiative* del *Massachusetts Institute of Technology*, diventato ormai un'icona per queste analisi, riportato in Fig. 4.

Esso è caratterizzato da due curve, quella superiore che si riferisce alla situazione *Business As Usual* (BAU), corrispondente all'assenza di azioni intese a limitare l'emissione di anidride carbonica, mentre quelle inferiori sono calcolate in modo tale da controllarne il mix energetico e le conseguenti emissioni in modo da stabilizzare la concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera ad una quantità fissa, per esempio pari a 550 ppm.

La strategia per implementare le sorgenti "carbon-free" è di fare ricorso ad un mixing definito in un triangolo detto di stabilizzazione che viene lottizzato in diversi cunei ciascuno corrispondente ad una

Tab. 1 - Potenziale delle diverse fonti di energia rinnovabile

Fonte	Funzionamento (ore/anno)	Consumo 2010 (TW)	Incidenza 2010	Costo 2010 (\$/kWh)	Potenziale
Idroelettrica	4050	0,30	2,0%	0,015	1,5
Geotermica	7200	0,10	0,7%	0,050	10
Eolica	2200	0,16	1,1%	0,070	2-4
Solare	1400	0,09	0,6%	0,350	>100

sorgente "carbon-free". Le azioni più significative presenti nel mixing così identificato sono le seguenti:

- miglioramento dell'efficienza;
- incentivazione delle sorgenti rinnovabili;
- adeguata collocazione della fissione nucleare.

Per definire il contributo di ciascuna di esse è necessario effettuare delle scelte che risultino compatibili con le caratteristiche di ciascun Paese per quanto riguarda la disponibilità delle risorse e il loro livello culturale e tecnologico.

Ciò premesso l'attenzione verrà ora focalizzata sulle energie rinnovabili, partendo dai dati riassunti in Tab. 1. In essa, per le diverse sorgenti rinnovabili sono riportati i valori dei consumi attuali (espressi in TW), l'incidenza percentuale sul totale del fabbisogno mondiale odierno (15 TW), il costo e la loro potenzialità di sviluppo valutata approssimativamente tenendo conto degli aspetti geografici, tecnici ed economici.

La Tab. 1 evidenzia la discontinuità della fornitura di energia rinnovabile dovuta ai cicli naturali. Per questo motivo si usa differenziare il concetto di potenza installata o di picco (Wp) da quello di energia prodotta in un anno (W). La relazione esistente tra le due è stabilita dalla frazione oraria di funzionamento annuo dell'impianto H, per cui $W=Wp \cdot H$, essendo H dipendente dal tipo di fonte considerata e dalla sua localizzazione geografica. Per esempio, in Italia, un impianto fotovoltaico funziona per circa 1.400 h/anno e quindi $H=1.400/8.760$.

Si può osservare che la fonte meno costosa è quella idroelettrica, la cui capacità potenziale è però limitata, mentre le altre (geotermica, eolica) hanno costi confrontabili e vicini a quelli dei combustibili fossili e del nucleare. In realtà la più impiegata è la biomassa, anche per

ragioni storiche, sulla quale però non ci soffermeremo. La più onerosa, tanto da essere presente in quantità trascurabili ed essere oggi fuori mercato, è la solare che tuttavia costituisce, in una prospettiva futura, l'oggetto delle maggiori attenzioni.

Per inserire la presente analisi in un quadro economico si deve tenere presente che in un'economia di mercato lo sviluppo implica un accumulo di capitale, come indicato nello Schema 1, che caratterizza la dinamica dello sviluppo stesso. Il flusso Y dei beni prodotti, che si identifica con il prodotto interno lordo, dipende dal capitale K e dal livello della tecnologia e si ripartisce nei flussi di investimento In, dei beni di consumo C, delle risorse per spese pubbliche G.

