

Schede sulle energie rinnovabili: energia eolica

- Nel mondo, la capacità di produzione di energia elettrica da fonte eolica cresce del 20-30% all'anno. Nel 2007, ha superato i 90 GW (50 volte la potenza installata del 1990). Nel 2006, l'energia elettrica prodotta da fonte eolica è stata pari a 152 TWh.
- Gli investimenti annuali hanno toccato i 50 miliardi di dollari USA nel 2007. Gli addetti al settore eolico sono, nel mondo, 200.000.
- I costi dei generatori eolici sono diminuiti di 4 volte a partire dagli anni '80, ma sono aumentati del 20-80% dal 2004 in poi per la scarsa offerta di generatori e componenti e gli elevati prezzi delle materie prime. Nel 2007, i costi dei generatori eolici on-shore si aggiravano intorno a 1,2-1,8 milioni di \$/MW.
- Più di recente, per gli impianti on-shore ubicati in siti con risorse eoliche di alta-media qualità, si è registrato un costo per MWh prodotto di 75-97 \$. Gli impianti eolici on-shore risultano competitivi quando sono localizzati in siti che presentano buone caratteristiche anemometriche e di accesso alla rete.
- La pubblicazione dell'AIE "Energy Technology Perspectives 2008" indica che, con l'intensificarsi degli sforzi e l'innovazione tecnologica nel settore, la produzione da fonte eolica potrebbe coprire fino al 12% della richiesta di energia elettrica del mondo al 2050.
- Gli ostacoli alla crescita dell'eolico comprendono l'investimento di capitale, l'incertezza sulle politiche di sostegno, l'impatto della non programmabilità della risorsa sul sistema elettrico, i limiti di capacità di trasporto della rete e l'impatto visivo.

Il Mercato

Nel 2006, l'energia elettrica prodotta da fonte eolica è stata pari a 152 TWh. Nel 2007, gli impianti eolici hanno coperto il 20% dei consumi di energia elettrica in Danimarca, il 10% in Spagna ed il 6% in Germania. La potenza installata, già nel 2007, superava i 20 GW, con gli USA in testa, seguiti dalla Cina e dalla Spagna. Il diagramma riportato a fianco mostra la potenza installata cumulata. Il maggiore impianto eolico in servizio nel 2007 (Texas) aveva una potenza di oltre 700 MW, cioè dello stesso ordine di grandezza di una centrale elettrica tradizionale.

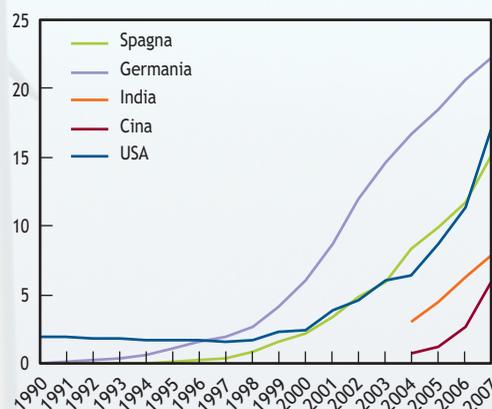


Figura 1. Potenza eolica installata cumulata (GW) nei principali paesi, 1990-2007

Impianti Off-shore

Nel 2007, gli impianti off-shore avevano una potenza installata di 1,1 GW ed erano localizzati in soli 6 paesi, fra i quali Danimarca (420 MW), Regno Unito (300 MW), Olanda (130 MW), Irlanda (25 MW) e Svezia (135 MW). Numerosi progetti di costruzione di impianti di grande taglia sono previsti in altri paesi. Gli impianti eolici off-shore, grazie a venti più intensi e più stabili, sono in grado di produrre fino al 50% in più di energia elettrica rispetto agli analoghi impianti on-shore. Altri vantaggi sono la notevole riduzione dell'impatto visivo, la minore turbolenza ed il minor numero di vincoli legati alla rumorosità - che consentono una maggiore velocità dei rotori. Dall'altro lato, i costi dei componenti e di installazione sono, con le attuali tecnologie, più elevati.

