

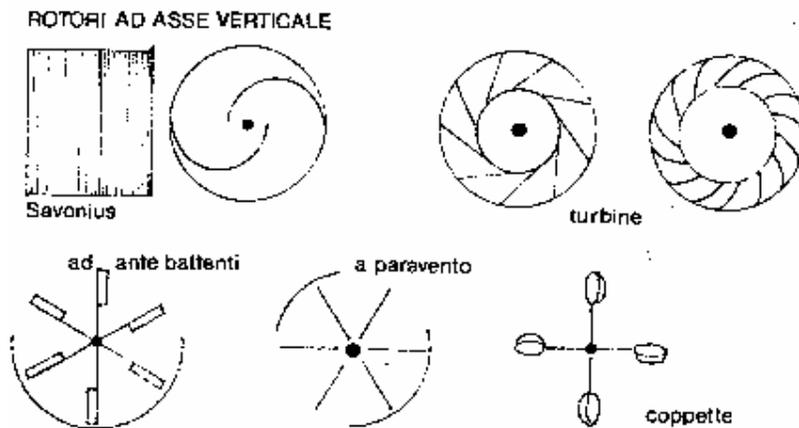
Impianti eolici

Descrizione della tecnologia

I sistemi eolici sfruttano l'energia cinetica del vento per trasformarla in energia motrice che può essere sfruttata direttamente (come nel caso dei tradizionali mulini a vento oppure per il pompaggio dell'acqua o ancora per applicazioni industriali) oppure essere a sua volta convertita in energia elettrica attraverso un aerogeneratore.

Il funzionamento di un aerogeneratore (o generatore eolico o turbina eolica) è legato alla presenza di masse d'aria in movimento con una velocità superiore ai 10 chilometri orari che fanno girare le pale di un elica; queste sono collegate ad un generatore che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica. Le pale del generatore eolico sono fissate su un elemento meccanico chiamato mozzo, assieme al quale vanno a formare l'elemento dell'aerogeneratore chiamato rotore. A seconda della posizione dell'asse attorno a cui ruota questo meccanismo, si distinguono rotori ad asse orizzontale e rotori ad asse verticale. La combinazione delle due tecnologie, di sviluppo più recente, ha dato vita ai cosiddetti rotori ibridi.

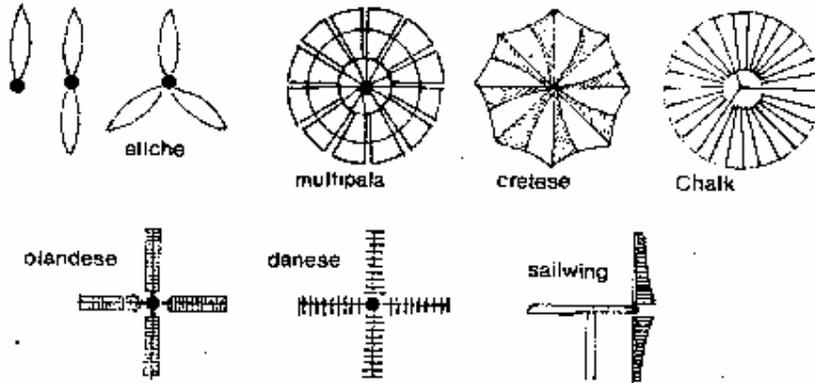
Nei sistemi ad *asse verticale* il rotore gira con un asse perpendicolare alla direzione del vento, mentre le pale si muovono nella stessa direzione. Hanno il notevole vantaggio di non doversi orientare secondo la direzione del vento. La ridotta quantità di parti mobili presenti nella struttura conferisce inoltre a tali aerogeneratori un'alta resistenza alle forti raffiche di vento e a condizioni di elevata turbolenza. Il rendimento dei sistemi ad asse verticale inferiore a quello proprio dei rotori ad asse orizzontale ne ha limitato l'impiego; le migliorie apportate negli ultimi tempi li hanno però resi più competitivi fino ad arrivare allo sviluppo di alcuni prototipi che, funzionando per un numero maggiore di ore all'anno rispetto alle turbine ad asse orizzontale, forniscono un rendimento complessivo maggiore.