Nel suo ambito risulta:

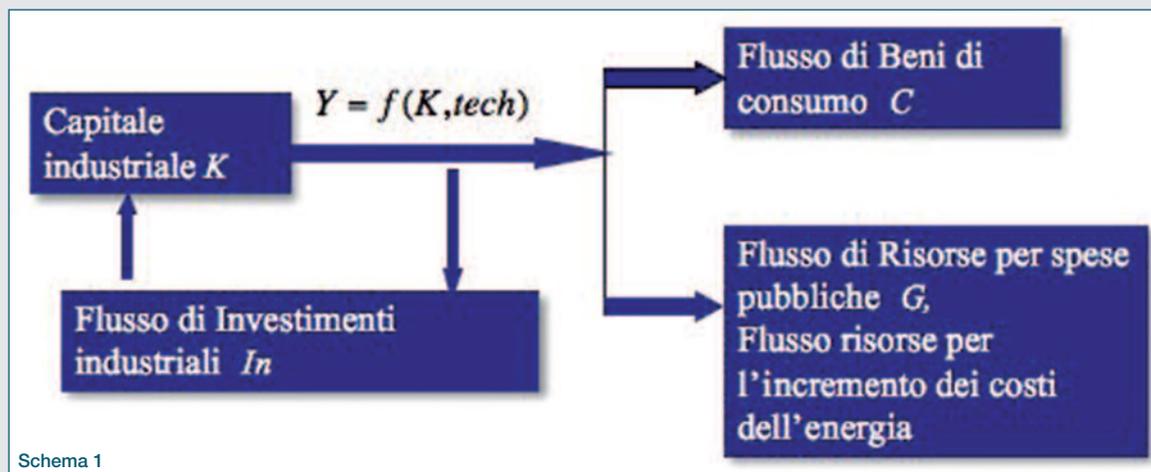
$$GDP \equiv Y = I + C + G$$

Per semplicità sono stati posti nulli gli scambi con l'estero, poiché non significativi per l'analisi in corso. In realtà i flussi sono influenzati dalle scelte effettuate sul piano politico ed economico che possono condizionare il livello di consumo di beni e servizi, gli investimenti in capitali produttivi e in servizi. Il mercato infatti non è sufficiente per indirizzare lo sviluppo delle tecnologie rinnovabili per cui i governi hanno il ruolo di identificare i percorsi su cui orientare le scelte.

In conclusione sulla base della Tab. 1 le fonti eoliche e geotermica sono economicamente vantaggiose, ma il loro sviluppo risulta comunque limitato dalle condizioni ambientali, logistiche e operative. Viceversa allo stato attuale la fonte che appare meno adeguata è quella solare. Tuttavia essa è l'oggetto delle maggiori attenzioni giustificate dal fatto che il Sole riversa sul nostro pianeta una quantità di energia pari a quattro ordini di grandezza di quella impiegata nelle attività umane. Pertanto è allettante ritenere di poter sopperire ai nostri bisogni utilizzando unicamente tale sorgente di energia. Inoltre è l'unica fonte rinnovabile che potrebbe far fronte ai bisogni futuri qualora si verificasse una reale crisi energetica.

Impiego della fonte solare

La cattura dell'energia solare viene perseguita sostanzialmente attra-



verso due approcci chiamati rispettivamente *solare termodinamico* e *solare fotovoltaico*.

Nel primo di essi l'energia della radiazione viene direttamente convertita in calore, che viene impiegato per azionare un convertitore termomeccanico e produrre elettricità. Il cuore di questi impianti è un sistema di specchi che concentra la radiazione su un col-

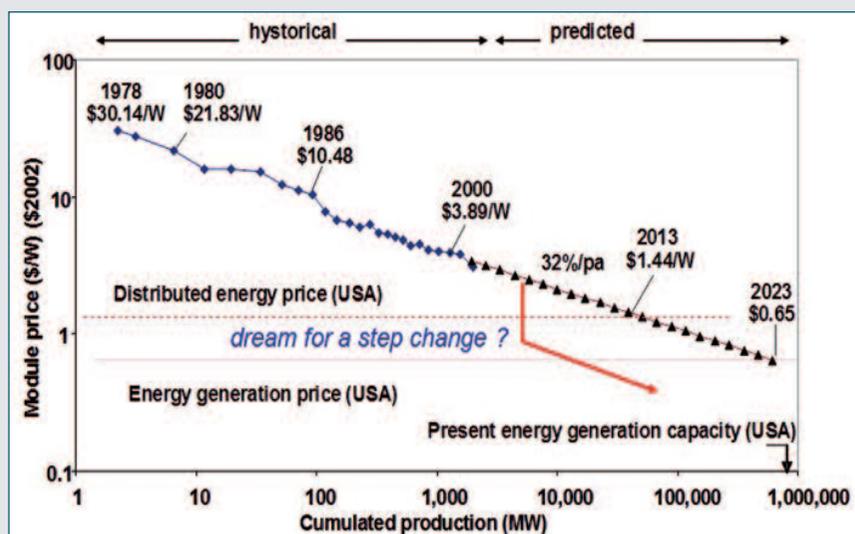


Fig. 5 - Evoluzione del prezzo dei moduli fotovoltaici a base di silicio in funzione della produzione cumulata (MWp prodotti)