Impianti eolici di piccola taglia

In passato, gli aerogeneratori di piccola taglia o "micro" sono stati adottati soprattutto per le utenze isolate non collegate alla rete. Di recente, alcuni paesi (fra i quali Canada, Irlanda, Italia, Portogallo, Spagna, Regno Unito e USA) hanno mostrato un rinnovato interesse per questo tipo di aerogeneratori. Permangono, tuttavia, problemi legati alla loro affidabilità, che ne rendono esiguo il relativo mercato

La risorsa eolica

La cartina riportata qui sotto mostra le risorse eoliche disponibili nel mondo e le velocità medie del vento in siti on-shore ed off-shore. Il contenuto energetico del vento è proporzionale al cubo della velocità. Perciò, una velocità media lievemente più elevata può far crescere notevolmente la produzione di energia elettrica, il che ha una rilevante incidenza sulla fattibilità economica dei progetti. Infatti, per la localizzazione di un impianto di medie dimensioni, viene considerato idoneo un sito dove la velocità del vento è di almeno 7 m/s (25

km/h) ad un'altezza del mozzo ("hub") di circa 80 m. L'importanza di una situazione anemometrica buona è dimostrata dal fatto che gli USA hanno prodotto nel 2007 più energia elettrica da fonte eolica di qualunque altro paese, pur non disponendo della maggiore potenza installata. Nel 2006, gli impianti eolici off-shore (1,8% di tutta la potenza eolica installata) hanno prodotto il 3,3% di tutta l'energia elettrica da fonte eolica. Risorse eoliche ottimali sono presenti su tutto il pianeta

Fabbricazione di componenti eolici ed occupazione

Quasi tutti gli aerogeneratori del mondo sono fabbricati in 6 paesi (Figura 2). Pur disponendo di poco più del 3% di tutta la potenza eolica installata nel mondo, la Danimarca è stato il paese pioniere dell'eolico moderno e fabbrica attualmente circa un terzo di tutti gli aerogeneratori venduti nel mondo. Altri importanti paesi di fabbricazione sono Germania, Spagna, USA, India e Cina. Gli addetti al settore eolico sono, nel mondo, circa 200.000

Nuovi investimenti

Nel 2007, gli investimenti nel settore toccavano i 50,2 miliardi di \$, pari al 43% di tutti i nuovi investimenti in energie rinnovabili. L'energia elettrica da fonte eolica collocata sull'azionariato privato risultava pari a 11,3 miliardi di \$, di cui il 60% attraverso un'unica Offerta Pubblica Iniziale ("Initial Public Offering - IPO")