fonte: IRECON ITALIA

Negli aerogeneratori ad *asse orizzontale* l'asse del rotore è parallelo alla direzione del vento ed il rotore ruota su un piano perpendicolare alla direzione del vento. Si possono avere turbine ad elica o turbine multipala: attualmente sono utilizzati i rotori ad elica soprattutto per grandi sistemi e rotori multipala per sistemi da pochi kW di potenza. Le elevate velocità di rotazione che si raggiungono con i sistemi ad elica si traducono in un alto coefficiente di potenza. I sistemi multipala riescono ad entrare in funzione anche a basse velocità del vento. I sistemi ad asse orizzontale, per garantire un rendimento costante ed elevato, devono poter seguire la direzione del vento in modo da mantenere l'allineamento tra la direzione del vento e l'asse del rotore; sono utilizzati a tal fine sistemi di regolazione meccanici o aerodinamici. Richiedono un'attenta progettazione.

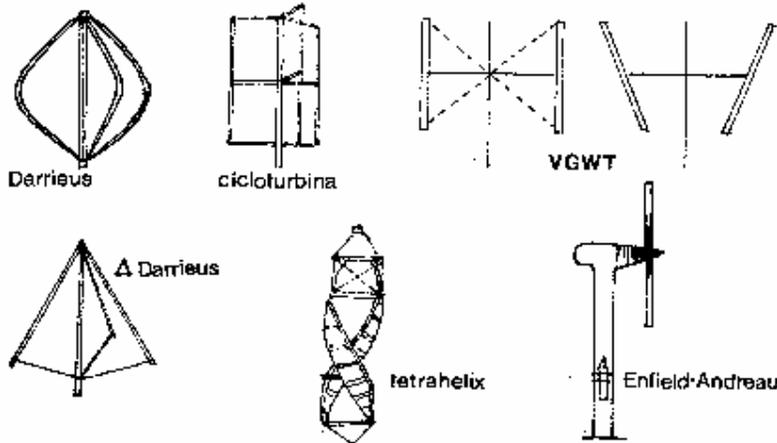
ROTORI AD ASSE ORIZZONTALE



fonte: IRECON ITALIA

I *sistemi ibridi* sono il frutto degli sviluppi della tecnologia eolica in cui si è cercato di riunire in un'unica soluzione i vantaggi propri sia dei sistemi ad asse orizzontale sia di quelli ad asse verticale. I rotori ibridi si presentano solitamente come sistemi che hanno delle pale aerodinamiche (derivate dalle eliche) che si muovono su un asse verticale; coniugano il vantaggio di raggiungere elevate velocità di rotazione e di non doversi allineare alla direzione del vento.

ROTORI IBRIDI



fonte: IRECON ITALIA

Gli aerogeneratori ad oggi più diffusi sono quelli ad asse orizzontale (i cui specifici componenti sono descritti in **Tab.1**), disponibili a partire da apparecchiature di piccola potenza per applicazioni domestiche di autoproduzione di elettricità fino ad arrivare a impianti di grandi dimensioni utilizzabili per realizzare vere e proprie centrali elettriche. I generatori eolici ad asse verticale, invece, trovano attualmente maggior applicazione per sistemi di piccola taglia, pur essendo giunti anch'essi, grazie agli sviluppi tecnologici, a prestazioni elevate che ne rendono possibile un impiego molto versatile, dall'uso domestico alla produzione centralizzata di grandi quantitativi di energia.