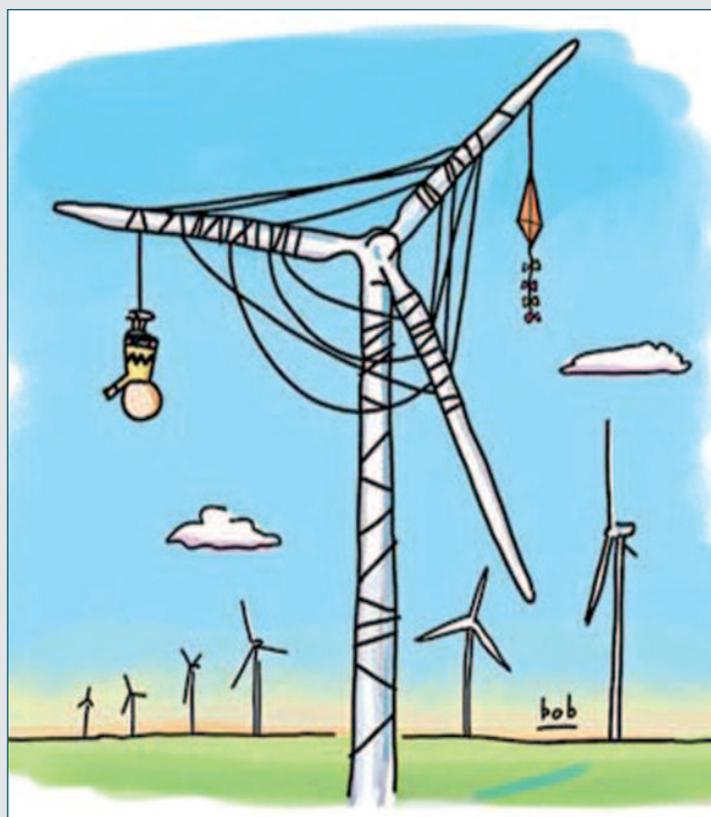
lettore. Quindi, il rendimento di questi impianti dipende dall'efficienza del sistema specchio/collettore (circa 90%) e dal rendimento del ciclo termodinamico successivamente impiegato per la conversione del calore in energia elettrica (circa 45%). In definitiva si può arrivare ragionevolmente a un rendimento massimo complessivo del 40%, che porta a un'intensità energetica di circa 80 W/m². Pertanto, nell'insieme si tratta di dispositivi potenzialmente efficienti, anche se permangono incertezze sulla loro durata e affidabilità. La produzione di energia elettrica che sta a valle della caldaia solare risulta analoga a quella di una centrale termoelettrica alimentata con combustibili fossili. Le uniche differenze sono l'alternanza nella fornitura dell'energia ed il costo che è circa tre volte superiore, con poche possibilità di miglioramento.

Gli *impianti fotovoltaici* derivano dall'applicazione di un effetto scoperto da Becquerel nel 1839, basato sulla corrente elettrica generata in corrispondenza di una giunzione *p-n* di un semiconduttore esposto alle radiazioni solari. Dato che lo spettro solare copre tutte le lunghezze d'onda dall'infrarosso all'ultravioletto, con un massimo in corrispondenza delle lunghezze del giallo-verde, semiconduttori che presentino *band gap* in questo intervallo di energia possono portare a efficienze superiori di cattura della radiazione e di conversione in elettricità. I fattori di costo del semiconduttore e di processo (ossia della serie di operazioni necessarie per produrre la cella fotovoltaica) sono però anch'essi determinanti nel successo della tecnologia di conversione.

