

## Una lezione sulla densità di potenza

Come valutare la dimensione spaziale della transizione alle fonti energetiche rinnovabili  
di Vaclav Smil

### Parte I – Definizioni

Nel settore dell'energia si verificano significative transizioni: il passaggio da una risorsa dominante a nuove modalità di generazione (dal legno al carbone, dal carbone agli idrocarburi, dall'uso diretto di combustibili all'elettricità); la diffusione di nuovi sistemi di generazione (dai motori a vapore alle turbine o ai motori diesel); il ricorso a nuovi convertitori finali dell'energia prodotta (dalle lampade a incandescenza a quelle a fluorescenza). Indipendentemente dal tipo di transizione, ognuna di esse è, per sua stessa natura, un processo prolungato che si sviluppa nel corso di decenni o di intere generazioni.

Numerosi fattori entrano in gioco per determinarne la difficoltà tecnica, il costo e l'impatto ambientale. Negli ultimi anni l'attenzione si è concentrata in particolare sulla velocità dell'innovazione tecnica necessaria per il passaggio da una situazione dominata dallo sfruttamento di combustibili fossili ad un mondo che faccia affidamento prevalentemente alla conversione di energie rinnovabili, nonché sui costi e sugli investimenti che saranno verosimilmente necessari per attuare questa transizione e sui suoi benefici in campo ambientale, principalmente in termini di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Incomprensibilmente, la stessa attenzione non è stata dedicata ad un aspetto essenziale di questa grandiosa trasformazione, vale a dire alla dimensione spaziale della sostituzione dei combustibili fossili con bio-combustibili e con la generazione di elettricità sfruttando direttamente sorgenti idriche, eoliche e solari. Il modo migliore per comprendere le conseguenze in termini di spazio della transizione che stiamo vivendo consiste verosimilmente nel presentare una serie di calcoli realistici relativi alla *densità di energia* delle diverse modalità di generazione elettrica, al fine di poter eseguire un raffronto significativo tra le svariate risorse e le diverse tecniche di conversione. Disporre di calcoli dettagliati ci permetterà di replicarli più agevolmente o di cambiare gli assunti ed esaminare (entro limiti realistici) i molti esiti alternativi possibili.

### Un po' d'ordine nelle definizioni

La definizione di densità di energia è semplice: è il concetto di la densità di potenza che può generare confusione. La *densità di energia* è semplicemente la quantità di energia per unità di peso (densità di energia gravimetrica) o per unità di volume (densità di energia volumetrica). Se l'energia viene espressa in joule (l'unità di misura scientificamente più corretta) o, meno correttamente, in calorie (e negli Stati Uniti – l'unico Stato moderno che si picca di continuare

*Vaclav Smil è Distinguished Professor nella Facoltà di Scienze Ambientali dell'Università del Manitoba a Winnipeg, Canada. È autore di oltre 30 volumi, tra i quali Prime Movers of Globalization: The History and Impact of Diesel Engines and Gas Turbines (MIT Press, 2010), Oil: Resources, Production, Uses, Impacts (2010) e Energy Myth and Realities: Bringing Science to the Energy Policy Debate (American Enterprise Institute 2010)*

Questo paper è stato pubblicato per la prima volta come serie in cinque parti sul blog <http://www.MasterResource.org>

ad usare le antiquate unità di misura non metriche – in BTU), il peso in grammi (e multipli) e il volume in centimetri cubici, litri (ossia, decimetri cubici) e metri cubi, la densità di energia viene misurata semplicemente in joule per grammo (J/g) o in joule per centimetro cubo (J/cm<sup>3</sup>). Più comunemente, si troverà una densità di energia espressa in megajoule per chilogrammo (MJ/kg) e in megajoule per litro (MJ/l), ovvero in gigajoule per tonnellata (GJ/t) e in gigajoule per metro cubo (GJ/m<sup>3</sup>).

Una rapida occhiata alla densità di energia dei combustibili più comuni è sufficiente per capire il motivo che ci fa preferire il carbone alla legna e il petrolio al carbone: la legna stagionata produce, nella migliore delle ipotesi, 17 MJ/kg, mentre il carbone bituminoso di buona qualità arriva a 22-25 MJ/kg e i prodotti petroliferi raffinati a circa 42 MJ/kg. Un raffronto della densità di energia volumetrica evidenzia per quale ragione il trasporto per via marittima di gas naturale non compresso e non liquefatto non può essere competitivo, mentre il trasporto di petrolio greggio è relativamente economico: il gas naturale raggiunge un valore di circa 35 MJ/m<sup>3</sup>, mentre per il petrolio tale valore è pari a circa 35 GJ/m<sup>3</sup>. La densità di energia volumetrica del petrolio, pertanto, è circa mille volte superiore (tre ordini di grandezza) a quella del gas naturale. Una ovvia conseguenza di questo fatto è che, a meno che non venga liquefatto (o quanto meno compresso), non ha senso trasportare da un continente all'altro il gas naturale, per quanto si tratti di una fonte di energia più pulita.

Si possono così iniziare a spiegare alcuni dei limiti e delle possibilità della vita quotidiana o del progresso storico semplicemente servendosi della densità di energia: le fonti di energia maggiormente concentrate offrono enormi vantaggi in termini di estrazione, facilità di trasporto, costi di trasporto e di stoccaggio e possibilità di conversione. Se vogliamo portare con noi il volume minimo di cibo per una scarpinata in montagna, preferiremo una barra di müsli (17 J/g) a una carota (1,7 J/g). Se vogliamo sorvolare l'Atlantico, non alimenteremo i nostri motori a reazione con l'idrogeno: è vero che questo gas ha la più alta densità di energia gravimetrica di ogni altro combustibile (143 MJ/kg), ma la sua densità volumetrica è pari ad appena 0,01 MJ/l, mentre quella del carburante per aviazione (kerosene) è di 33 MJ/l, un valore più elevato di 3300 volte.

La *densità di potenza* è una variabile più complicata. Per decenni tecnici e scienziati hanno fatto ricorso alla densità di potenza, che rappresenta una utile misura del rendimento di un determinato sistema. Purtroppo ciascuna disciplina ha definito questa grandezza in modo diverso. Un uso relativamente comune di questa misura viene fatto dai radiotecnici, che definiscono la densità di potenza delle antenne isotropiche come quoziente della potenza emessa e della superficie di una sfera situata ad una determinata distanza (W/m<sup>2</sup>). Il secondo esempio riguarda la densità di potenza gravimetrica o volumetrica dei convertitori di energia: quando valutiamo il rendimento di una batteria (ossia di un apparecchio di cui, di norma, si cerca di ridurre al minimo massa e volume) la densità di potenza esprime il rateo di emissione di energia per unità di peso o di volume della batteria stessa (misurata solitamente in W/dm<sup>3</sup> o in W/kg). Analogamente, nell'ingegneria nucleare per densità di potenza si intende il rateo di rilascio di energia per unità di volume del nucleo del reattore. Uno sguardo a internet offre una perfetta immagine di questo uso in campo ingegneristico: inserendo "densità di potenza" in un motore di ricerca, i primi risultati presentano calcolatori per antenne isotropiche (il primo esempio che ho menzionato), mentre una bozza di articolo su Wikipedia riguarda proprio la densità di potenza di motori termici espressa in kW/l (vale a dire, il secondo uso più comune come densità di potenza volumetrica dei convertitori di energia).