Tab.1 – Elementi che compongono un generatore eolico ad asse orizzontale

<i>Componente</i>	<i>Funzione</i>
Rotore	Composto dal mozzo su cui sono fissate le pale, è il meccanismo che viene messo in movimento ad opera del vento. Il numero delle pale è variabile (da 1 equilibrata con contrappeso alle numerose presenti nei cosiddetti “mulini multipala); i sistemi più diffusi sono a 2 o 3 pale. Le pale più diffuse sono in fibra di vetro.
Moltiplicatore di giri	Serve per trasformare la rotazione lenta delle pale, ovvero per aumentare il numero di giri compiuti dal rotore, in una rotazione più veloce grado di far funzionare il generatore di elettricità e migliorarne il rendimento.
Generatore	Trasforma l’energia meccanica in energia elettrica.
Sistema di controllo	Gestisce il funzionamento dell’aerogeneratore nelle diverse operazioni di lavoro e attiva il dispositivo di blocco in caso di problemi (malfunzionamento o sovraccarico prodotto da velocità del vento eccessive).
Sistema frenante	Costituito da due sistemi indipendenti di arresto delle pale: sistema di frenaggio aerodinamico impiegato, in caso di velocità del vento superiori al valore massimo impostato, sia per regolare la potenza erogata dal sistema sia per arrestare il rotore; sistema di frenaggio meccanico usato per completare l’arresto del rotore e come freno di stazionamento.
Navicella e sistema di imbardata	La navicella è la cabina in cui sono contenuti tutti i componenti precedentemente descritti (moltiplicatore, generatore, sistemi di controllo e frenata) ad eccezione del rotore che deve mantenersi libero di ruotare. Essa può girare di 180° attorno all’asse verticale che ne attraversa il baricentro in modo da mantenere allineato l’asse del rotore alla direzione del vento (movimento di imbardata). Negli aerogeneratori di maggiori dimensioni questo movimento di allineamento viene garantito da un servomeccanismo detto sistema di imbardata in cui un sensore (la banderuola) indica lo scostamento dell’asse del rotore dalla direzione del vento e attiva un motore che riallinea la navicella; nei sistemi più piccoli è invece sufficiente l’impiego di una pinna direzionale per garantire l’allineamento.
Torre e fondamenta	La torre è il supporto che sostiene la navicella e il rotore; può essere tubolare o a traliccio e in diversi materiali (legno, cemento armato, acciaio, fibre sintetiche). Le fondamenta, solitamente completamente interrato e in cemento armato, ancorano la torre al terreno in modo da garantire che la struttura resista alle oscillazioni e alle vibrazioni prodotte dal vento.

Gli impianti eolici possono essere installati sia come generatori di elettricità isolati dalla rete di distribuzione (e quindi direttamente a servizio di una specifica utenza) sia in collegamento con la rete elettrica (sia questa la rete centrale od una rete isolata).

Nel caso delle utenze isolate la turbina eolica è connessa con una batteria che accumula l’energia elettrica prodotta per renderla disponibile al momento del bisogno e vengono impiegati altri tipi di generatori elettrici (da tradizionali gruppi elettrogeni che utilizzano combustibili fossili a sistemi alternativi come pannelli fotovoltaici o altro) per garantire che il fabbisogno elettrico sia sempre soddisfatto anche in condizioni di assenza di vento. La presenza di reti elettriche isolate si ha su piccole isole o in aree remote e l’installazione di aerogeneratori supporta la produzione di elettricità erogata dalle altre centrali che alimentano la rete: tipicamente si hanno sistemi ibridi diesel-eolici dove il contributo di elettricità fornito dai generatori eolici riduce lo sfruttamento del combustibile fossile che alimenta la centrale termoelettrica. Sono realizzabili sistemi ibridi che sfruttano, invece che le fonti fossili, solo fonti rinnovabili (ovvero, oltre all’energia eolica, anche l’energia solare, le biomasse o altro).

L’allacciamento degli impianti eolici alla rete elettrica centrale può essere fatto sia per vere e proprie centrali eoliche (le cosiddette “wind-farm” costituite da più aerogeneratori collegati tra loro), sia per singole turbine di potenza medio-grande, ma anche per impianti di piccola taglia destinati ad una produzione elettrica di autoconsumo: in questo caso l’elettricità prodotta dalla turbina viene immessa nella rete elettrica che funge da accumulatore di capacità illimitata e da essa prelevata al momento del bisogno.