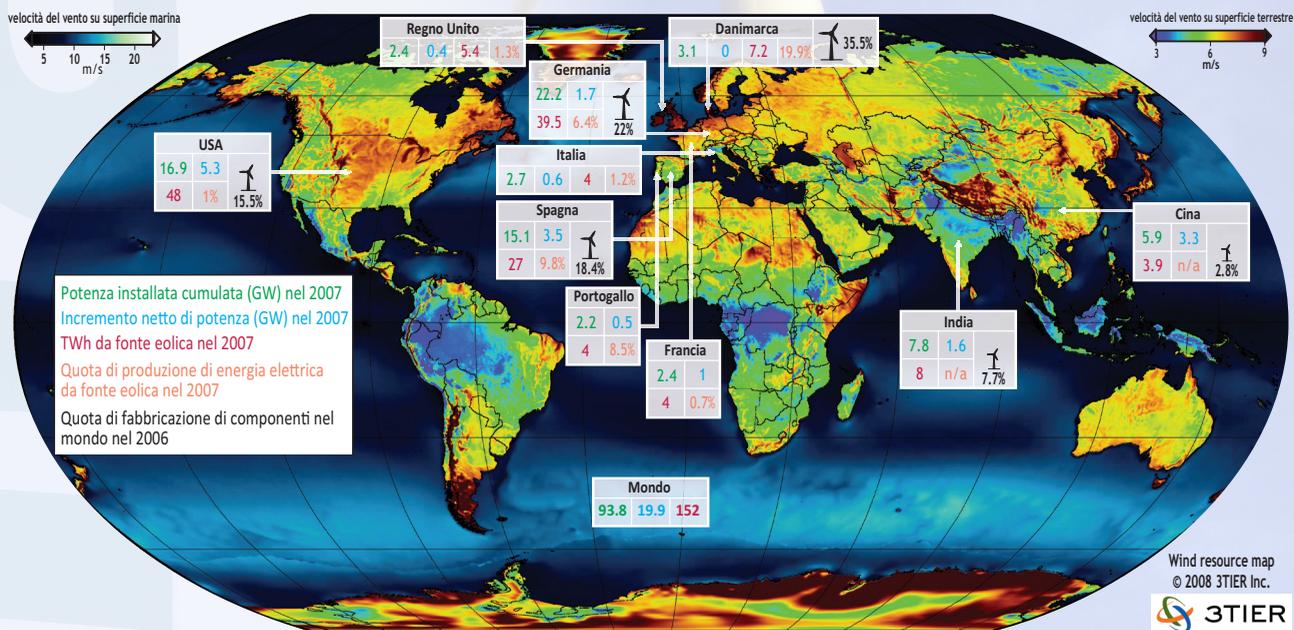


Figura 2. Risorse eoliche on-shore e off-shore nel mondo (altezza 80 m, risoluzione 15 km), con dati relativi alla potenza installata, alla produzione di energia elettrica ed alla fabbricazione dei componenti nei principali paesi

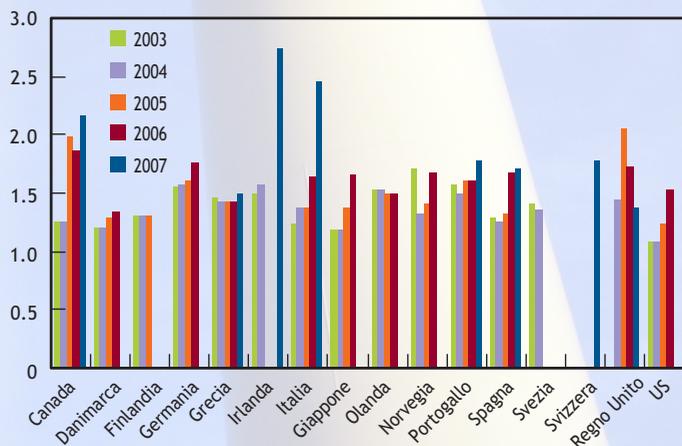
Note: Le cifre relative all'incremento di potenza in India e Cina nel 2007 sono lorde. I TWh prodotti in India e Cina si riferiscono al 2006. La maggior parte delle attività svolte in Danimarca nel 2007 sono state ripotenziamenti. I principali stati degli USA, in termini di incidenza della produzione da fonte eolica sul totale della produzione elettrica nazionale, sono Minnesota (5%), Iowa (5%), New Mexico (4%) e Oregon (3,5%)

Aspetti Economici

Costi d'investimento

I costi degli aerogeneratori sono diminuiti di 4 volte dagli inizi degli anni '80. Tuttavia, a partire dal 2004, essi sono aumentati di circa il 20-80% (2006) per insufficiente offerta (aerogeneratori, moltiplicatori di giri - "gearbox" - pale, cuscinetti e torri) ed elevati prezzi delle materie prime (in particolare, acciaio e rame).

Figura 3. Evoluzione dei costi di investimento in alcuni paesi - 2003-2007 (milioni di \$/MW)



Gli esperti del settore prevedono un ampliamento dell'offerta nel 2010. Nel 2007, i costi degli aerogeneratori on-shore oscillavano fra 1,2 milioni di \$/MW negli USA a 1,8 milioni di \$ in Italia. I costi totali dell'impianto installato (comprensivo di aerogeneratori) variavano fra 1,4 milioni di \$ nel Regno Unito e 2,7 milioni di \$ in Irlanda (Figura 3).

Nel 2006, i costi annuali di esercizio degli aerogeneratori on-shore di grande taglia, comprensivi di assicurazione, manutenzione ordinaria, parti di ricambio, riparazioni e oneri amministrativi, sono stati di 14-26 \$/MWh. I costi di esercizio e manutenzione degli aerogeneratori offshore sono molto più elevati.

Nei siti che offrono le migliori caratteristiche anemometriche e di accesso alla rete, gli impianti eolici possono essere competitivi rispetto alle centrali elettriche tradizionali. Il costo unitario dell'energia elettrica prodotta dipende dalla qualità della risorsa eolica (rappresentata dalle ore di funzionamento a pieno carico), dai costi di investimento, dai costi di esercizio e manutenzione e dalla durata di vita degli aerogeneratori. Gli impianti eolici sono ad alta intensità di capitale. Di conseguenza, nella stima dei costi dell'eolico, il costo del capitale (tasso di attualizzazione) è un fattore decisivo. Ad esempio, i costi caratteristici della produzione di energia elettrica (in moneta costante per tutto il ciclo di vita dell'aerogeneratore), con un tasso di attualizzazione del 7,5% e costi di investimento di 1,6 milioni di \$/MW, oscillano fra 75 e 97/MWh in siti con risorse eoliche di media-alta qualità, come illustrato in Figura 4.