Sfruttando le sinergie con l'industria microelettronica, il materiale attualmente di gran lunga più impiegato nella costruzione delle celle è il silicio. La tecnologia di cella che impiega come materiale il silicio cristallino (monocristallino o policristallino) nel 2010 copre circa l'81% del mercato, con prevalenza (75%) per la tecnologia basata su quello policristallino. Tra le tecnologie a film sottile, che depositano uno strato sottile di materiale semiconduttore su di un substrato a basso costo quale il vetro, quella che ricorre a depositi di silicio

amorfo, copre circa il 7% del mercato delle celle installate. In definitiva quindi al silicio si deve l'88% delle installazioni mondiali. In alternativa all'impiego di silicio, l'attenzione è ora volta alla preparazione di materiali semiconduttori a base di composti policristallini, che sembrano offrire una valida opzione per ridurre i costi in quanto possono essere ottenuti con processi relativamente semplici, che promettono efficienze elevate. In questo quadro, materiali interessanti sono il seleniuro di indio e rame (CuInSe₂-CIS) e il telluriuro di cadmio (CdTe). Le loro quote di mercato sono rispettivamente dell'ordine del 2% e del 10%. Tutte le altre tecnologie proposte (per un totale di circa 70) sono oggi a livelli di ricerca e pertanto con impatto nullo sul mercato a breve e medio termine.

Benché solitamente si indichi il parametro di efficienza di cella per qualificare il prodotto, la penetrazione commerciale è determinata dal suo costo, solitamente espresso in funzione della potenza massima ottenibile dal dispositivo in piena insolazione o di picco (€/Wp), che si riflette poi sul prezzo unitario finale (€/kWh). Facendo riferimento alla tecnologia oggi dominante a base di silicio policristallino, il costo d'investimento, che nel 2007 si aggirava sui 3 \$/Wp, all'inizio del 2010 era diminuito di quasi la metà (1,6 \$/Wp). Come evidenziato dalla Fig. 5, la diminuzione dei costi di cella segue le leggi delle economie di scala, e quindi si adegua all'incremento delle installazioni (circa 0,049 \$/Wp ogni GW di potenza





(che oggi sfiorano il 50% di efficienza a costi però non competitivi) e le celle polimeriche, le cui proprietà ottiche sono calibrate sulla base delle dimensioni di *Quantum Dots* in esse introdotte. In entrambi i casi lo scopo è quello di ampliare lo spettro delle radiazioni solari raccolte. Ancora più ambiziosa appare la sfida di trovare nuove tecnologie che si collochino fra le celle fotovoltaiche e le piuttosto complesse foglie. Si tratta infatti di trovare un ibrido fra l'industria e la natura. In sostanza nel settore solare non mancano le idee sulla

installato). Seguendo la progressione storica dal 2002, con una crescita (conservativa) del mercato del 32% all'anno, è prevedibile che intorno al 2015-2020 si raggiungano costi di cella dell'ordine di 1 \$/Wp, quindi in grado di competere con il costo dell'energia elettrica distribuita negli Stati Uniti. In Paesi che hanno costi dell'energia circa doppi (Giappone, Unione Europea), la generazione fotovoltaica potrà già essere competitiva con i costi all'utente già intorno al 2015. Questo obiettivo è molto importante, perché a quel punto essa sarà in grado di autosostenersi e i governi potranno rinunciare alle politiche di incentivazione promosse per la fase di lancio della tecnologia stessa. La strada per raggiungere prezzi competitivi con la produzione intensiva di energia da fonti fossili (grandi centrali) è invece ancora lunga (nelle più favorevoli previsioni, alla metà del 21° secolo), poiché comporta una riduzione di costo di circa 2,5 volte rispetto ai valori del 2009.

Malgrado le azioni mediatiche promozionali e gli incentivi sino ad ora devoluti il fotovoltaico decolla con fatica poiché il suo contributo al totale dell'energia prodotta nel mondo è assai inferiore all'1%. Anche rispettando rigorosamente lo sviluppo sin qui seguito, si prevede che al 2050 il fotovoltaico contribuirà al bilancio energetico mondiale per meno del 2% del fabbisogno globale.