A confondere le acque, il sistema di misura internazionale definisce la grandezza W/m<sup>2</sup> come densità di flusso termico o irradianza. Quest'ultima indica evidentemente la

radiazione entrante (ossia l'energia elettromagnetica che incide su una superficie). Per conto suo, Piotr Leonidovich Kapitsa, uno dei più importanti fisici del Ventesimo secolo (Premio Nobel nel 1978), era solito avvalersi della grandezza  $W/m^2$  per la valutazione più fondamentale dei convertitori di energia, calcolando il flusso di energia attraverso la loro superficie. La prima applicazione di questa misura (il vettore Umov-Poynting, elaborato verso la fine del Diciannovesimo secolo) riguardava la propagazione delle onde elettromagnetiche, ma il medesimo principio vale per il flusso di energia che attraversa una turbina o i ratei di diffusione in una cella a combustibile. Recentemente la densità di potenza è stata utilizzata in questo senso allo scopo di calcolare il flusso attraverso l'area (verticale) spazzata da una turbina eolica (ne riparleremo nella sezione dedicata alla densità di potenza eolica).

Negli ultimi venticinque anni ho preferito utilizzare una misura diversa (e decisamente più ampia) della densità di potenza, che probabilmente rappresenta la misura più universale dei flussi di energia:  $W/m^2$ , dove  $m^2$  indica l'area orizzontale della superficie di terreno o d'acqua attraversata dal flusso, anziché l'unità di superficie operativa di un convertitore. Il maggiore vantaggio di questo parametro consiste probabilmente nel fatto che può essere utilizzato allo scopo di valutare e confrontare un'enorme varietà di flussi di energia, che possono andare dai flussi naturali e dai ratei di sfruttamento di qualsiasi fonte di energia (fossile o rinnovabile) a ogni forma di conversione di energia (combustione di fonti fossili o generazione di energia elettrica da fonti idriche o eoliche). Per questo motivo ho scelto la densità di potenza come la principale variabile analitica al fine di valutare tutti i più importanti flussi di energia di origine biologica o umana nella mia prima sintesi generale dell'energia (1991), che ho recentemente rivisto e ampliato nel mio *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems* (MIT Press, 2008).

Questa efficace e illuminante misura non è stata usata con la dovuta frequenza e, quando ciò è avvenuto, il suo impiego non è sempre stato quello più appropriato. Non c'è da stupirsi, in considerazione della scarsissima comprensione dei fondamenti dell'energia che prevale a tutt'oggi. Più di recente, tuttavia, alla densità di potenza espressa come flusso di energia per unità di superficie è stata prestata maggiore attenzione, grazie al crescente interesse nei confronti delle fonti di energia rinnovabili e nella loro conversione commerciale in combustibile ed elettricità. Immaneabilmente si riscontra che la densità di potenza di queste fonti e di questi flussi è considerevolmente inferiore alla densità di potenza degli usi di fonti fossili: questa differenza rappresenta un fattore essenziale al fine di determinare il potenziale contributo che le fonti di energia rinnovabili possono offrire alla richiesta mondiale futura di combustibili e di elettricità.

In questa breve introduzione illustrerò tale divario mettendo a confronto la densità di potenza di sei sistemi di generazione di energia elettrica, basandomi su assunti che corrispondono strettamente alle modalità correnti di funzionamento o utilizzando a mo' di esempio impianti di generazione effettivamente esistenti. Nelle pagine che seguono inizierò con il calcolo della gamma più comune di densità di potenza degli impianti di generazione elettrica alimentati a carbone e a legna (fonte rinnovabile), passando quindi alle densità di potenza degli impianti a turbina alimentati da gas naturale. Successivamente esaminerò la densità di potenza di quattro nuovi tipi di conversione di fonti rinnovabili: un impianto termoelettrico alimentato da legna appositamente coltivata, un impianto solare fotovoltaico, un impianto solare termodinamico (a concentrazione) e una grande centrale eolica.

## Parte II – La generazione elettrica da carbone e legna

### Generazione elettrica con centrali a carbone

I calcoli fondamentali relativi alla generazione di energia elettrica risentono del più importante metodo di generazione negli Stati Uniti del giorno d'oggi, vale a dire la combustione di carbone in moderne centrali termoelettriche. Nel 2009 questa fonte di energia è responsabile per quasi il 45 per cento dell'elettricità generata nel paese. Giacché non esiste una centrale a carbone "standard", calcolerò due densità alquanto realistiche, ma sostanzialmente diverse, a causa delle differenze di qualità del carbone, del rifornimento di combustibile e del funzionamento della centrale. La densità di potenza più elevata si può riscontrare in una centrale a carbone di grande potenza (nel mio esempio considero una capacità di generazione pari a 1 GWe) posta all'uscita della miniera (e quindi alimentata da nastri trasportatori ad elevata capacità o da brevi tragitti di autocarri, eliminando così la necessità di una struttura di immagazzinamento del carbone). La centrale del mio esempio brucia litantrace sub-bituminoso (densità di energia pari a 20 GJ/t, contenuti di polveri e di zolfo inferiore rispettivamente al 5 per cento e allo 0,5 per cento), situata in prossimità di un grande fiume (rendendo così possibile il ricorso al raffreddamento a cielo aperto ed eliminando l'esigenza di grandi torri di raffreddamento), operante ad un elevato fattore di carico (80 per cento) e con un'alta efficienza di conversione (38 per cento).

Una centrale di questo tipo potrebbe generare annualmente circa 7 TWh (pari a circa 25 PJ) di elettricità. Sulla base di una efficienza di conversione del 38 per cento, l'impianto necessiterebbe di circa 66 PJ di carbone (PJ = petajoule =  $10^{15}$  joule = 1.000.000 GJ).

$$\begin{aligned} 1 \text{ GW} \times 0,8 &= 800 \text{ MW} \\ 800 \text{ MW} \times 8.766 \text{ minerale} &= 7,0 \text{ TWh} \\ 7,0 \text{ TWh} \times 3.600 &= 25,2 \text{ PJ} \\ 25,2 \text{ PJ} / 0,38 &= 66,3 \text{ PJ} \end{aligned}$$

Sulla base dell'assunto che il carbone (ossia il litantrace sub-bituminoso, avente una densità di energia di 20 GJ/t e una densità specifica di 1,4 t/m<sup>3</sup>) venga prodotto da una grande miniera a cielo aperto su di un filone di spessore medio pari a 15 m con un tasso di estrazione pari al 95 per cento, si può calcolare che al di sotto di ciascun metro quadrato della superficie della miniera si trovino 20 t di carbone estraibile, contenenti 400 GJ di energia. Al fine di soddisfare il consumo di una centrale avente una capacità installata di 1 GWe, l'estrazione annuale di carbone dovrà rimuovere il combustibile da una superficie di poco più di 16,6 ettari (166.165 m<sup>3</sup>). Ciò significa che la quantità di carbone estratto necessario al funzionamento della centrale, con una densità di potenza pari a 4,8 kW/m<sup>2</sup>, è:

$$\begin{aligned} 15 \text{ m}^3 \times 0,95 \times 1,4 \text{ t} &= 19,95 \text{ t} \\ 19,95 \text{ t} \times 20 \text{ GJ/t} &= 399 \text{ GJ} \\ 66,3 \text{ PJ} / 399 \text{ GJ} &= 166.165 \text{ m}^2 \\ 800 \text{ MW} / 166.165 \text{ m}^2 &= 4.814,5 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