Per poter immettere in rete l'elettricità prodotta da un impianto eolico sono necessari, oltre al generatore che sfrutta l'energia del vento per produrre l'elettricità, i seguenti componenti:

- piccola rete locale controllata elettronicamente (usando degli inverter) cui è direttamente collegato il generatore eolico da cui viene erogata corrente con una frequenza soggetta a grande variabilità (in conseguenza della variabilità intrinseca nella sorgente eolica)¹;
- convertitore da corrente alternata (che, avendo una frequenza variabile, non può essere immessa nella rete pubblica) a corrente continua;
- inverter che converte nuovamente la corrente in corrente alternata, ma con frequenza esattamente uguale a quella della rete.

La gamma degli aerogeneratori disponibili sul mercato è molto vasta e va da mini-turbine con potenze anche inferiori a 1 kW (per l'alimentazione di apparecchiature poste in luoghi isolati, come ripetitori radio, rilevatori, impianti di segnalazione, ecc.) a sistemi in grado di erogare elevate quantità di energia utilizzabili per realizzare delle vere e proprie centrali elettriche. Più nel dettaglio, la classificazione comune degli impianti eolici in funzione della loro "taglia", ovvero della grandezza dei componenti e della potenza erogabile, è la seguente²:

- *turbine di piccola taglia* – rientrano in questo primo gruppo tutti gli impianti fino a 50 – 100 kW, impiegati sia in connessione alla rete elettrica che in applicazioni isolate. Il cosiddetto *minieolico* concerne generatori di altezza inferiore ai 30 m con una dimensione delle pale che parte da mezzo metro;
- *turbine di media taglia* – si tratta di impianti di potenza compresa tra i 100 e i 900 kW. Ad oggi l'aerogeneratore da 600 kW è quello più diffuso (si tratta di un generatore eolico con torre alta tra i 60 e i 100 m, con due o tre pale lunghe circa 20 m, in grado di soddisfare il fabbisogno elettrico giornaliero medio di circa 500 famiglie);
- *turbine di grande taglia* – riguardano impianti di potenza superiore ai 900 kW. La potenza che caratterizza i sistemi più utilizzati è pari a 1 – 1,5 MW ma sono stati realizzati generatori in grado di erogare anche picchi di 3 MW di potenza. Nel caso di turbine ad asse orizzontale la realizzazione di impianti di maggior potenza si traduce in un aumento delle dimensioni dei componenti (diametro del rotore e altezza della torre) che si scontra con limiti di fattibilità tecnica ed economica³. Il ricorso a generatori eolici di grande potenza permette di realizzare centrali elettriche che, a parità di energia erogata, richiedono l'installazione di un numero inferiore di impianti.

Specifiche tecniche per l'installazione e la manutenzione

L'energia elettrica erogata da un aerogeneratore è funzione dell'energia cinetica contenuta nel vento la quale, a sua volta, dipende dalla sua velocità (misurata in m/s o in km/h). Il legame tra la velocità del vento e la potenza elettrica erogata è rappresentato dalla *curva di potenza*. Esistono due soglie, una minima e una massima, entro le quali l'aerogeneratore eolico è in grado di produrre energia elettrica:

- per l'avviamento del rotore è necessaria una velocità minima, variabile a seconda del tipo specifico di generatore eolico ma comunque generalmente attorno a 3 m/s (pari a circa 11 km orari). Tale velocità minima definisce la soglia cosiddetta di *cut in*;
- quando il vento raggiunge velocità tali da poter generare danni alla turbina (ovvero superiori a 25 m/s pari a 90 km orari), entrano in funzione i dispositivi di sicurezza che

¹ I giri al minuto dell'aerogeneratore sono molto variabili come lo è la velocità del vento; ma la frequenza di rete deve essere costante a 50 hertz, perciò i rotor vengono collegati a una serie di inverter prima di immettere l'energia in rete.

² La tecnologia dei generatori eolici si è costantemente migliorata nel tempo e continua a farlo, con conseguenti miglioramenti in termini di rendimento ottenibile. I valori di potenza ad oggi raggiunti e presentati sono da ritenersi provvisori.

³ All'aumentare delle dimensioni dell'impianto è necessario adeguare le caratteristiche delle fondamenta e adottare efficaci soluzioni di ricovero in caso di improvvise raffiche di vento troppo forte.

mettono l'impianto fuori servizio. Oltre a questa soglia superiore, detta di *cut off*, l'aerogeneratore non produce energia elettrica. La velocità di *cut off* per miniturbine eoliche è attorno a 14 m/s.