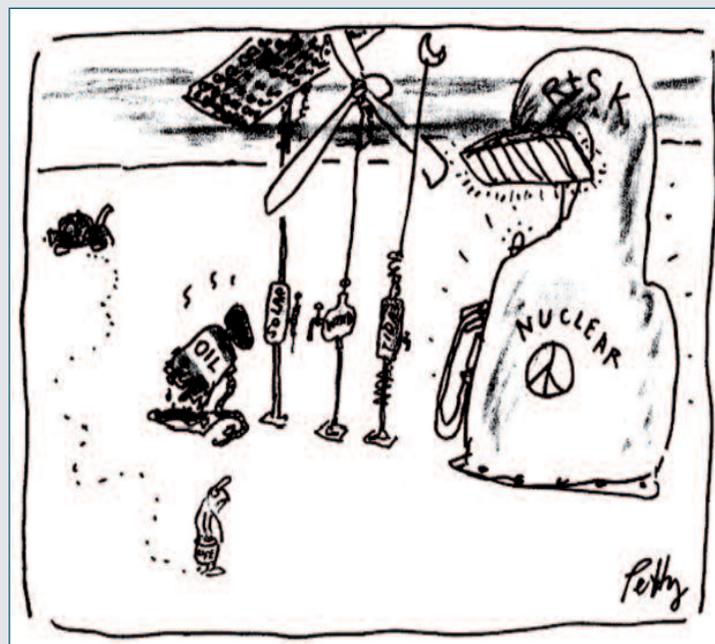
Ciò giustifica gli sforzi di ricerca che vengono condotti nel mondo intesi ad introdurre concetti innovativi che superino l'impiego dei semiconduttori sopra menzionati. Nella sostanza la progressione, pur rilevante, sopra prospettata non è sufficiente a far rientrare il fotovoltaico nelle fonti potenzialmente alternative alle fonti fossili, almeno per tutta la metà del presente secolo. Come illustrato in Fig. 5, c'è quindi la necessità di un cosiddetto "step change" che consenta una significativa innovazione tecnologica e che può essere perseguito solo con un'adeguata attività di ricerca. In quest'ottica, tecnologie allo studio che meritano di essere menzionate sono le celle a giunzioni multiple

ricerca di nuove soluzioni. Ma se, come e quando riusciranno a rivoluzionare il business energetico rimane una grande incognita.

Ruolo delle infrastrutture

Le fonti eolica e solare producono energia elettrica e pertanto se si vuole aumentarne il contributo è necessario sviluppare le infrastrutture richieste per il suo impiego. In particolare:

- migliorare le batterie elettrochimiche atte all'immagazzinamento dell'energia elettrica;
- promuovere l'installazione di reti intelligenti (smart grid) intese ad aggiustare le forniture di elettricità in risposta alle eccentricità della produzione e della domanda.



Questo approccio è cruciale per la proliferazione e l'implementazione delle tecnologie rinnovabili. Le batterie elettriche sono la forma più comune di immagazzinamento dell'energia elettrica. Tuttavia gli attuali sistemi elettrochimici sono ancora inadeguati e troppo costosi. Inoltre, gran parte delle tecnologie in essere sono molto mature e quindi per promuovere piccoli miglioramenti è necessario promuovere notevoli investimenti in ricerca. Tali limitazioni potrebbero essere superate solo con ricerche su nuovi materiali o meglio sul ricorso a nanotecnologie che però oggi promettono risultati solo in futuro medio-lungo. Il discorso duale vale per le pile a combustibile che potrebbero eventualmente impiegare l'idrogeno ottenuto per elettrolisi a partire da elettricità prodotta da una qualsiasi delle fonti sopra citate. Occorre però precisare che tali sistemi sono ancora estremamente lontani dalle prestazioni energetiche degli idrocarburi. Per esempio, la densità energetica di una pila a combustibile si aggira oggi su 0,4 kWh/kg mentre quella della benzina è 10 volte superiore: 11,4 kWh/kg. I valori precedenti sono particolarmente significativi per quanto riguarda lo sviluppo delle imprese intese a sviluppare l'impiego dell'energia elettrica nel trasporto in modo competitivo con l'attuale situazione. Questo problema è particolarmente importante se si tiene conto che le emissioni dei trasporti tendono a raggiungere livelli tali da rendere non controllabile il limite della concentrazione di anidride carbonica nei gas atmosferici. Non esiste infatti soluzione alla minaccia climatica senza cambiamento nei trasporti, e non esistono cambiamenti nei trasporti senza coerenti politiche governative. Infine bisogna sempre evidenziare il tempo necessario per le transizioni. Volendo, per esempio e per facilità di riferimento, raggiungere 2 TW di energia prodotti col fotovoltaico (corrispondenti a 13 TWp) con la tecnologia oggi dominante (che richiede circa 10 kg di silicio per kWp) nei prossimi 40 anni, sarebbe necessaria una produzione di 3,25 Mton/anno di silicio. La capacità produttiva attuale mondiale è circa 1.650 volte inferiore a tale quantitativo, assestandosi sulle