La centrale vera e propria dovrà occupare un'area sostanzialmente maggiore. Tuttavia, nel caso di una centrale termoelettrica situata all'uscita della miniera, priva di zone di

stoccaggio del carbone, facente ricorso a raffreddamento a cielo aperto e in grado di smaltire le polveri di combustione nell'area già scavata, l'infrastruttura completa della centrale (sala caldaie e turbogeneratori, decatramatori elettrostatici, impianti per la manutenzione, uffici, strade e parcheggi) potrebbe occupare una superficie di appena 600.000 m<sup>2</sup>. Ciò significa che l'area complessiva che non potrebbe essere destinata ad altri usi per via dell'estrazione di carbone e dell'infrastruttura permanente della centrale a carbone sarebbe grosso modo pari a 766.000 m<sup>2</sup> e la densità di potenza dell'intera impresa di estrazione-generazione sarebbe pari a circa 1.000 W/m<sup>2</sup>:

$$800 \text{ MW}/766.000 \text{ m}^2 = 1.044,4 \text{ W/m}^2$$

Nel caso di una centrale situata ad una certa distanza dalla miniera (che quindi avrebbe bisogno di un collegamento ferroviario o fluviale per il rifornimento di carbone) e da un grande fiume (con la necessità di torri di raffreddamento), alimentata da litantrace sub-bituminosa di qualità inferiore (18 GJ/t) estratta da un filone più sottile (10 m) e contenente quantità relativamente elevate di polveri (oltre il 10 per cento) e di zolfo (circa il 2 per cento), contraddistinta da un ridotto fattore di carico (70 per cento) e minore efficienza di conversione (33 per cento), la superficie complessiva necessaria sarebbe evidentemente alquanto maggiore. L'estrazione di carbone necessaria per l'alimentazione di una centrale siffatta avrebbe una densità di potenza di appena 2,5 kW/m<sup>2</sup>:

$$\begin{aligned} 1 \text{ GW} \times 0,70 &= 700 \text{ MW} \\ 700 \text{ MW} \times 8.766 \text{ ore} &= 6,14 \text{ TWh} \\ 6,14 \text{ TWh} \times 3.600 &= 22,09 \text{ PJ} \\ 22,09 \text{ PJ}/0,33 &= 66,94 \text{ PJ} \\ 10 \text{ m}^3 \times 0,95 \times 1,4 \text{ t} &= 13,3 \text{ t} \\ 13,3 \text{ t} \times 18 \text{ GJ/t} &= 239,4 \text{ GJ} \\ 66,94 \text{ PJ}/239,4 \text{ GJ} &= 279.615 \text{ m}^2 \\ 700 \text{ MW}/279.615 \text{ m}^2 &= 2.503,4 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Questo tipo di centrale occuperebbe un'area decisamente più elevata, ma la maggiore superficie non sarebbe dovuta alle strutture di scarico del carbone (da treni o chiatte) e al deposito di carbone necessario per l'immagazzinaggio di scorte sufficienti a svariate settimane di funzionamento. La gran parte dell'area aggiuntiva sarebbe destinata ai bacini di decantazione e allo smaltimento delle polveri, all'impianto di desolforazione dei gas di scarico e ai bacini di deposito della sospensione risultante. I dati relativi alla più grande centrale termoelettrica a carbone d'America, la Robert W. Scherer situata in Georgia, con una capacità installata di 3,5 GW, danno un'idea dei valori effettivi di queste strutture: un deposito di carbone di 36 ettari, un bacino di decantazione delle polveri di 120 ettari (progettato per coprire l'intera vita utile della centrale, pari a circa 50 anni) e una superficie complessiva per l'intero impianto pari a circa 1.400 ettari (tutti i dati sono desunti da Georgia Power). Considerando un fattore medio di carico del 75 per cento, tutto ciò si traduce in una densità di potenza vicina ai 190 W/m<sup>2</sup>. Includendo la parte relativa all'estrazione di carbone, l'intero sistema di estrazione-generazione avrebbe una densità di potenza complessiva pari a circa 175 W/m<sup>2</sup>. Al fine di disporre di un'utile gamma approssimativa di valori, possiamo concludere che, a seconda delle specifiche circostanze, la maggior parte delle moderne centrali termoelettriche

a carbone può generare elettricità con una densità di potenza variabile di un ordine di grandezza, da circa 100 W/m<sup>2</sup> a 1.000 W/m<sup>2</sup>.

Tenendo in considerazione questa scala base, possiamo procedere all'esame delle densità di potenza di una centrale termoelettrica con grandi turbine a gas alimentate a gas naturale e, successivamente, le quattro principali modalità di generazione elettrica da fonti di energia rinnovabili.

### Generazione elettrica con combustione di legna

La fotosintesi è una modalità intrinsecamente inefficiente di realizzare la conversione dell'energia elettromagnetica contenuta nelle lunghezze d'onda visibili della radiazione solare in energia chimica contenuta nella massa della pianta. La media complessiva di questa conversione è pari ad appena lo 0,3 per cento e anche gli ecosistemi naturali più produttivi non raggiungono un'efficienza superiore al 2 per cento. Nel caso di alberi coltivati appositamente come fonte di energia, il tasso di conversione più elevato si può ottenere per mezzo di monoculture a coltivazione intensiva. A seconda della latitudine e del clima, tali piantagioni possono essere composte di diverse specie di salice, pino, pioppo, eucalipto o leucaena. La combustione della segatura e dei trucioli in grosse caldaie allo scopo di generare vapore e/o elettricità è una pratica ormai affermata e discretamente efficiente: in effetti la densità di energia del legname stagionato (18-21 GJ/t) è abbastanza vicina a quella del litantrace sub-bituminoso.