La *potenza nominale* (o di progetto) che viene dichiarata per ogni turbina eolica è quella che il sistema fornisce con condizioni di vento pari a 12-15 m/s per gli impianti di taglia medio-grande e pari a 10 m/s per i sistemi di minieolico.

La potenza che il vento può cedere ad una turbina eolica è proporzionale al cubo della velocità del vento e alla superficie descritta dal rotore nel suo movimento. In ragione di ciò, per incrementare la potenza ottenibile da un aerogeneratore occorre:

- innalzare l'altezza della torre che sostiene il rotore (dato che la velocità del vento aumenta spostandosi dall'altezza del suolo verso l'alto);
- aumentare la superficie dell'elemento che funge da ostacolo al moto del vento (ovvero la dimensione delle eliche o delle pale).

Fissata l'altezza della turbina e la sua dimensione, esiste però un limite fisico alla trasformazione dell'energia cinetica, trasferita dal vento al rotore, in energia elettrica da parte dell'impianto eolico: la potenza massima utilizzabile dall'aerogeneratore per produrre energia elettrica è infatti pari al 59,3% della potenza cinetica del vento⁴.

Il rendimento complessivo del sistema dipende poi dall'efficienza di trasformazione, legata all'insieme di perdite che si verificano nella catena di trasformazione dell'energia meccanica in energia elettrica (perdite per dissipazioni che interessano il rotore, per la presenza di depositi – di ghiaccio o detriti - sulle pale, per fenomeni di attrito delle parti in movimento, per il rendimento dell'alternatore e degli inverter e per situazioni di fermo impianti). In relazione a tutti questi aspetti un aerogeneratore con un rendimento compreso tra il 40% al 50% viene considerato ottimo. A parità di condizioni, le turbine a rotazione orizzontale, con elica a tre pale, sono oggi le più efficienti.

Sono stati messi a punto rotor con pale mobili che variano la loro inclinazione al variare della velocità del vento, permettendo di mantenere costante la quantità di elettricità prodotta dal generatore. Altri sviluppi tecnologici hanno introdotto sistemi con configurazione a velocità variabile del rotore, soluzione che consente di estrarre maggiore energia dal vento, soprattutto nei siti a bassa ventosità.

Il primo passaggio per l'installazione di un impianto eolico consiste nella valutazione delle caratteristiche di ventosità del sito in cui si intende mettere a dimora l'impianto (valutazione che deve considerare sia la velocità mediamente presente, la direzione dominante e la durata annua in cui si ha mediamente un vento "utile", sia gli eventuali fenomeni "di picco" che portano allo spegnimento del generatore). In base a questa analisi (che richiede registrazioni, dei vari parametri di interesse, sistematiche e per periodi abbastanza lunghi) e in funzione del fabbisogno energetico che si intende soddisfare con l'aerogeneratore, si potrà successivamente verificare quale modello e quale assetto specifico sono in grado di sfruttare il potenziale del sito per erogare la corrente richiesta dall'utenza⁵.

Nella scelta del luogo dove installare gli impianti vanno valutati anche gli aspetti relativi all'impatto ambientale e alla sicurezza (il movimento delle pale non deve infatti essere fonte di pericolo per le

⁴ Limite di Betz – Quando si interpone un ostacolo al moto di una massa d'aria (come nel caso del rotore di una turbina eolica), questa, nel superare l'ostacolo stesso, gli cede parte della sua energia cinetica; indipendentemente dalla forma dell'ostacolo, la massima energia che la massa d'aria in movimento può cedere all'ostacolo è pari a 16/27 (ovvero al 59,3%) dell'energia cinetica posseduta dall'aria prima dell'ostacolo.

