



ENEA

AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

Ricerca
e innovazione
per un futuro
low-carbon

Le Fonti
Rinnovabili 2010



Scheda tecnologica:

EOLICO

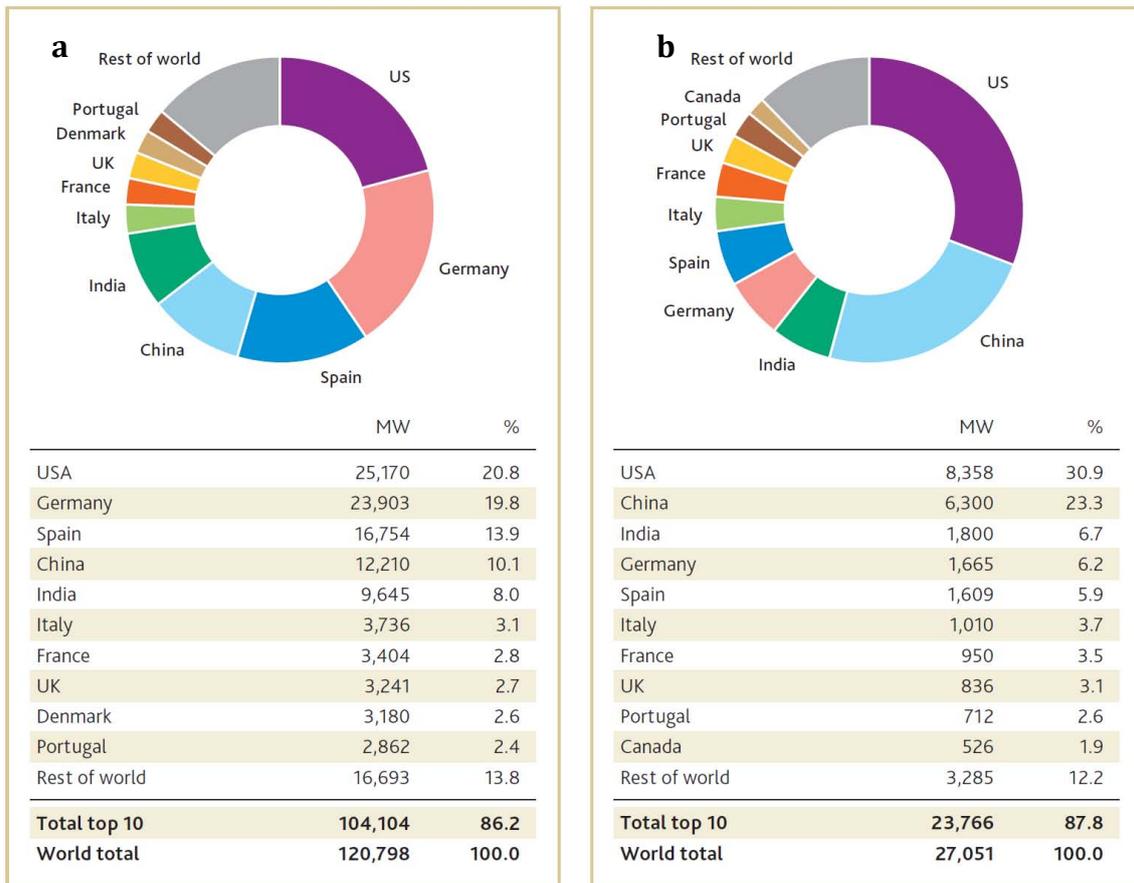
Descrizione e stato dell'arte

Le macchine eoliche realizzano la conversione dell'energia di pressione e velocità legata al movimento di masse d'aria attraverso lo scambio di lavoro sulle superfici mobili delle pale degli aerogeneratori, dove si realizza il trasferimento dell'energia di rotazione dal rotore all'albero di trasmissione. L'energia rotazionale è convertita in elettrica ed immessa in rete (di distribuzione o di trasmissione) o impiegata nelle immediate vicinanze del sito di generazione. La fonte eolica è sfruttata tipicamente in centrali collegate alla rete, con un certo numero di aerogeneratori disposti secondo specifiche di inserimento funzione dell'orografia del terreno e della classe di vento. Le centrali di potenza complessiva fino a 5 MW ca. possono essere collegate a reti di distribuzione in media tensione, mentre quelle più grandi vengono collegate in alta tensione.

Sono oggi numerose le installazioni di aerogeneratori nei mari del Nord Europa, dove la capacità produttiva delle macchine eoliche risulta estremamente interessante per lo sfruttamento di venti stabili e veloci.

Gli aerogeneratori per centrali eoliche per installazioni terrestri e marine sono, nella maggior parte dei casi, macchine tripala ad asse orizzontale.