Se, tuttavia, volessimo produrre una frazione significativa dell'elettricità di un paese avvalendoci della fitomassa tratta da alberi dovremmo creare vaste piantagioni, che necessiterebbero di fertilizzanti, controllo delle piante infestanti e dei parassiti ed eventualmente irrigazione. Anche così non potremmo attenderci un raccolto superiore alle 20 t/ha, anzi: nelle zone meno favorevoli alle colture potremmo ottenere appena 5-6 t/ha, mentre la resa più comune sarebbe di circa 10 t/ha. Abbattendo l'intera fitomassa presente in superficie e alimentando con il legname così ottenuto macchine tritratrici potremmo realizzare una resa del 95 per cento della produzione complessiva della piantagione. Ciò nondimeno, quand'anche la densità di energia media del combustibile fosse pari a 19 GJ/t, la piantagione non potrebbe produrre più di 190 GJ/ha, equivalente ad una densità di potenza del raccolto pari a 0,6 W/m<sup>2</sup>:

$$\begin{aligned} 10 \text{ t/ha} \times 19 \text{ GJ} &= 190 \text{ GJ/ha} \\ 190 \text{ GJ}/31,5 \text{ Ms} &= 6.032 \text{ W} \\ 6.032 \text{ W}/10,000 \text{ m}^2 &= 0,6 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Una centrale alimentata a legna avente una capacità installata di 1 GW, un fattore di carico del 70 per cento e un'efficienza di conversione del 35 per cento richiederebbe annualmente la produzione di 330.000 ettari di colture arboree, ossia di una superficie equivalente ad un quadrato di 58 km di lato:

$$\begin{aligned} 1 \text{ GW} \times 0,7 &= 700 \text{ MW} \\ 700 \text{ MW}/0,35 &= 2 \text{ GW} \\ 2 \text{ GW}/0,6 \text{ W/m}^2 &= 3,33 \text{ Gm}^2 \text{ (333.333 ha)} \\ \sqrt{3,33 \text{ Gm}^2} &= 57.735 \text{ m} \end{aligned}$$

L'area complessiva necessaria ad una centrale elettrica alimentata a legna è trascurabile se paragonata all'enorme superficie di terreno da destinare alla produzione di fitomassa. Anche immaginando che la centrale vera e propria e le relative strutture possano occupare un'area di 3.000 ettari, il terreno necessario complessivo aumenterebbe appena dello 0,1 per cento.

La ridotta densità di potenza di questa modalità di generazione di energia elettrica impedisce che essa possa fornire più di una frazione minima della fornitura complessiva di energia. Se anche solo il 10 per cento di tutta l'elettricità generata negli Stati Uniti nel 2009 (pari a 395 TWh, ossia 1.42 EJ) dovesse provenire da centrali a legna, sarebbero necessari (considerando un'efficienza di conversione media del 35 per cento) circa 4 EJ (pari a quasi 129 GW) di trucioli di legno. Se assumiamo una densità di potenza media pari a 0,6 W/m<sup>2</sup>, questo scenario renderebbe necessari circa 216 Gm<sup>2</sup> di terreno destinato a colture arboree, pari a 215.000 km<sup>2</sup>, ossia di un'area equivalente a quella dell'Idaho o dello Utah. Per usare un termine di riferimento europeo, ciò equivale a una superficie di poco superiore a quella della Gran Bretagna (229.885 km<sup>2</sup>, Irlanda esclusa) o della Romania (237.500 km<sup>2</sup>. NdT).

Questo semplice calcolo evidenzia anche perché un consistente, realistico aumento del raccolto di fitomassa immaginabile in futuro (grazie a migliori ibridi o a varietà transgeniche interamente nuove) non farebbe alcuna sostanziale differenza, a causa del basso valore della densità di potenza della fitomassa. Anche un miglioramento del 25 per cento, l'alimentazione di una centrale di capacità pari a 1 GWe richiederebbe ugualmente una superficie destinata a coltura di almeno 250.000 ettari. Nell'ipotesi (al momento del tutto irrealistica) di raddoppiare le medie di rendimento odierne, la medesima centrale esigerebbe un raccolto annuale della fitomassa coltivata in un quadrato di 40 km di lato.

### Parte III – Generazione elettrica con combustione di gas naturale

Le caldaie delle centrali termoelettriche a carbone possono essere convertite alla combustione di idrocarburi liquidi o gassosi (olio combustibile o addirittura petrolio greggio, nonché gas naturale). Negli anni Sessanta e all'inizio degli anni Settanta questo genere di conversione era abbastanza comune. Dal punto di vista ambientale, il ricorso al gas naturale presenta evidenti vantaggi rispetto al carbone (in quanto le emissioni di anidride solforosa sono inferiori o addirittura nulle, così come sono nulle le emissioni di polveri di combustione), ma l'efficienza di conversione generale del complesso costituito da turbogeneratore e caldaia cambia di poco. Viceversa le turbine a gas, specialmente se collegate a turbine a vapore, rappresentano la modalità di generazione di energia elettrica maggiormente efficiente. Ciò permette di ottenere densità di potenza decisamente superiori a quelle realizzabili in una centrale a carbone. La densità complessiva del processo di estrazione del combustibile e di generazione dell'elettricità, inoltre, è alta anche grazie alla densità di potenza relativamente elevata della produzione di gas naturale (a seconda del campo di estrazione questo valore può variare di più di un ordine di grandezza, con un minimo che si aggira intorno ai 50 W/m<sup>2</sup> e un massimo che può andare ben oltre 1 kW/m<sup>2</sup>). A maggior ragione, la densità è elevata anche per il motivo che aumentare la percentuale di elettricità generata da gas naturale spesso non richiede l'ampliamento delle infrastrutture, in quanto può assorbire la produzione dei campi e dei gasdotti già esistenti.

Le turbine a gas sono state commercializzate originariamente a fini di generazione di elettricità dalla Brown Boveri in Svizzera negli anni Trenta, ma negli Stati Uniti si diffusero solo verso la fine degli anni Sessanta, dietro lo stimolo del grande *black out* del

novembre 1965, che lasciò 30 milioni di abitanti del nord-est del paese senza elettricità per 13 ore. La capacità complessiva delle turbine a gas installate negli Stati Uniti passò da appena 240 MW nel 1960 a quasi 45 GW nel 1975: un aumento di quasi 200 volte nel volgere di appena quindici anni. La crescita venne interrotta dall'aumento del prezzo degli idrocarburi (oltre da una domanda di elettricità stangante), per riprendere sul finire degli anni Ottanta. Nel 1990 quasi metà degli ordini di nuove centrali (per un ammontare di 15 GW di nuova capacità complessiva) da parte di utility statunitensi era stato coperto da turbine a gas. Nel 2008 il 40 per cento circa della capacità di generazione estiva degli Stati Uniti (397,4 GW) era installato in centrali a gas, utilizzando turbine a gas a ciclo semplice o a ciclo combinato (CCGT). A differenza di una normale turbina a gas, che scarica nell'atmosfera i gas caldi di combustione, le turbine a ciclo combinato utilizzano i gas di scarico per generare vapore che viene indirizzato a sua volta verso una turbina di generazione, aumentando così l'efficienza complessiva. Mentre le turbine a gas a ciclo semplice possono convertire in energia elettrica, nella migliore delle ipotesi, circa il 42 per cento del combustibile, per una turbina a ciclo combinato questo valore può raggiungere il 60 per cento. Le turbine a gas a ciclo combinato sono oggi il metodo più efficiente di generazione elettrica.

Il vantaggio più evidente delle turbine a gas rispetto agli impianti a carbone consiste nella ridotta impronta, nella rapidità della risposta (possono raggiungere il massimo della potenza in pochi minuti, il che le rende la soluzione ideale per i periodi di picco del carico di generazione), nella flessibilità di scelta del combustibile (possono bruciare combustibili gassosi e liquidi), nell'elevata affidabilità e nella vasta gamma di capacità, che può andare da meno di 1 MW ad oltre 500 MW per le CCGT (attualmente la Siemens dispone di una turbina da 340 MW in grado di raggiungere i 530 MW in ciclo combinato, mentre la MS9001H della General Electric raggiunge quasi i 480 MW) e, infine, nella facilità e praticità di manutenzione.