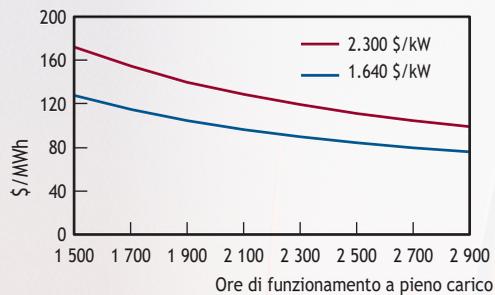


Figura 4. Costi di produzione di energia elettrica da fonte eolica in funzione delle risorse eoliche disponibili e dei costi di investimento

Questi costi dipendono, in larga misura, dalla profondità del mare e dalla distanza dalla costa. I costi per le fondazioni, il montaggio ed il collegamento alla rete sono molto più elevati nei siti off-shore. Un aerogeneratore costa in genere il 20% in più, mentre le torri e le fondazioni possono costare oltre il 150% in più. Tuttavia, la produzione di energia elettrica di un impianto off-shore, grazie alle maggiori velocità del vento, può essere del 50% in più. Fra il 2007 ed il 2008, gli impianti situati in Regno Unito e Svezia avevano un costo per MW di 2,5-3,7 milioni di \$ ed un costo per MWh prodotto di 85-105 di \$.

I fattori-chiave per la riduzione dei costi sono il miglioramento delle prestazioni e dell'affidabilità, i progressi tecnologici, le maggiori dimensioni delle turbine eoliche (se installate off-shore) e l'incremento della capacità di fabbricazione dei componenti. L'impiego di curve di apprendimento per valutare le future riduzioni dei costi è basato sull'ipotesi che si mantengano le tendenze attuali. In estrema sintesi, questa metodologia fornisce una determinata percentuale di riduzione dei costi per ogni raddoppio della produzione. Il tasso di apprendimento per l'energia eolica, secondo una recente analisi dell'AIE, è di circa il 10-20%. Con un tasso di apprendimento del 10%, il costo per MWh prodotto in un sito on-shore con alta intensità del vento sarebbe di circa 53 \$ al 2015.

Le strategie di lotta ai cambiamenti climatici di natura antropica e gli altri impatti negativi sull'ambiente, dovuti alla produzione di energia elettrica da fonti tradizionali, hanno portato alla definizione di numerosi strumenti pubblici di promozione delle energie rinnovabili (alcuni dei quali incentivano in modo specifico l'eolico) ed alla creazione di mercati delle emissioni. Altri fattori trainanti sono lo sviluppo tecnologico, la penuria di combustibili fossili ed il relativo incremento dei prezzi e le preoccupazioni crescenti in fatto di indipendenza energetica, la liberalizzazione del mercato elettrico, l'accrescimento della domanda di energia elettrica, soprattutto nelle economie emergenti. Altro elemento fondamentale nei paesi in via di sviluppo è la diffusione dell'energia elettrica nelle aree rurali (non collegate alla rete) e la riduzione della povertà.

Gli ostacoli che si frappongono alla crescita dell'eolico dipendono, fra l'altro, dall'incertezza sul futuro degli strumenti di incentivazione o dalla mancanza di tali strumenti (ad esempio, negli USA, la proroga annuale del sistema del "Production Tax Credit") e dalle preoccupazioni riguardanti l'impatto della non programmabilità

Esercizio e manutenzione

Costi di produzione dell'energia elettrica

Costi degli impianti off-shore

Riduzione dei costi

Prospettive Fattori trainanti la crescita

Ostacoli

della risorsa sull'affidabilità del sistema elettrico, l'accesso alla rete di trasmissione, la percezione degli impatti visivi ed ambientali, nonché la struttura dei mercati dell'energia elettrica prodotta da fonti tradizionali. L'evoluzione di questi mercati è stata guidata soprattutto dalla produzione da fonti tradizionali, anche se, in molti casi, essi sono stati ottimizzati per promuovere la partecipazione degli operatori eolici.