Figura 1 - Capacità eolica cumulativa (a) e nuova potenza (b) installata nel mondo nel 2008



Fonte: GWEC 2008

Tabella 1 – Dimensioni aerogeneratori per classe di potenza di macchina

Macchinario	Potenza	Diametro rotore	Altezza mozzo
Piccola taglia	5-100 kW	3-20 metri	10-40 metri
Media taglia	250-1000 kW	25-60 metri	25-60 metri
Grande taglia	1000->3000 kW	55->100 metri	60->105 metri

Fonte: ENEA

Il progressivo e continuo aumento dimensionale ha portato alla diffusione di macchine eoliche multimegawatt, con unità da 2, 3 e, a livello dimostrativo 5-6 MW su diametri di rotore di oltre 90 m ed altezze al mozzo fino a 100 m.

L'esigenza di concentrazione di potenza su un numero inferiore di macchine (tipica delle applicazioni off-shore) sta muovendo i costruttori a orientarsi verso modelli da 5 o 6 MW, con diametri di rotore dell'ordine di 120 m.

Esiste anche un vasto e solido mercato per aerogeneratori di piccola taglia ad asse orizzontale e ad asse verticale, con taglie inferiori a 100 kW, richiesti per l'alimentazione di utenze non servite dalla rete oppure per la connessione a reti in bassa o media tensione in siti ventosi a bassa domanda energetica.

Le applicazioni eoliche commercialmente disponibili si distinguono in piccolo e grande-eolico secondo la taglia impiantistica degli aerogeneratori utilizzati e on-shore e off-shore a seconda che questi siano installati su terra ferma o in mare (tabella 1).

Dal punto di vista della produzione di energia eolica su grande scala, cioè in quantità significativa ai fini di un possibile contributo al bilancio energetico nazionale, resta indiscusso l'evidente vantaggio di impianti eolici di grandi dimensioni con macchine ad asse orizzontale e pale dal profilo aerodinamico alare in materiale composito, in numero non superiore a tre per la massima efficienza nella produzione di potenza elettrica.

La scelta di rotori di grandi dimensioni e l'elevazione dell'altezza del mozzo per sfruttare l'effetto intensificante della quota sul vento, ha come conseguenza l'incremento della produzione energetica e la riduzione del costo del chilowattora prodotto, lasciando le superfici di installazione più libere grazie ad aerogeneratori disposti con passi di posa molto larghi.

La potenza eolica mondiale installata è in aumento da diversi anni a ritmo sostenuto, sotto gli effetti dei programmi di incentivazione messi in atto da numerosi governi. Le statistiche delle associazioni internazionali del settore (GWEC¹¹², EWEA¹¹³), a fine 2008 accreditano la potenza eolica mondiale a oltre 120 GW di cui 65,9 GW in Europa, con un aumento significativo di quasi 27 GW rispetto a fine 2007 (94 GW). La classifica mondiale delle potenze installate [figura 1, pagina precedente] vede primeggiare gli USA seguiti da Germania e Spagna. In Italia, al sesto posto a fine 2008, si muovono aerogeneratori per una potenza cumulativa di 3.736 MW. È da notare che l'Unione Europea ha raggiunto, a fine 2005, il traguardo di 40 GW eolici stabiliti per il 2010 dalla Commissione nel suo Libro Bianco sulle fonti rinnovabili del 1997. Le stime dell'EurObserv'ER, in particolare, prevedono il raggiungimento dell'obiettivo di 86 GW eolici nella UE al 2010 mentre l'EWEA prevede 300 GW al 2030. Quest'ultima potenza coprirebbe il 22% del fabbisogno UE di energia elettrica al 2030, contro il 4,2% di oggi.

Prospettive tecnologiche e R&S

L'evoluzione tecnologica, derivata dalle continue attività di ricerca e sviluppo condotte principalmente nei Paesi del nord Europa e negli Stati Uniti, ha permesso il conseguimento di obiettivi prestazionali importanti delle macchine eoliche (anche negli ambienti maggiormente ostili come quello marino), di disponibilità delle macchine stesse in termini di capacità industriali di produzione, di qualità dell'energia prodotta ed essenzialmente in termini di abbattimento dei costi.

¹¹² GWEC, Global Wind Energy Council.

¹¹³ EWEA, European Wind Energy Association

Le fibre di carbonio largamente utilizzate per la laminazione delle pale eoliche hanno consentito di ridurre la quantità di materiale impiegato, garantendo una riduzione complessiva del peso degli aerogeneratori, mentre l'evoluzione dei profili delle pale consente una maggiore erogazione per un miglioramento complessivo delle *performance*.

Le odierne macchine multimegawatt consentono di ridurre la frequenza e l'entità dei servizi di assistenza e manutenzione raggiungendo in alcuni casi l'obiettivo del singolo controllo di manutenzione annuale di macchina con risparmio notevole in termini di tempi di inattività della turbina e di costi del personale.