Le turbine a gas, inoltre, possono essere installate in tempi brevi: il MOBILEPAC da 25 MW della Pratt & Whitney (appartenente ad una diffusa classe di impianti di derivazione aeronautica, consistenti essenzialmente in motori a reazione installati a terra), trasportato su due rimorchi, può essere approntato in 8 ore.

#### FIGURA 1

**La Pratt & Whitney MOBILEPAC da 25 MWe (basata su un motore a reazione da impiego aeronautico FT8) montata su semirimorchio. Si tratta del generatore elettrico da più megawatt più compatto sul mercato e può essere installato quasi istantaneamente.**





FIGURA 2

**La turbina a gas Pratt & Whitney SwiftPac da 60 MW è contraddistinta da un'impronta sul terreno estremamente ridotta. In primo piano a destra il semirimorchio di controllo. L'estintore sulla parete a sinistra indica la scala del complesso.**



Una turbina a gas da 25 MW può occupare appena 140 m<sup>2</sup>. Completa di furgone di controllo, strade d'accesso, collegamento ad una fonte di combustibile e di elettricità e perimetro di rispetto, può comunque essere adattato ad un rettangolo di 40x50 m di lato. La SwiftPac da 60 MW, sempre della Pratt & Whitney, completa di edificio di controllo e installata su fondamenta in cemento abbisogna di meno di 700 m<sup>2</sup> e può essere resa operativa in circa 21 giorni.

Le ridotte dimensioni delle più potenti turbine a gas fanno sì che sia possibile installare facilmente più unità in una centrale elettrica già esistente. Adottando le turbine a gas come metodo primario per l'aumento della capacità di generazione, le utilities di Europa e Nord America hanno eliminato il bisogno di superare ardui procedimenti di domanda e approvazione di nuove centrali da parte delle autorità. La centrale Didcot-B, nell'Oxfordshire, rappresenta un eccellente esempio di questa opzione: questo impianto a turbine a gas della potenza di 1,360 GWe è stato costruito tra il 1994 e il 1997 entro il perimetro della precedente (e più estesa) centrale Didcot-A, un impianto a carbone da 2 GWe completato nel 1968. La costruzione di questa grande centrale termoelettrica a carbone aveva sollevato una notevole resistenza da parte degli abitanti del luogo, ma la nuova centrale a gas, con una potenza superiore ai due terzi della precedente, ha potuto essere ospitata senza problemi nell'area occupata dalla centrale originaria, richiedendo meno del 10 per cento della superficie dell'impianto precedente. In alternativa una turbina a gas può essere installata in spazi liberi di un'area urbana.

Nessun altro metodo di generazione elettrica su grande scala occupa spazi altrettanto ridotti delle turbine a gas. Queste ultime, inoltre, presentano un ulteriore vantaggio oltre alla compattezza: non richiedono lo smaltimento delle polveri di combustione, né la desolfurazione dei gas di scarico. Con un fattore di carico mediamente pari al 40 per cento (media recente negli Stati Uniti), le turbine a gas mobili possono generare energia con una densità di potenza maggiore di 15 kW/m<sup>2</sup>, mentre i grandi impianti stazionari (> 100 MW) possono raggiungere agevolmente i 4-5 kW/m<sup>2</sup>.

FIGURA 3

L'impianto di generazione elettrica a turbine a gas Didcot-B da 1,360-MWe, nell'Oxfordshire (gli alberi e le automobili danno un'idea delle dimensioni).



FIGURA 4

Centrale elettrica Didcot: Didcot-A a carbone (locali di generazione e una ciminiera al centro a destra, deposito di carbone e tre torri di raffreddamento in basso). Didcot-B a gas naturale, illustrata in dettaglio nell'immagine precedente, è visibile immediatamente al di sotto delle tre torri.



## Parte IV – Generazione elettrica con nuove fonti rinnovabili

### Generazione fotovoltaica

Le misure dei satelliti permettono di determinare una costante solare pari a  $1.366 \text{ W/m}^2$ . Per costante solare si intende la radiazione che incide su di un'area perpendicolare alla direzione dei raggi solari al limite estremo dell'atmosfera (che, a dire il vero, non è un valore costante, ma varia in dipendenza della stagione ed è contraddistinta da trascurabili variazioni su base quotidiana). Se la Terra non fosse avvolta dall'atmosfera e assorbisse tutta la radiazione solare incidente, il flusso medio sulla superficie del pianeta sarebbe pari a  $341,5 \text{ W/m}^2$  (un quarto del valore della costante solare, giacché una sfera ha un'area quadrupla rispetto ad un cerchio avente il medesimo raggio:  $4\pi r^2/\pi r^2$ ). L'atmosfera, tuttavia, assorbe circa il 20 per cento della radiazione incidente, mentre l'albedo terrestre (vale a dire la frazione di radiazione riflessa nello spazio) è pari al 30 per cento. Di conseguenza, solo il 50 per cento del flusso complessivo raggiunge la superficie del pianeta, con un valore prorata di circa  $170 \text{ W/m}^2$  in superficie, che può variare da meno di  $100 \text{ W/m}^2$  alle latitudini settentrionali, contraddistinte da una maggiore nuvolosità, ad oltre  $230 \text{ W/m}^2$  nelle località desertiche più soleggiate.

Per un calcolo approssimativo dell'elettricità che potrebbe essere generata su grande scala per mezzo della conversione fotovoltaica, è sufficiente moltiplicare il valore prorata del flusso visto poc'anzi per l'efficienza media di una cella fotovoltaica modulare. Per quanto le migliori celle di ricerca possano raggiungere un'efficienza superiore al 30 per cento (nel caso di concentratori multi-giunzione) o del 15 per cento (per moduli fotovoltaici in silicio cristallino o a "film sottile"), l'efficienza effettiva delle celle recentemente utilizzate sul campo in grandi parchi fotovoltaici per uso commerciale è pari a circa il 10 per cento, che scende al 6-7 per cento per il silicio amorfo e a meno del 4 per cento per il film sottile. Un assunto realistico, stabilendo un'efficienza del 10 per cento, ci permette di ottenere il valore di  $17 \text{ W/m}^2$  come prima stima della densità di potenza media complessiva per la generazione fotovoltaica, tenendo conto del fatto che tale valore potrà essere pari ad appena  $10 \text{ W/m}^2$  nelle zone più nuvolose delle coste atlantiche dell'Europa e aggirarsi intorno ai  $20\text{-}25 \text{ W/m}^2$  nei deserti sub-tropicali.