Scenari a lungo termine

Per l'energia eolica, si prevede un tasso annuale di crescita costante a due cifre. La pubblicazione dell'AIE "Energy Technology Perspectives 2008" (ETP) sottolinea che la l'eolico potrà realisticamente rappresentare il 9% (circa 2.700 TWh) di tutta l'energia elettrica prodotta nel mondo nel 2030¹. Al 2050, in base allo scenario avanzato "BLUE" dell'AIE, che sconta significative innovazioni tecnologiche, la quota eolica è realisticamente pari al 12% (circa 5.200 TWh)². Nella Figura 5, questi dati sono riportati per campi di variazione. Il "Global Wind Energy Council" ha elaborato uno scenario avanzato secondo il quale, se venissero precocemente messe in campo azioni più incisive, la produzione elettrica da fonte eolica potrebbe risultare ancora più elevata: 5.200 TWh nel 2030 e 7.200 TWh nel 2050. Gli scenari dell'AIE sono il risultato di un modello che prende in considerazione anche le tecnologie di generazione concorrenti.

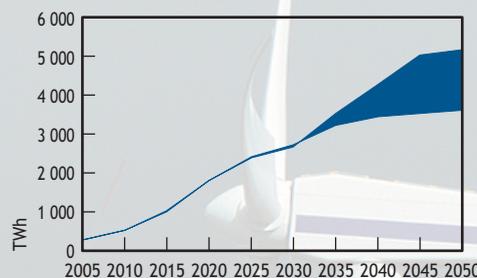


Figura 5. Scenari AIE-ETP: produzione potenziale di energia elettrica da fonte eolica (TWh) nel mondo

Aspetti di sistema

Variabilità della risorsa

Il funzionamento degli impianti eolici - come quello di altri impianti che sfruttano l'energia del moto ondoso, delle maree e l'energia solare - è condizionato dalla variabilità della risorsa disponibile. Il vento non soffia costantemente in un determinato sito. Di conseguenza, il fattore di potenza degli aerogeneratori è del 20-40% inferiore a quello delle centrali di base tradizionali. In genere, la variabilità viene percepita come un problema quando raggiunge valori elevati, ma non esiste alcun tetto di carattere tecnico alla variabilità potenziale delle fonti rinnovabili. Tuttavia, dato che le immissioni di energia nel sistema elettrico diventano variabili, anch'esso deve diventare più flessibile onde compensare l'eventuale deficit di produzione eolica. Nel sistema elettrico, gli impianti flessibili sono quelli che, nel mix di generazione, possono essere attivati rapidamente per il servizio di rampa, facendo aumentare o diminuire la produzione elettrica a seconda del fabbisogno. Ma il sistema può anche far fronte alle fluttuazioni della produzione da fonte eolica attraverso sistemi di accumulo, prelevando energia da altre zone o intervenendo sul lato domanda. Interventi operativi possono anche essere attuati sui mercati dell'energia elettrica e della capacità di trasporto.

Impatti ambientali

Costi esterni

I costi sociali ed ambientali dell'inquinamento sono raramente presi in considerazione quando si tratta di valutare i costi delle tecnologie di produzione di energia elettrica. Gli impianti eolici non utilizzano combustibili fossili e presentano un basso inquinamento ambientale nelle fasi di costruzione, esercizio e dismissione. Le emissioni di CO₂ degli impianti eolici sono limitate (circa 10 g di CO₂ per kWh prodotto). In base agli studi effettuati, se le normali valutazioni di costo prendessero in considerazione i costi esterni, l'energia eolica sarebbe già competitiva rispetto alla maggior parte delle altre tecnologie di produzione di energia elettrica.

Impatti locali

Se, da un lato, le forme di incentivazione dell'energia elettrica da fonte eolica sono in molti casi numerose, dall'altro gli aerogeneratori vengono talvolta considerati come visivamente intrusivi. Tecniche di micro-localizzazione possono essere adottate per ridurre l'impatto visivo, mentre le problematiche legate al rumore aerodinamico possono essere risolte, nella maggioranza dei casi, con norme adeguate che prevedano fasce di rispetto nelle aree con insediamenti abitativi. Inoltre, molte delle valutazioni ambientali, effettuate in risposta a preoccupazioni riguardanti l'eventuale impatto su avifauna, pipistrelli e sull'ambiente marino, hanno evidenziato che un'attenta localizzazione degli aerogeneratori può ridurre al minimo tali problemi.

¹ "Scenario "ACT", in cui le emissioni di CO₂ al 2050 rimangono stabili ai livelli attuali e vengono messi in atto interventi con un costo massimo di 50 \$/t di CO₂.