L'efficienza di conversione delle macchine eoliche è un parametro importante da considerare, ma non sempre determinante ai fini economici, in quanto l'efficienza massima di un aerogeneratore, variabile da 0,42 a 0,50, è relativa a una sola velocità del vento per le macchine a velocità fissa del rotore, mentre per quelle a velocità variabile si attesta in un intervallo di velocità. Infatti, una maggiore efficienza di conversione non sempre si traduce nell'investimento economico migliore, in quanto i maggiori costi d'affrontare non è certo che vengano compensati dalla maggiore producibilità.

La producibilità è invece il parametro fondamentale da considerare nell'investimento nel settore: infatti, la remunerazione dell'impianto realizzato è esclusivamente funzione dell'energia prodotta, salvo i casi di finanziamento in ambito PON (Piano Operativo Nazionale), sia attraverso il sistema incentivante dei certificati verdi sia con la vendita dell'energia elettrica immessa in rete.

La producibilità dipende dalla tecnologia impiegata e dal layout della centrale eolica, ossia dalla disposizione degli aerogeneratori nel sito prescelto, ma soprattutto dalle caratteristiche anemologiche del sito medesimo. Il *capacity factor* è il rapporto tra l'energia prodotta da una singola macchina o da una o più centrali eoliche in un determinato luogo e periodo di tempo e l'energia che sarebbe stata prodotta dalla stessa/e unità se avesse/ro operato alla potenza nominale per lo stesso periodo e nello stesso luogo.

Il valore del *capacity factor*, generalmente espresso su base annua, è compreso tra 0 e 1, e può essere indicato anche in percentuale. A livello globale è compreso tra 0,20 e 0,40, cioè tra il 25% e il 40%. In Italia il *capacity factor* ha un'ampia gamma di valori che vanno da meno del 20% nelle aree meno vocate a più del 30% in quelle maggiormente idonee.

Tecnologia piccolo eolico. Gli aerogeneratori di piccola taglia hanno caratteristiche tecniche in larga parte diverse anche se basate sullo stesso principio di funzionamento, ma con la finalità di produrre e consumare energia a livello locale, andando dalle macchine da poche centinaia di Watt o pochi kW, destinate a lavorare generalmente in abbinamento a batterie di accumulo, fino alle unità da 50-100 kW, che presentano caratteristiche tecniche e modalità di funzionamento simili a quelle degli aerogeneratori medio e grandi. Le unità più piccole, in particolare, comprendono non solo modelli ad asse orizzontale ma anche modelli ad asse verticale che operano indipendentemente dalla direzione del vento. Tipicamente gli aerogeneratori di piccola taglia non riescono a beneficiare delle innovazioni tecnologiche della attività di R&S che trainano il mercato delle grandi installazioni perché oggetto di produzioni limitate da parte di piccole aziende. Pertanto sono spesso caratterizzati da performance inferiori a quelle delle macchine di taglia superiore. Il mercato, particolarmente quello nazionale, prevede una molteplicità di applicazioni per queste macchine fino ad una potenza di 200 kW, che possono funzionare sia in connessione alla rete elettrica di bassa o media tensione che in applicazioni stand alone per l'alimentazione di utenze elettriche isolate.

Tecnologia eolica on-shore. Allo stato attuale i principali risultati dell'evoluzione in questo settore sono riconducibili ad un forte abbattimento dei costi, almeno sino al 2004 in quanto successivamente al forte incremento del costo delle materie prime e allo squilibrio della domanda di aerogeneratori rispetto all'offerta, si è determinato l'effetto di un'inversione di rotta, con sensibile aumento dei costi, che al momento sembra però essersi attenuato se non arrestato, con una diminuzione del 10% negli USA, e alla simultanea crescita della potenza unitaria dei dispositivi di conversione dell'energia eoli-

ca in energia elettrica. Infatti, la taglia di potenza unitaria degli aerogeneratori medi e grandi per applicazioni on-shore è compresa fra 500 e 1000 kW (turbine di media taglia) e superiore a 1000 kW (grande taglia). Il loro impiego tipico è nelle centrali eoliche. In Italia, i tipi di aerogeneratori oggi più diffusi sono quelli tripala con taglia compresa fra 800-900 kW e 1,5-3 MW. **In tali macchine l'altezza tipica della torre è compresa tra 50 e 80 metri e il rotore dispone di pale di lunghezze tra 20 e 45 metri.** Tendenza attuale del mercato è quella di installare macchine da 1,5 a 3 MW a velocità variabile grazie all'accoppiamento di un convertitore di frequenza al generatore.

Queste unità riducono al minimo le fluttuazioni indesiderate dell'energia elettrica immessa in rete tramite variazione di velocità del rotore che può raggiungere scostamenti significativi rispetto alla velocità sincrona del generatore.