I pannelli fotovoltaici sono rivolti verso sud e inclinati di un angolo ottimale rispetto alla verticale e, di conseguenza, ricevono più radiazione rispetto ad una superficie orizzontale. Ciò nonostante la densità di potenza media di un parco fotovoltaico è bassa. È infatti necessario considerare il terreno aggiuntivo necessario per distanziare i pannelli e renderne possibile la manutenzione, per le strade d'accesso, per gli invertitori e i trasformatori di corrente e per le strutture di servizio. Solo l'85 per cento circa della corrente continua nominale di un pannello verrà trasmessa alla rete elettrica a corrente alternata. Il più grande parco fotovoltaico del mondo, situato a Olmedilla de Alarcón, in Spagna, ha una capacità installata pari a 60 MW di potenza di picco (MWp), ma la sua generazione annuale di 85 GWh (ossia 9,7 MW di elettricità come tasso medio annuale) si traduce in un fattore di carico di appena il 16 per cento. La centrale portoghese di Moura (dati rispettivamente pari a 46 MWp, 88 GWh e 10 MW di generazione media annuale) ha un fattore di carico di quasi il 22 per cento, mentre il corrispettivo per il maggiore parco solare tedesco (Waldpolenz, tarato a 40 MWp) è solo dell'11 per cento. La densità di potenza di Olmedilla è appena  $9 \text{ W/m}^2$ , quella di Moura quasi  $8 \text{ W/m}^2$ , mentre Waldpolenz riesce appena a superare i  $4 \text{ W/m}^2$ .

$$\text{Olmedilla } 85 \text{ GWh/year} = 9.7 \text{ MW } 9.7 \text{ MW}/108 \text{ ha} = 9 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Moura } 88 \text{ GWh/year} = 10 \text{ MW } 10 \text{ MW}/130 \text{ ha} = 7.7 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Waldpolenz } 40 \text{ GWh/year} = 4.56 \text{ MW } 4.56 \text{ MW}/110 \text{ ha} = 4.1 \text{ W/m}^2$$

I più estesi parchi fotovoltaici riescono quindi a generare elettricità con una densità di potenza grosso modo tra le 5 e le 15 volte superiore a quella di una centrale alimentata a legna, ma questo valore è, nella migliore delle ipotesi, pari ad appena un decimo (e nella peggiore, ad un centesimo) della densità di potenza raggiungibile da una centrale termoelettrica a carbone. Anche in questo caso, se soltanto il 10 per cento di tutta l'elettricità generata negli Stati Uniti nel 2009 (395 TWh, pari a circa 45 GW) dovesse essere prodotta da grandi parchi fotovoltaici, l'area necessaria (anche assumendo una densità di potenza media di  $8 \text{ W/m}^2$ ) sarebbe di circa  $5.600 \text{ km}^2$ . Nel breve periodo non si prevedono sostanziali miglioramenti nell'efficienza di conversione delle celle fotovoltaiche installate in grande scala in grandi parchi solari destinati ad uso commerciale, né nei fattori medi di carico. Tuttavia, quand'anche l'efficienza aumentasse addirittura del 50 per cento in un decennio, la densità di potenza media di un parco solare commerciale situato in una posizione ottimale non supererebbe ugualmente i  $15 \text{ W/m}^2$ .

#### FIGURA 5

**La centrale PV di Olmedilla, con 162.000 pannelli e una potenza di 60 MWp genera elettricità con una densità media di potenza inferiore ai  $9 \text{ W/m}^2$  (calcolati sulla superficie complessiva).**



#### Generazione elettrica solare termodinamica

Gli impianti solari termodinamici utilizzano specchi parabolici orientabili allo scopo di riflettere e concentrare la radiazione solare su di un ricevitore centrale situato su una torre. Questo sistema presenta svariati vantaggi rispetto ai sistemi fotovoltaici, tra i quali, in particolare: efficienza di conversione più elevata (grazie al ricorso alla generazione di elettricità per mezzo del vapore) e la possibilità di integrare il vapore ottenuto dal riscaldamento solare con altri combustibili. Ciò nonostante la densità di potenza dei sistemi termodinamici non è poi molto diversa da quella degli impianti fotovoltaici.

La prima torre solare commerciale europea, la PS 10 (Planta Solar 10), realizzata da Abengoa Solar a Sanlúcar la Mayor nel 2007, ha una capacità installata di 110 MWp. Con una generazione annuale di 24,3 GWh (87,5 TJ), ossia 2,77 MW, il suo fattore di carico è

pari al 25 per cento. I suoi eliostati occupano  $74.880 \text{ m}^2$  ( $624 \times 120 \text{ m}$ ) e l'intera centrale richiede una superficie di circa 65 ettari. La densità di potenza della struttura è quindi pari a  $37 \text{ W/m}^2$ , tenendo conto della sola area occupata dagli eliostati, e poco più di  $4 \text{ W/m}^2$  se si prende in considerazione l'intera area della centrale. La centrale PS20 (completata nel 2009) ha una potenza quasi doppia (20 MWp; 48,6 GWh o 175 TJ all'anno ad una potenza media di 5,55 MW e un fattore di capacità di quasi il 28 per cento). I suoi specchi occupano un'area di  $150.600 \text{ m}^2$  e quindi la densità di potenza degli eliostati della centrale, pari a  $36,85 \text{ W/m}^2$ , è identica a quella della PS10. Tuttavia la centrale occupa un'area complessiva di circa 90 ettari e, di conseguenza, la sua densità di potenza complessiva è più alta, raggiungendo i  $6 \text{ W/m}^2$ .

FIGURA 6

**I due grandi impianti CSP della centrale di Abengoa, nei pressi di Sanlúcar la Mayor (Sevilla), PS10 in attività e PS20, in primo piano, ancora in costruzione.**



La centrale lanpah CSP che Bright Source Energy ha proposto di costruire a San Bernardino (California) dovrebbe essere tarata a 1,3 GWp e si prevede che possa generare 1,08 TWh (3,88 PJ) all'anno, producendo in media 123,3 MW con un fattore di capacità pari ad appena il 9,5 per cento. L'area coperta dagli eliostati dovrebbe raggiungere i 229,6 ettari, mentre l'intera centrale coprirebbe 1.645 ettari. Questi valori comportano una densità di potenza di  $53,75 \text{ W/m}^2$  per gli eliostati e di  $7,5 \text{ W/m}^2$  per l'intera struttura. Anche in questo caso non si prevedono sostanziali miglioramenti di questi valori, almeno non nel breve periodo e, quindi, si può tranquillamente concludere che una centrale solare termodinamica situata in posizione ideale possa funzionare a densità di potenza di circa  $35\text{-}55 \text{ W/m}^2$  per quanto riguarda l'esteso campo di eliostati e di non più di  $10 \text{ W/m}^2$  se si tiene in considerazione l'intera superficie della struttura.

### Generazione elettrica eolica

Le turbine eoliche sono contraddistinte da una densità di potenza relativamente elevata, quando questo rapporto misura l'energia cinetica del vento che attraversa la superficie di lavoro (vale a dire l'area spazzata dalle pale) di questo convertitore di energia, ormai alquanto diffuso. Nelle regioni interne degli Stati Uniti, particolarmente ventose, questo valore spera comunemente i  $400 \text{ W/m}^2$ . Tuttavia la densità di potenza, espressa in ragione dell'elettricità generata per metro quadrato dell'area occupata da una

grande centrale eolica non è che una piccola frazione di questo valore. Ciò è dovuto principalmente alla distanza, necessariamente abbondante, che deve separare le diverse turbine (che varia da non meno di cinque a ben dieci diametri del rotore) al fine di ridurre al minimo l'interferenza dovuta alla scia di ciascuna di esse. Di conseguenza, una centrale eolica realizzata con grandi turbine Vestas da 3 MW, aventi un rotore di diametro pari a 112 m e distanziate di sei diametri l'una dall'altra avrà una densità di potenza di picco di  $6,6 \text{ W/m}^2$ . Anche considerando un fattore di capacità medio relativamente elevato, diciamo intorno al 30 per cento, tale valore si riduce pur sempre a circa  $2 \text{ W/m}^2$ .