⁵ Ogni impianto eolico ha la propria curva di potenza da cui si ricava l'energia elettrica erogata nelle varie condizioni di vento; sapendo la durata annua di ogni situazione di ventosità si deriva l'ammontare complessivo di energia elettrica ottenibile dall'impianto.

strutture e le persone circostanti). Particolare attenzione deve essere posta all'ancoraggio dell'impianto da cui dipende la sua capacità di resistere alle sollecitazioni esercitate dal vento. La struttura portante, oltre a resistere all'impatto del vento, deve inoltre sopportare senza cedimenti il peso della turbina e le sollecitazioni prodotte dal moto delle pale. Le strutture di sostegno devono infine essere dotate di dispositivi che permettano un accesso sicuro alle parti del generatore che possono essere oggetto di manutenzione.

Le esigenze di manutenzione di un generatore eolico sono molto ridotte, grazie al fatto che il moto del sistema è caratterizzato da bassi attriti e conseguente assenza di surriscaldamento (situazione che non richiede la presenza di sostanze refrigeranti).

Campo di applicabilità e di convenienza

Il ricorso ad aerogeneratori per la produzione di energia elettrica presuppone necessariamente la presenza di una adeguata risorsa eolica da sfruttare, ovvero venti con sufficiente intensità, la cui energia non venga ridotta dalla presenza di ostacoli, e di durata piuttosto costante (almeno 6 ore al giorno). La tecnologia si sta però sviluppando in modo da offrire soluzioni impiantistiche che possono trovare conveniente applicazione anche in siti a bassa ventosità, grazie all'incremento dell'efficienza dei sistemi. L'identificazione dei siti ove installare impianti eolici deve avvenire tenendo conto anche della compatibilità paesaggistica e ambientale delle turbine con il territorio circostante e dei vincoli eventualmente fissati dalle autorità locali.

Le migliori collocazioni delle turbine eoliche di taglia medio-grande sono vicino alle coste, lungo i crinali montuosi o in aree interne con bassi valori di rugosità del terreno, ovvero sia ampi spazi con una bassa presenza di rilievi e ostacoli⁶. Sulla terra ferma la posizione ottimale di un aerogeneratore è su un suolo aperto (come terreni non coltivati con bassa vegetazione o aeroporti) con pendenza compresa tra 6 e 16 gradi⁷. La velocità del vento deve essere almeno pari a 5,5 m/s e il vento deve soffiare con costanza per gran parte dell'anno. Nelle applicazioni in mare aperto (offshore) le condizioni migliori corrispondono a venti con velocità superiore a 7-8 m/s e con fondali piuttosto bassi (da 5 a 40 m), con una messa a dimora delle turbine a circa 3 km dalla costa.

L'Italia può contare su venti di buona intensità specie nelle zone mediterranee meridionali o nelle isole; i siti più idonei allo sfruttamento dell'eolico si trovano lungo il crinale appenninico al di sopra dei 600 m slm e, in misura minore, nelle zone costiere.

Gli impianti di mini-eolico sono invece caratterizzati dalla possibilità di operare economicamente con condizioni di vento medie, ovvero regimi inferiori a quelli richiesti dai sistemi di taglia superiore, e trovano una adeguata collocazione sia in ambienti agricoli che presso insediamenti artigianali e industriali. Le miniturbine eoliche possono essere installate su tetti o terrazzi degli edifici oppure a terra con o senza strutture di sostegno (torri o tralicci): i sistemi ad asse orizzontale devono necessariamente essere collocati in alto, sfruttando una struttura di sostegno, sia per questioni di prestazione che di sicurezza, mentre i sistemi ad asse verticale rendono meglio se posti in alto ma possono anche poggiare sul terreno. La tipologia architettonica tipica degli edifici artigianali o industriali solitamente permette una buona captazione del vento, rendendo così di particolare interesse l'impiego di miniturbine eoliche (che possono anche essere affiancate ad altri dispositivi che producono energia elettrica da fonte rinnovabile come i pannelli fotovoltaici).

Il minieolico è nato per soddisfare il fabbisogno di utenze isolate, accoppiato a batterie o generatori diesel, ma negli ultimi anni si sta diffondendo anche in utenze connesse alla rete, principalmente per autoconsumo.

⁶ Più un terreno è rugoso, cioè presenta variazioni brusche di pendenza, boschi, edifici e montagne, più sono gli ostacoli al moto del vento che ne riducono la velocità.