Tecnologia eolica off-shore. Per eolico off-shore s'intendono gli insiemi degli aerogeneratori di grande taglia (cioè oltre il MW) che costituiscono le centrali per la produzione di energia elettrica dislocate in ambiente marino. **L'attuale tecnologia limita le installazioni su fondali non superiori ai 40 m, con tipologia di fondazione tipicamente monopalo.** Le turbine off-shore utilizzano la stessa tecnologia di quelle impiegate a terra, ma il ricorso all'ambiente marino comporta un notevole incremento di producibilità per le condizioni anemologiche (maggiore ventosità a bassa turbolenza) sensibilmente migliori di quelle sulla terraferma. Le severe condizioni climatiche in mare richiedono tuttavia particolari accorgimenti per i trattamenti anticorrosione di fondazioni e torri, sistemi di controllo adeguati per lunghi periodi di operatività, elevata agibilità delle macchine e procedure di sicurezza per la manutenzione.

Le realizzazioni odierne sono costituite da insiemi di macchine di grande taglia, con potenza del singolo aerogeneratore non inferiore a 2 MW: attualmente la massima taglia prodotta per un aerogeneratore commerciale è accreditata di una potenza nominale pari 3,6 MW, un diametro del rotore pari a 104 m e altezza della torre variabile.

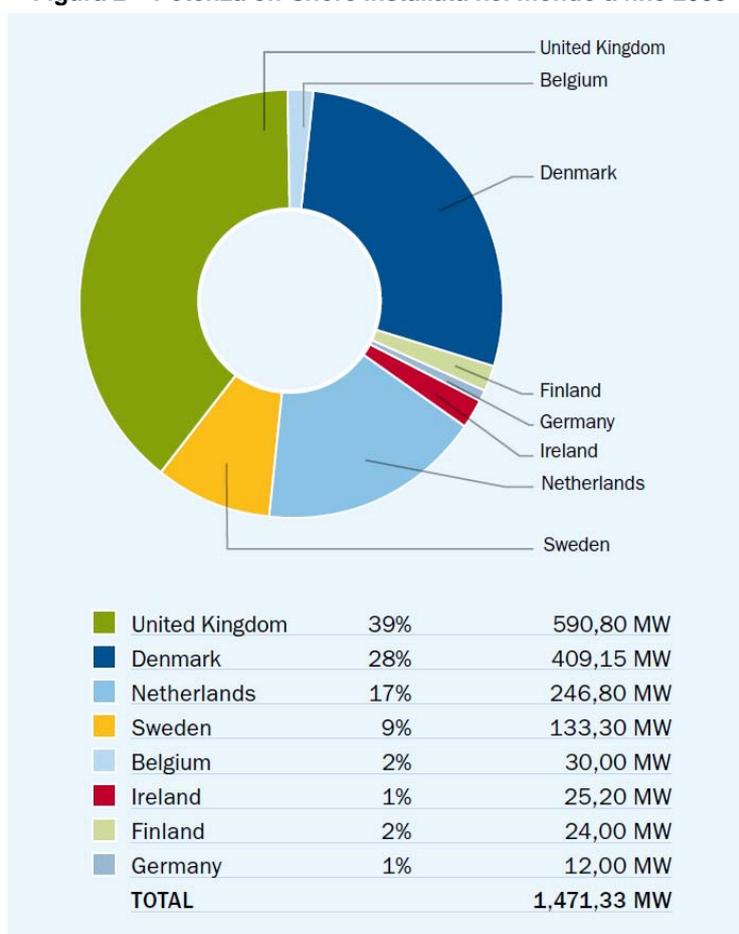
L'installazione di turbine eoliche off-shore presenta vantaggi rispetto all'opzione on-shore: lo sviluppo di turbine di dimensioni maggiori può determinare negli impianti problemi di trasporto, di carattere infrastrutturale e d'impatto visivo che sono mitigati ad una certa distanza dalla costa. Gli aspetti negativi riguardano soprattutto gli investimenti necessari per fronteggiare i più alti costi di realizzazione per il limitato numero di giorni/anno in cui possono essere condotte le attività di installazione in mare aperto (funzione delle condizioni meteomarine di siti tipicamente ventosi) e la difficoltà di raggiungere le turbine per la manutenzione ordinaria (con oneri maggiori). La severità delle condizioni ambientali, inoltre, comporta problemi connessi alla corrosione marina, **alla stabilità dell'efficacia dei lubrificanti ed a sforzi e sollecitazioni a cui gli impianti sono sottoposti dal moto ondoso.** Le fondazioni degli aerogeneratori in ambiente marino, a differenza di quanto avviene sulla terraferma, implicano scelte progettuali impegnative: **attualmente l'opzione tecnologica privilegiata è la fondazione monopila o monopalo inserita in fondo sabbioso.** Le fondazioni monotubo sono attualmente impiegate nella maggior parte degli impianti off-shore del Regno Unito, della Danimarca, della Svezia e dei Paesi Bassi entro un *range* di profondità di 25 m di fondale.