La densità di potenza effettiva varia con la velocità media del vento e le dimensioni delle turbine. Altamont, una delle prime grandi centrali eoliche degli Stati Uniti, situata in California, raggiunge appena gli  $0,6 \text{ W/m}^2$ . La centrale Wild Horse della Puget Sound Energy (pur contraddistinta da un elevato fattore di capacità, pari al 32 per cento), ha una densità di potenza di  $2 \text{ W/m}^2$ . La più grande centrale eolica offshore del mondo, la London Array situata nell'estuario del Tamigi (avente, secondo il progetto, una capacità di 1 Gwp, una generazione annuale di 31 TWh, pari a 354 MW e un'area di  $245 \text{ km}^2$ ) raggiungerà una densità di potenza di appena  $1,44 \text{ W/m}^2$ . Una buona approssimazione delle densità di potenza attese per la generazione eolica su grande scala (che prenda in considerazione la media sull'arco dell'anno, e non la potenza di picco) dovrebbe quindi risultare non superiore ai  $2 \text{ W/m}^2$ . Se il 10 per cento di tutta l'elettricità generata negli Stati Uniti nel 2009 (pari a 395 TWh, ovvero 45 GW) dovesse essere prodotta per mezzo di grandi centrali eoliche, l'area necessaria risulterebbe pari almeno a  $22.500 \text{ km}^2$ , equivalente grosso modo alla superficie del New Hampshire (ovvero, per l'Italia, alla superficie dell'Emilia Romagna).

**FIGURA 7**

**Distanza tra turbine eoliche e strade d'accesso nella centrale di Altamont Pass, California.**



## Parte V – Un confronto tra le densità di potenza dei metodi di generazione elettrica

In America, il metodo predominante per la generazione di energia elettrica consiste nella combustione di carbone bituminoso e sub-bituminoso in grandi centrali termoelettriche. Questi impianti sono dotati di caldaie e di turbogeneratori a vapore, nonché di decatramatori elettrostatici per la cattura delle polveri di combustione, ma bruciano diverse qualità di carbone, proveniente da miniere a cielo aperto o sotterranee, hanno svariati sistemi di raffreddamento (a cielo aperto, utilizzando l'acqua di fiume, o tipi diversi di torri di raffreddamento) e molti di essi sono equipaggiati con impianti di desolfurazione dei gas di scarico al fine di ridurre le emissioni di anidride solforosa (SO<sub>2</sub>). Di conseguenza, la gamma di densità di potenza che contraddistingue questo sistema di conversione di energia chimica in elettricità è estremamente ampia. Per le centrali vere e proprie il valore supera di norma i 2 kW/m<sup>2</sup> e può raggiungere i 5 kW/m<sup>2</sup>. Se si tiene conto di tutti gli altri requisiti (estrazione e stoccaggio del carbone, controllo ambientale, bacini di decantazione), inevitabilmente il valore della densità di potenza si riduce, potendo variare di un ordine di grandezza: si va infatti da 100 W/m<sup>2</sup> a circa 1.000 W/m<sup>2</sup> (1 kW/m<sup>2</sup>).

A differenza delle centrali a carbone, le centrali equipaggiate con turbine a gas compatte (le più piccole installate su rimorchi stradali, le più grandi in elementi prefabbricati che possono essere edificati in breve tempo) collegabili alle forniture di gas naturale già esistenti possono generare elettricità con densità di potenza pari anche a 15 kW/m<sup>2</sup>. Le centrali più grandi (di potenza superiore ai 100 MW), che si avvalgono della maggiore efficienza dei sistemi a ciclo combinato (in cui i gas di scarico vengono utilizzati per generare vapore che va a sua volta ad azionare una turbina di potenza) operano a densità di potenza inferiori e, qualora sia necessario realizzare ex novo le strutture di estrazione del gas naturale, la densità di potenza complessiva di questo sistema di generazione elettrica scende fino a raggiungere i valori tipici delle centrali a carbone (o poco superiore) che, nella maggior parte dei casi, si aggira tra i 200 e i 2.000 W/m<sup>2</sup>.

La fotosintesi è un processo di conversione dell'energia intrinsecamente inefficiente e la produzione di biomassa richiede enormi spazi. Anche ricorrendo a colture arboree a crescita rapida e a coltivazione intensiva, una centrale di generazione elettrica alimentata a legna non potrebbe avere una densità di potenza superiore agli 0,6 W/m<sup>2</sup>, valore che, per la maggior parte degli utilizzatori, risulterebbe di fatto inferiore agli 0,5 W/m<sup>2</sup>. Le necessità di spazio per queste strutture, quindi, sarebbe superiore di uno o due ordini di grandezza (vale a dire, dalle 10 alle 100 volte superiori) a quella degli impianti termoelettrici alimentati a carbone o a gas naturale.

Una centrale solare fotovoltaica può generare elettricità a densità di potenza molto più elevata di quella di una centrale alimentata a legna: la conversione dell'energia solare in nuova biomassa ha un'efficienza complessiva non superiore all'1 per cento, mentre una cella fotovoltaica, per quanto sia anch'essa relativamente inefficiente, può raggiungere un valore del 5 per cento e i migliori impianti oggi disponibili possono toccare il 10 per cento. Se si prende in considerazione solo la cella fotovoltaica vera e propria, ciò si traduce in una densità di potenza variabile di norma tra i 10 e i 20 W/m<sup>2</sup>. Tuttavia, se si tiene conto di tutto lo spazio destinato alle strutture ancillari, il ventaglio tipico della densità di potenza scende a 4-9 W/m<sup>2</sup>, ossia a un valore che rimane pur sempre superiore di un ordine di grandezza alle centrali a legna, ma che richiede spazi che vanno da uno a tre ordini di grandezza (dalle 10 alle 1.000 volte) superiori rispetto ai consueti metodi di generazione elettrica per mezzo di combustibili fossili.

La densità di potenza delle centrali solari termodinamiche è leggermente superiore,

potendo raggiungere i  $45-55 \text{ W/m}^2$  (se si considera soltanto la superficie occupata dagli eliostati), ma la densità di potenza complessiva, ottenuta tenendo conto della distanza tra singoli eliostati, strade d'accesso e struttura della torre) si aggira intorno ai  $10 \text{ W/m}^2$ . Per finire, la generazione elettrica per mezzo di pale eoliche raggiunge una densità di potenza paragonabile (o leggermente superiore) a quella di una centrale a legna. Per la maggior parte delle nuove installazioni, che utilizzano potenti turbine da 1-6 MW, la densità di potenza si aggira intorno agli  $0,5-1,5 \text{ W/m}^2$ .