⁷ Per quanto riguarda i rilievi montuosi, si è constatato che, mentre i pendii ripidi creano turbolenze pericolose per la stabilità e negative per il rendimento del generatore eolico, quelli più gradualmente favoriscono la concentrazione del vento.

Nelle applicazioni degli impianti eolici per produzioni in larga scala, l'intermittenza (o "aleatorietà") della potenza elettrica prodotta, causata dalla natura incostante del vento⁸, fa sì che il funzionamento dei sistemi non possa essere controllato per adattare l'energia prodotta alla richiesta delle utenze, almeno finché non saranno sviluppate tecnologie di immagazzinamento dell'energia largamente sfruttabili e convenienti. Ciò comporta l'impossibilità di creare reti elettriche alimentate esclusivamente con centrali eoliche.

Poiché lo sfruttamento dell'energia eolica è iniziato ormai diverso tempo fa, la tecnologia ha raggiunto livelli tali da consentire oggi lo sfruttamento economicamente vantaggioso di questa risorsa rinnovabile. Il costo di installazione di un aerogeneratore è relativamente basso se raffrontato ad altre tecnologie energetiche "pulite" di sviluppo più recente, come ad esempio il fotovoltaico. Attualmente il costo di installazione in Italia, facendo riferimento ad impianti con una potenza nominale superiore ai 600 kW, varia tra gli 850 e i 1300 €/kW; il prezzo ovviamente varia secondo la complessità dell'orografia del terreno in cui l'impianto vada installato. Una centrale di 10 MW, allacciata quindi alla rete in AT, costerebbe tra gli 8 e i 13 milioni di euro, mentre per una centrale allacciata alla rete di MT (3-4 MW) il costo si comprime tra 0,9 e 1,2 milioni di Euro al MW. Per le miniturbine eoliche il prezzo di installazione risulta leggermente più elevato attestandosi attorno ai 1000-1500 €/kW. Il costo annuo di esercizio e manutenzione è in genere pari al 3% dell'investimento.

La concorrenza di mercato nel settore eolico e la ricerca tecnologica sui materiali e sulle tecniche premono costantemente al ribasso dei prezzi. Oggi, il costo di un kWh di energia elettrica da eolico è ben 5 volte inferiore rispetto a quello degli anni '80: al 2004, secondo l'International Energy Agency, il costo medio di produzione dell'energia eolica era compreso tra 0,04-0,08 €/kWh; stime più recenti indicano un costo inferiore che farebbe presupporre nel breve termine un costo di 0,03 €/kWh del tutto concorrenziale rispetto ai costi dell'energia generata da fonti convenzionali. Il continuo ribasso dei prezzi nel settore eolico (negli ultimi dieci anni la riduzione del costo di produzione di energia da fonti eoliche si è attestata sul 30%-50% e si prevede che la tendenza rimanga costante). è favorito anche dalla crescita del mercato e dalle conseguenti economie di scala delle imprese. E' quindi probabile che nel prossimo futuro tenda ulteriormente a diminuire.

Tab.2 – Investimenti e costi dell'energia per impianti eolici e impianti termoelettrici (fonte ENEA – 2003)

Tipo impianto	Potenza impianto MW	Potenza aerogeneratore kW	Costo investimento €/kW	Velocità vento m/s	Costo energia €/kWh
Impianto eolico a terra	10	500-750	800 - 1000	6-7	0,04-0,07
Impianto eolico offshore	4,95	450	2200	7,5	0,08
Impianto a carbone			1000-1350		0,05-0,09
Impianto a gas			500-700		0,03-0,04

Considerazioni ambientali

Uno dei maggiori limiti alla diffusione delle centrali eoliche è dato dalle preoccupazioni sul loro impatto ambientale, in termini di:

- occupazione del territorio da parte delle strutture e delle opere di supporto;
- impatto visivo delle turbine che vanno a modificare il paesaggio in cui si inseriscono;

⁸ A differenza degli impianti che sfruttano la radiazione solare, presente solo nella fase diurna di una giornata, la risorsa utilizzata dagli aerogeneratori - il vento - può essere presente tanto di giorno quanto di notte ma pur sempre in maniera incostante.