² "Scenario "BLUE", nel quale le emissioni di CO₂ al 2050 sono dimezzate rispetto ai livelli attuali e vengono messi in atto interventi con un costo massimo di 200 \$/t di CO₂.

Stato e sviluppo della tecnologia

Tecnologia degli aerogeneratori

Gli aerogeneratori catturano l'energia cinetica dal flusso d'aria in movimento (vento) e la trasformano in energia elettrica attraverso un rotore aerodinamico, che è collegato attraverso un sistema di trasmissione ad un generatore elettrico. La turbina standard odierna è formata da tre pale che ruotano su un asse orizzontale e che sono esposte direttamente alla direzione del vento prima della navicella ("upwind"), con un generatore sincrono o asincrono collegato alla rete. Esistono anche turbine a due pale con trasmissione diretta (senza moltiplicatore di giri).

La produzione di energia elettrica di un aerogeneratore è approssimativamente proporzionale all'area del rotore. Quindi, un minor numero di rotor più grandi (su torri più alte) può utilizzare la risorsa eolica in modo più efficiente di un numero maggiore di macchine più piccole. Attualmente, gli aerogeneratori di maggiori dimensioni hanno una potenza di 5-6 MW e un diametro del rotore che può arrivare a 126 m. Gli aerogeneratori hanno raddoppiato la propria taglia approssimativamente ogni 5 anni. Tuttavia, a causa di vincoli di trasporto, peso ed installazione, lo sviluppo delle turbine on-shore procederà probabilmente ad un ritmo più lento.

La durata di vita stimata di un aerogeneratore è di 20-25 anni. Tale durata potrà aumentare a mano a mano che la tecnologia diventerà più matura. Tuttavia, considerando la "giovane età" del settore ed i ripotenziamenti degli impianti con aerogeneratori di ultima generazione, pochi degli aerogeneratori esistenti sono in esercizio da un periodo sufficientemente lungo da convalidare questa ipotesi. Intense attività di collaudo e certificazione degli aerogeneratori confermano che la loro affidabilità (percentuale del tempo in cui sono tecnicamente esercibili) è di circa il 99%.

Grazie allo sviluppo tecnologico, si registrano incrementi di efficienza. Pale e "drive train" più efficienti, navicelle più leggere (rotore + generatore) e minor numero di componenti consentono una maggiore produzione di energia elettrica per unità di materiale necessario per il processo di fabbricazione. Questi incrementi di efficienza potranno, in una certa misura, controbilanciare l'innalzamento dei costi di capitale dovuto all'aumento dei prezzi delle materie prime (ad esempio, rame e acciaio).

Si può affermare che lo sviluppo della tecnologia eolica è trainato, in larga misura, dagli impianti off-shore. Attualmente, la maggior parte di questi impianti è ubicata a bassa profondità rispetto alla superficie del corpo idrico. Aerogeneratori galleggianti per localizzazioni off-shore a grande profondità sono in fase dimostrativa; un prototipo da 2,3 MW sarà installato nel 2009 al largo della costa norvegese nel Mar del Nord ed un altro da 2,5 MW sarà installato nel 2009 al largo delle coste della Puglia in Italia.

Altri settori di ricerca specifici per la tecnologia eolica riguardano la valutazione approfondita di: risorse eoliche, materiali con più elevato rapporto resistenza/massa, tecnologie avanzate di integrazione nella rete, monitoraggio e regolazione, controllo della qualità dell'energia elettrica prodotta, standardizzazione e certificazione, sviluppo di turbine per venti di bassa intensità, miglioramento delle previsioni, maggiore resistenza allo sforzo dei principali componenti (p.e. moltiplicatori di giri), migliori modelli di aerodinamica ed aeroelasticità, aerogeneratori basati sui superconduttori, fondazioni per impianti off-shore a grande profondità e "aquiloni" eolici ad alta quota.

Gli aerogeneratori di maggiori dimensioni

Durata di vitalità e disponibilità

Sviluppi tecnologici

Impianti off-shore a bassa e grande profondità

Priorità di ricerca e sviluppo

Italian translation of *Renewable Energy Essentials: Renewable Energy Essentials: Wind* ©OECD/IEA, 2010.

Sebbene la IEA sia l'autore della pubblicazione nella sua versione originale in inglese, la IEA non si assume nessuna responsabilità circa l'esattezza o la completezza della presente traduzione. Questa pubblicazione è tradotta sotto la sola responsabilità del Gestore dei Servizi Energetici - GSE, Italia