La tecnologia eolica off-shore ha raggiunto il pieno sviluppo nel Mare del Nord dove la più grande centrale eolica off-shore, realizzata nel 2002, ha una capacità di generazione di 160 MW ottenuta da 80 aerogeneratori disposti a scacchiera su una superficie in mare di oltre 27 chilometri quadrati, scarsamente visibili da terra e meta di grande interesse del turismo internazionale.

La potenza globale off-shore installata in Europa [figura 2] è ancora modesta e ciò è in larga misura legato ai costi superiori rispetto a quelli tipici riscontrabili in ambiente terrestre.

In prospettiva, lo scenario di diffusione delle tecnologie eoliche off-shore è ampio, tenendo conto della continua evoluzione tecnologica che mira alla dislocazione delle centrali su fondali più profondi e, contestualmente, all'utilizzo di macchine di taglia di 5 MW. Con riferimento al caso italiano, la potenzialità eolica lungo le coste va valutata con specifici approfondimenti sui fattori antropici e socio-economici che possono influenzare positivamente o meno la scelta dell'uso della risorsa.

Figura 2 – Potenza off-shore installata nel mondo a fine 2008



Fonte: EWEA 2009

Tecnologia eolica galleggiante per acque profonde. La capacità produttiva delle macchine eoliche in mare aperto risulta estremamente interessante per lo sfruttamento di venti meno turbolenti e di campi di velocità superiori rispetto ai venti costieri (e di terra ferma). Con l'utilizzo delle moderne turbine off-shore multimegawatt i valori di producibilità crescono sensibilmente rispetto agli impianti terrestri.

Tuttavia, l'accesso a fondali marittimi in zona "acque profonde" (oltre i 50 m) per le installazioni eoliche è benefico, ad oggi, di qualche prototipo di impianto galleggiante, ovvero privo di fondazioni sommerse di interconnessione al fondale marino.

L'esperienza acquisita dall'industria del petrolio e del gas nella costruzione ed esercizio delle piattaforme marine¹¹⁴ ha mutuato alcune soluzioni impiantistiche ad oggi oggetto di differenti programmi di R&S che si differenziano per la tipologia di sostegno degli aerogeneratori (piattaforme immerse stabilizzate, piattaforme galleggianti e piattaforme a spinta bloccata) e per gli ancoraggi (geometria delle linee di ormeggio e sistemi d'ancora a cavo o catena), tipologia, quest'ultima, fortemente correlata alle condizioni specifiche di tenuta del fondale marino.

Grazie all'utilizzo di elementi totalmente preassemblati in cantiere, le installazioni flottanti assicurano cantierizzazioni dei siti molto rapide (includendo il trasporto via mare delle apparecchiature) con tempi di ingombro delle aree marine piuttosto brevi.

¹¹⁴ Un esempio di riutilizzo di piattaforme offshore riguarda una piattaforma ubicata a 22 km dalla costa siciliana, in corrispondenza di una profondità di 120 m; lo studio di pre-fattibilità ha considerato l'installazione di un aerogeneratore da 4,5 MW mediante l'impiego di mezzi navali e di sollevamento in parte già presenti sulla stessa piattaforma.

Tutte le strutture, piattaforme galleggianti immerse e zavorre di ancoraggio al fondale, sono totalmente rimovibili a fine ciclo produttivo degli impianti per minimizzare gli impatti sull'ecosistema marino.

Il primo impianto eolico mondiale di tipo galleggiante, sia pure con una macchina di soli 70 kW, è italiano ed è stato provvisoriamente ubicato da dicembre 2007 al largo di Brindisi. È stato posizionato nel Canale di Otranto a 20 km dalla costa (località Tricase) su un fondale di 110 m, ove sono stati acquisiti dati sperimentali utili allo sviluppo delle attività di ricerca sul prototipo di taglia maggiore (2-3 MW) finalizzate ai processi di industrializzazione. Il prototipo, sviluppato in applicazione del concetto di piattaforma sommersa a spinta bloccata (Tension Legged Platform - TLP) **si pone l'obiettivo di testare una tecnologia in grado di affrontare ancoraggi su fondali dai 60 ai 250 m, banda di profondità in cui si collocano la maggior parte dei siti interessanti per la installazione di eolico off-shore.**

Un prototipo in scala ridotta di aerogeneratore a colonna galleggiante, invece, è stato **testato in vasca per la prima volta in Norvegia, mentre l'installazione di un'unità dimostrativa di 2,3 MW su una struttura galleggiante è in corso. L'elemento galleggiante si estenderà a 100 m di profondità e sarà ancorato al fondo marino.**