- impatto sull'avifauna;
- emissione di rumore.

Occorre pertanto fare chiarezza sull'entità reale di tali impatti, in modo da poter utilizzare appieno l'energia eolica e cogliere tutti gli aspetti positivi che essa comporta: è una fonte rinnovabile ed è pulita perché non provoca emissioni dannose per l'uomo e per l'ambiente quali le sostanze inquinanti e i gas serra rilasciati dalle centrali convenzionali. Con il ricorso a centrali eoliche in sostituzione di centrali termoelettriche, il computo delle emissioni evitate per ogni kWh prodotto è pari a 1 kg di CO₂, 1,4 g di SO₂, 1,9 g di NO_x.

Gli aerogeneratori non hanno alcun tipo di impatto radioattivo o chimico, visto che i componenti usati per la loro costruzione sono materie plastiche e metalliche.

Il bilancio energetico tra il quantitativo di energia speso per la produzione di una turbina eolica e il quantitativo di elettricità erogato durante la sua vita è positivo: rispetto al consumo di energia associato al ciclo di vita di un aerogeneratore, questo riesce ad erogarne una quantità pari almeno a 5 volte tanto per i sistemi meno efficienti, fino ad arrivare a valori molto superiori per alcune tipologie di turbine.

Relativamente all'occupazione di territorio, i generatori eolici e le opere di supporto occupano solo il 2-3 % del territorio necessario per la costruzione di un impianto e la parte non occupata può essere impiegata per agricoltura o pastorizia.

Essendo posti in alto e generalmente su spazi aperti, gli aerogeneratori sono visibili anche da grande distanza (più elevate sono le dimensioni, maggiore è la distanza da cui possono essere visti). Una scelta accurata della forma e del colore dei componenti consente di armonizzare la presenza degli impianti eolici nel paesaggio mitigandone così l'impatto visivo.

Dal punto di vista delle ricadute per l'avifauna è opinione diffusa che gli impianti eolici rappresentino una fonte di pericolo, uccidendo gli uccelli che vi volano in mezzo. In realtà, gli studi condotti hanno rilevato una mortalità bassissima e molto inferiore a quella causata dalle finestre dei normali edifici e dalle automobili. Nella scelta dei siti ove installare gli aerogeneratori andranno comunque evitati ambiti che si trovano sulle rotte di migrazione degli uccelli.

L'attrito tra le pale della turbina e l'aria produce un'emissione sonora che può essere ridotta migliorando l'inclinazione delle pale e la loro conformazione. Il rumore generato invece dal moltiplicatore di giri può essere mitigato mediante isolamento acustico della navicella. Oltre a ciò, anche la scelta del tipo di turbina influisce sul rumore emesso: nei sistemi ad elica, i rotori a due pale sono più rumorosi e presentano più vibrazioni rispetto a quelli a tre pale.

Fonti

- *"Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & cases textbook – Wind Energy Project Analysis"*, RETScreen International – Clean Energy Decision Support Center, Minister of Natural Resources Canada, 2001-2004; www.retscreen.net
- *"L'energia eolica"* – opuscolo n°19 collana "Sviluppo Sostenibile", ENEA, settembre 2003. <http://efficienzaenergetica.acs.enea.it>
- *"Wind power plants – Fundamentals, design, construction and operation"*; Robert Gasch, Jochen Twele; James & James Science Publishers Ltd, Solarpraxis AG.
- *"Proposte per lo sviluppo del minieolico in Italia"*, Legambiente, settembre 2006, Eolica Expo – Roma.
- *"Energia eolica – Il Minieolico"*; David Chiamonti, Marco Paccinotti; Ultimo aggiornamento Maggio 2006; Dipartimento di Energetica "S.Stecco" – Università degli studi di Firenze, Facoltà di Ingegneria
- International Energy Agency, www.iea.org
- *"Il conto in banca dell'energia: il ritorno energetico sull'investimento energetico (EROEI)"*, Ugo Bardi, febbraio 2005, www.aspoitalia.net