TABELLA 1

Fonte di Energia	Densità di potenza ( $\text{W/m}^2$ )	
	Minimo	Massimo
Gas Naturale	200	2000
carbone	100	1000
Solare (Fotovoltaico=PV)	4	9
Solare (Termodinamico=CSP)	4	10
Vento	0.5	1.5
Biomassa	0.5	0.6

Le conseguenze di tali differenze sono molteplici: modificare l'infrastruttura (determinata dalla densità di potenza) dei sistemi creati nell'arco di più di un secolo per la generazione di elettricità a partire da combustibili fossili non sarà facile. Una civiltà basata sui combustibili fossili ha garantito la fornitura della sua forma più flessibile di energia "scalando le marce", ossia generando elettricità a densità di potenza più elevate di 1-3 ordini di grandezza rispetto alle densità di potenza con le quali l'elettricità viene utilizzata in case, officine e città. Se dovessimo basarci interamente su fonti di energia rinnovabile ricorrendo agli stessi sistemi urbani e industriali di oggi, nella migliore delle ipotesi potremmo produrre energia con la medesima densità di potenza con la quale essa verrebbe utilizzata. Nella maggior parte dei casi, tuttavia, dovremmo riuscire a concentrare i flussi diffusi di radiazione solare, vento e biomassa al fine di colmare un divario di densità di potenza di 2-3 ordini di grandezza.

Questa nuova infrastruttura destinata all'energia avrebbe maggiori esigenze di spazio e impedirebbe altre forme di uso dei terreni destinati a celle fotovoltaiche, turbine eoliche o colture arboree specializzate. La maggior parte dei terreni occupati da pale eoliche potrebbe essere destinata contemporaneamente a colture agricole o a pascolo, ma altri tipi di uso sarebbero impossibili. Inoltre le grandi aree coperte da pale eoliche richiederebbero la costruzione e manutenzione di strade d'accesso, nonché la creazione di "zone cuscinetto" inabitabili. Inoltre, in tutti i casi di conversione di energia da fonti rinnovabili sarebbero necessari ulteriori terreni per ospitare le vaste reti di trasmissione destinate a esportare l'elettricità dalle regioni più soleggiate o ventose (o dalle zone adatte alla coltivazione su grande scala di idonee colture arboree) verso i principali centri urbani e industriali.

La conclusione è che queste nuove infrastrutture energetiche dovrebbero coprire aree dalle dieci alle mille volte più vaste delle infrastrutture oggi destinate all'estrazione e alla combustione di combustibili fossili per la generazione di elettricità. Non è certo un'impresa impossibile, ma si tratterebbe di una svolta che presenterebbe enormi ostacoli di natura normativa (valutazione di impatto ambientale delle aree interessate, diritto di passo per le reti di trasmissione e tutti gli inevitabili ricorsi legali che ciò causerebbe), tecnica e logistica.

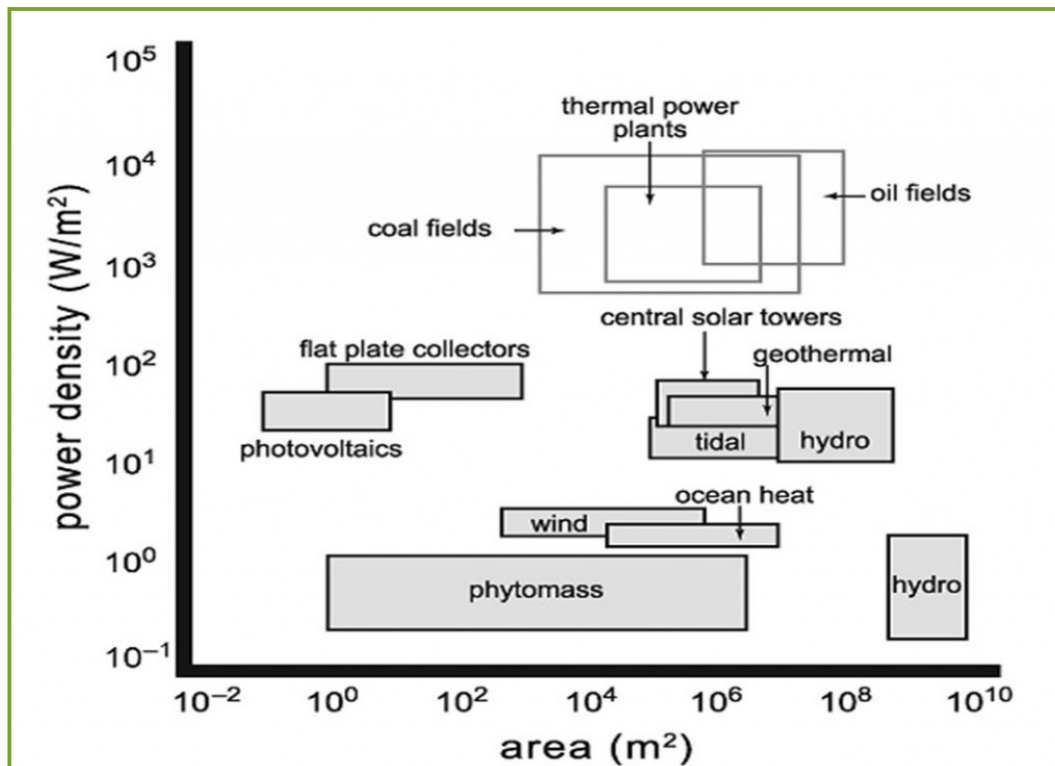
Fare un maggiore ricorso a fonti rinnovabili di energia può essere auspicabile



(principalmente per la percezione di benefici di ordine ambientale e strategico) e il progresso tecnologico renderà questa possibilità sempre più attraente sotto il profilo economico, ma la densità di potenza intrinsecamente ridotta di questi metodi di conversione di energia richiederà un nuovo sistema di fornitura di combustibile e di elettricità in grado di sostituire i metodi oggi prevalenti solo dopo decenni di sviluppo.

FIGURA 8

**Densità di potenza dell'estrazione di combustibili fossili, della generazione termoelettrica e di metodi rinnovabili di produzione di elettricità.**



Tratto da Vaclav Smil *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects* (Praeger: 2010).

### *CHI SIAMO*

L'Istituto Bruno Leoni (IBL), intitolato al grande giurista e filosofo torinese, nasce con l'ambizione di stimolare il dibattito pubblico, in Italia, promuovendo in modo puntuale e rigoroso un punto di vista autenticamente liberale. L'IBL intende studiare, promuovere e diffondere gli ideali del mercato, della proprietà privata, e della libertà di scambio. Attraverso la pubblicazione di libri (sia di taglio accademico, sia divulgativi), l'organizzazione di convegni, la diffusione di articoli sulla stampa nazionale e internazionale, l'elaborazione di brevi studi e briefing papers, l'IBL mira ad orientare il processo decisionale, ad informare al meglio la pubblica opinione, a crescere una nuova generazione di intellettuali e studiosi sensibili alle ragioni della libertà.

### *COSA VOGLIAMO*

La nostra filosofia è conosciuta sotto molte etichette: "liberale", "liberista", "individualista", "libertaria". I nomi non contano. Ciò che importa è che a orientare la nostra azione è la fedeltà a quello che Lord Acton ha definito "il fine politico supremo": la libertà individuale. In un'epoca nella quale i nemici della libertà sembrano acquistare nuovo vigore, l'IBL vuole promuovere le ragioni della libertà attraverso studi e ricerche puntuali e rigorosi, ma al contempo scevri da ogni tecnicismo.