Tecnologia eolica d'alta quota. La quota più favorevole per potenza specifica del vento si trova a circa 10.000 metri di altezza s.l.m.. Da tali altitudini, la velocità e l'energia del vento decadono discendendo verso il suolo sia per la frizione tra le masse d'aria che tra masse d'aria e l'orografia del territorio. Alcuni progetti eolici innovativi mirano a sfruttare questo vantaggio di quota cercando di intercettare le alte velocità del vento dove le torri eoliche tradizionali non possono giungere perché prossime al limite dimensionale di peso e stabilità. Tra questi, il progetto condotto da un'azienda¹¹⁵ italiana e dal Politecnico di Torino prevede di utilizzare profili alari semirigidi di potenza, ad alta efficienza e pilotati in modo automatico, lasciando a terra i macchinari per la generazione di energia e trasmettendo trazione e contemporaneamente controllo direzionale dei profili attraverso cavi in materiale composito. Le unità di manovra previste permettono di guidare in modo automatico un singolo profilo o una batteria di profili alari di potenza ad una altezza operativa dagli 800 ai 1.000 metri, secondo una traiettoria circolare. **Con tali configurazioni le centrali eoliche d'alta quota intercetterebbero grandi quantità di vento in una unica installazione di terra con un impegno del suolo estremamente contenuto rispetto alle installazioni tradizionali a torre. È stato realizzato un primo prototipo a piccola scala con un aquilone in grado di produrre energia elettrica con l'alternanza di fasi di trazione e richiamo del profilo alare.**

Potenziale di sviluppo e barriere alla diffusione

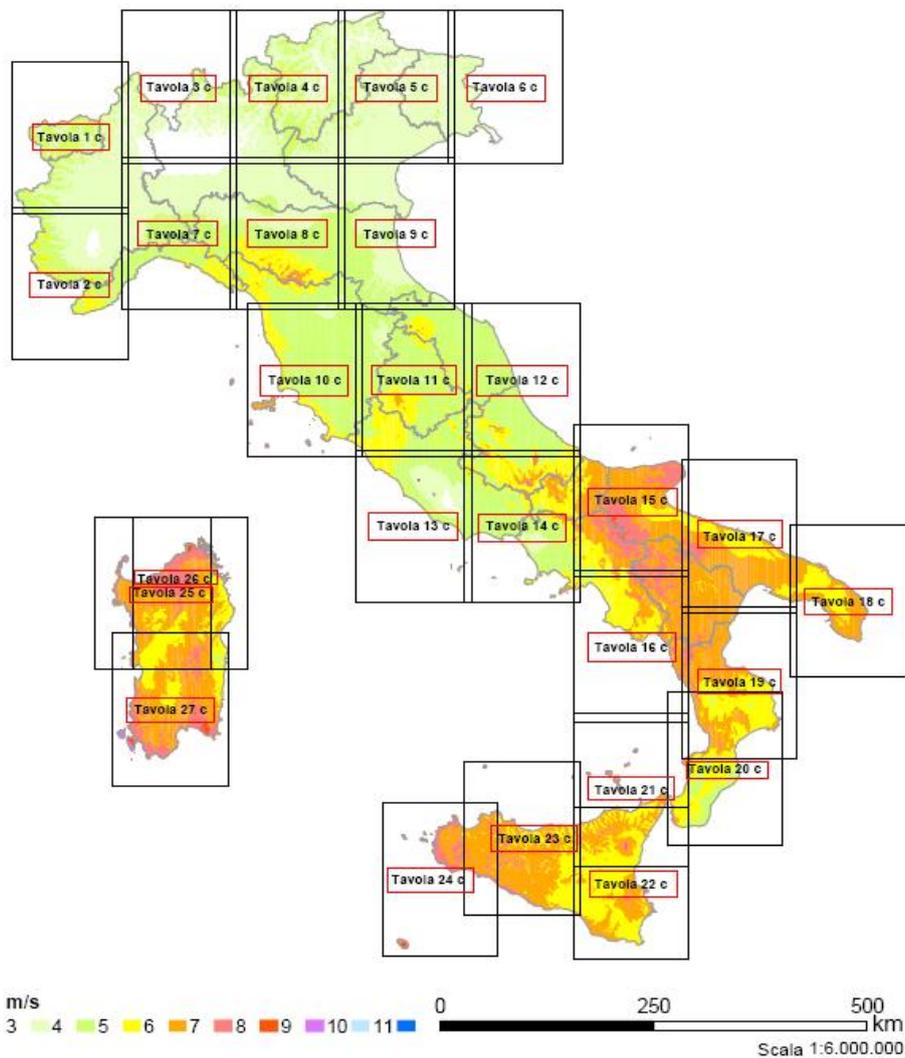
La valutazione del potenziale eolico nazionale effettivamente sfruttabile può essere condotta a partire dai dati qualificati dall'Atlante Eolico dell'Italia. In generale però questa piattaforma deve essere integrata, oltre che con dati rilevati sul sito, con molteplici fattori tecnici riguardanti l'orografia, la destinazione d'uso del suolo, i vincoli ambientali, le condizioni logistiche (strade ecc.) lo stato della rete locale di distribuzione dell'energia elettrica, non sempre determinabili in modo puntuale su tutto il territorio.