200 kton/anno. Ciò dimostra che a tutt'oggi lo sforzo d'introduzione delle energie rinnovabili nel mondo è ancora modesto e quindi è difficile, nonché oneroso, farle uscire dalla marginalità.

Conclusioni

“C'è un vecchio pregiudizio con il quale gli uomini convivono da secoli: che il mondo non sia mai cambiato. La storia che abbiamo alle spalle è talmente breve da darcene l'impressione”. Queste parole, del tutto condivisibili, costituiscono l'incipit di un recente libro di Luca Cavalli Sforza dal titolo significativo: *La specie prepotente* [10]. In realtà il mondo è soggetto ad un cambiamento continuo e la componente essenziale di tale evoluzione è la popolazione umana che continua ad aumentare. In questo quadro l'idea di mantenere inalterato l'ambiente appare utopica, mentre più ragionevolmente ci si deve adattare ai mutamenti. Nel contempo fare ogni sforzo per tutelare l'ambiente attraverso interventi che guidino la sua evoluzione. Eventi catastrofici sono improbabili, ma se dovessero verificarsi le misure sino ad ora proposte si rivelerebbero inadeguate.

Nel quadro precedente l'economia è compressa fra Scilla e Cariddi che da un lato impongono l'impiego dell'energia per favorire lo sviluppo, dall'altra di limitarlo per proteggere l'ambiente.

Allo stato attuale le iniziative più significative appaiono le seguenti:

- creare infrastrutture in grado di agevolare lo sviluppo delle fonti rinnovabili;
- migliorare l'efficienza dei processi energetici;
- incentivare la ricerca di soluzioni innovative.

Relativamente a quest'ultimo punto occorre precisare che la loro emergenza non è prevedibile poiché il rapporto fra scienza e tecnologia è contorto ed erratico, lontano dalla linearità. Infatti come ha affermato J. Kendrew, premio Nobel per la chimica: “Gli scienziati non sono in grado di prevedere il futuro meglio di ogni altro, anche nel proprio campo di ricerca”.

Bibliografia

- [1] R.E. Smalley, *MRS Bulletin*, 2005, **30**, 412.
- [2] N.S. Lewis, *MRS Bulletin*, 2007, **32**, 808.
- [3] International Energy Agency, “Key world energy statistics”, 2009, Paris; and analogous reports for years 2000-2008.
- [4] R. Engelman, *Scientific American*, 2009, **19**, 22.
- [5] R. Kennedy, Discorso all'University of Kansas, 18 marzo 1968.
- [6] ENEA, “Rapporto energia e ambiente 2008”, Roma, 2009.
- [7] M. Masi, “Fonti di energia rinnovabili”, Enciclopedia del Terzo Millennio, Istituto dell'Enciclopedia Italiana Treccani, Roma, 2010, pp. 467-482.
- [8] M. Masi, S. Carrà, “Le energie rinnovabili”, in S. Carrà (Ed.), *Le Fonti di Energia*, Il Mulino, Bologna, 2008, pp. 137-162.
- [9] <http://www.transalchemistry.com/2010/08/algae-bio-fuel-production.html>
- [10] L. Cavalli Sforza, *La specie prepotente*, Editrice San Raffaele, Milano, 2010.
- [11] A. Schafer *et al.*, *American Scientist*, 2009, **97**, 476.

RIASSUNTO

Use of “Alternative” Energies: Opportunities or Constrains for the Economy Development?

The energy efficiency persecution appears as the better alternative energy source, particularly when considering that almost 50% of the energy used is today dissipated. Thus the technology improvements offers the better prospective to keep together the savings and the country richness with the environmental constrains.