A questi fattori si sommano in modo poco prevedibile aspetti di carattere amministrativo e sociale piuttosto complessi. Per ciascuna regione italiana è possibile ricavare, dall'Atlante Eolico, l'estensione complessiva delle aree con producibilità specifica teorica (numero di ore annue equivalenti di funzionamento a potenza nominale) superiore a determinate soglie d'interesse.

Il potenziale teorico risultante sopra la soglia 1.750-2.000 MWh/MW a 50 m sul livello del mare, che deve però essere correlata alle dimensioni del rotore, è elevato e superiore all'intero fabbisogno nazionale.

¹¹⁵ Il progetto Kite Gen è stato premiato dal World Renewable Energy Congress, organizzazione mondiale sul settore delle energie rinnovabili affiliata alle Nazioni Unite.

Figura 3 – Mappa¹¹⁶ complessiva delle tavole di velocità media annua del vento a 70 m s.l.t.



Fonte: Atlante Eolico dell'Italia

Per il potenziale eolico off-shore i dati disponibili di ventosità e conseguentemente di produttività sono più incerti: all'interno di una fascia di 40 km dalla linea costiera risiedono molte aree con produttività specifica, a 75 m sul livello del mare, dell'ordine di 2.500-3.000 MWh/MW (vedi sopra) ed in acque a profondità accessibile alle attuali tecnologie impiantistiche off-shore. In aree con acque a profondità intermedie (tra 30 m e 60 m) e profonde (oltre 60 m) si riscontrano produttività superiori.

Dall'estensione complessiva delle aree su terraferma stimate come sufficientemente ventose e compatibili con le installazioni eoliche, si può valutare per l'Italia, un potenziale complessivo dell'ordine di 6.000 MW sotto condizioni simili a quelle per cui si realizzano gli impianti attuali [tabella 2].

¹¹⁶ Mappa elaborata da CESI in collaborazione con il Dip. di Fisica dell'Università di Genova nell'ambito della Ricerca di Sistema. Per la corretta interpretazione si veda il testo dell'Atlante di cui questa mappa fa parte.

Tabella 2 – Stima dei potenziali di penetrazione dell'eolico

FONTE	INSTALLATO 2005 [MW]			POTENZIALE TECNICO [MW]		PRODUCIBILITÀ [TWh]	NOTE
	> 10 MW	< 10 MW	Totale	Totale	Residuo	Totale	
Eolico terrestre	1.312	406	1718	> 6.000	> 4.000	> 12	Potenziale fino a 12GW se impatto ambientale accettabile
Eolico off-shore	0	0	0	900-1.900	900-1.900	2 - 6	Stima molto incerta limitata ai fondali bassi
Eolico complessivo	1.312	406	1718	> 7.000	> 5.000	14 - 18	

Fonte: CESI Ricerca

Questo potenziale è suscettibile di incremento fino a 12.000 MW e oltre ipotizzando innanzi tutto il potenziamento della rete elettrica, lo snellimento delle procedure autorizzative e la consistenza e continuità delle politiche di incentivazione.

Confermato dal numero di installazioni realizzate, il potenziale più interessante risulta concentrato nelle Regioni meridionali e insulari. Seguono le Regioni centrali dove il potenziale risulta decisamente più contenuto e le settentrionali, dove, escluse molte aree di limitata estensione il potenziale residuo risulta piuttosto basso.

Il potenziale eolico off-shore, nell'ipotesi che le centrali vengano posizionate lontano dalla costa per renderle poco visibili da terra, si può valutare, nell'ordine di qualche migliaio di MW in acque basse (principalmente al largo di Puglia, Calabria, Sardegna, Sicilia e Molise).

In acque intermedie e profonde (Sardegna, Puglia e Sicilia) il potenziale è sensibilmente più alto dove, tuttavia, le tecnologie commercialmente disponibili non sono ancora in grado di spingersi. Questo potenziale è destinato a crescere molto annoverando le aree immediatamente adiacenti alle acque territoriali italiane (EEZ - Exclusive Economic Zones).

Analisi economica

I costi di produzione dell'energia ceduta annualmente alla rete di distribuzione da un impianto eolico sono legati prioritariamente alla disponibilità della fonte eolica, agli oneri d'investimento per la realizzazione ed ai costi d'esercizio e manutenzione.

Secondo stime della IEA (Agenzia Internazionale dell'Energia) e della EWEA, i costi unitari di produzione da fonte eolica di siti con velocità medie annue del vento superiori ad almeno 6 m/s, a 10 m s.l.m. sono dell'ordine di 40-60 euro/MWh.

Paesi ad orografia articolata come il caso Italia richiedono infrastrutture ed installazioni complesse che spostano il costo unitario dell'energia oltre 80 euro/MWh con un onere complessivo maggiore che eleva il costo finale degli impianti.

Le condizioni anemometriche più favorevoli all'inserimento di aerogeneratori su terra ferma sono a ventosità di 6-7 e talvolta 8 m/s che garantisce con le tecnologie attuali la producibilità specifica di 2.000-2.500 e in pochi casi 3.000 MWh/MW (vedi sopra). I siti off-shore, a pari tecnologia installata, attestano la producibilità energetica annua attorno ai 3.000-3.500 MWh/MW grazie a venti in genere più forti e regolari.

I costi di realizzazione degli impianti eolici sono fortemente sbilanciati sui costi dei macchinari: gli aerogeneratori coprono mediamente il 75% degli investimenti mentre sul restante 25% incidono fondazioni, infrastrutture elettriche e logistiche, installazioni e collaudi. Il prezzo internazionale di mercato per l'acquisto degli aerogeneratori medi e grandi (solo macchinario) risulta tipicamente compreso fra 650 e 1.000 euro/kW. Il costo dell'intera centrale on-shore si attestava nel 2008 fra 940 e 1.340 €/kW.

Tabella 3 – Caratteristiche e stima dei costi associati alle tecnologie eoliche

	Anno	Rend.	Costo capitale	O&M	Vita	Ore/Anno	Costo energia	Note
Fonte		%	M€/MW	k€/MW anno	Anni	heq	€/MWh	
Eolico terrestre	2007		1,6-1,8	30-40	20	1.700-1.900	115-148	Riscontrati dati di costo in crescita nel 2007, specie per il macchinario
	2018		0,8	18-28	25	1.700-1.900	56-68	
	2030		0,6	18-28	25	1.700-1.900	44-55	
Eolico off-shore	2007		2-2,8	40-60	20	3.000	92-130	Costi capitali tendenzialmente crescenti verso l'estremo superiore
	2018		1,4-1,8	40-60	25	3.000	65-86	
	2030		1,2	40-60	25	3.000	57-64	

Fonte: CESI Ricerca

Contrariamente a quanto registrato nell'ultimo decennio, in cui i costi di generazione elettrica da fonte eolica sono diminuiti progressivamente avvicinandosi in alcuni casi alla competitività con gli impianti convenzionali, attualmente per lo squilibrio fra la capacità produttiva dell'industria e la forte domanda di aerogeneratori dovuta alle numerosità dei progetti eolici, si sono registrati incrementi dei costi specifici d'impianto, sia all'estero che in Italia, anche dell'ordine del 50%.

Con le attuali unità multiMW si possono valutare, oggi, costi d'impianto sulla terraferma dell'ordine di 1.200-1.900 euro/kW, con un'incidenza media annua degli oneri di esercizio e manutenzione che oscilla fra il 2 ed il 3% del costo capitale dell'impianto.

Le centrali off-shore comportano costi di realizzazione e di gestione d'impianto più elevati rispetto alle centrali on-shore, di solito fra 2.100 e 3.200 euro/kW in larga misura imputabili ai maggiori oneri derivanti dalla realizzazione delle fondazioni sommerse e dalle attività di posizionamento e collegamento elettrico delle turbine che avvengono in mare su mezzi speciali.

La posa in mare aperto richiede l'intervento di sommozzatori e lavoratori subacquei specializzati e di una attenta programmazione delle attività di lavoro in funzione delle condizioni meteorologiche locali. Il sovracosto dovrebbe essere compensato dall'incremento di capacità produttiva degli aerogeneratori nelle condizioni anemometriche marine.

Con una producibilità energetica annua di circa 600 GWh elettrici, il costo specifico di investimento del sito eolico off-shore di Horns Rev (Danimarca) è stimato attorno a 1.500 euro/kW, attestandosi come uno dei più bassi tra gli impianti off-shore esistenti.

Il costo complessivo di realizzazione dell'opera ha avuto come ricaduta sulla singola unità installata un costo di fornitura e messa in servizio di quasi 3 milioni di euro.

Per quanto riguarda scenari futuri, la stima possibile una graduale riduzione del costo d'impianto, fino a circa 700 euro/kW sulla terraferma e a 1.200 euro/kW off-shore nel 2030.