

**energia!lab**

*il laboratorio per la gestione dell'energia*

---

**Scheda monografica di sintesi:**  
Produzione di energia da fonti rinnovabili

# **Energia Eolica**

A cura di:

**lab e lab**

---

*Via Mirasole 2/2 40124 Bologna (BO)*

## STORIA[1]

Il vento, come l'acqua, è la prima e più antica sorgente di energia meccanica d'origine naturale, sperimentata dall'uomo; vento ed acqua, figlie del sole, sono due fonti inesauribili di energia.

Quando si parla di energia eolica, la maggior parte delle persone ricorre con la mente ai mulini a vento tipici degli olandesi. In realtà, già nell'antica Mesopotamia, il vento era una fonte di energia che gli uomini dell'antico Medio Oriente impararono ad intrappolare in grosse tele ed a sfruttare come forza motrice alternativa a quella animale.

Qualche geniale tecnico del 1700 a.C. infatti pensò di utilizzare lo stesso principio dei mulini a vento ad asse verticale, azionati dalla forza dei buoi, per creare dei rudimentali mulini a vento, con le pale parzialmente coperte in modo da vincolare la rotazione in un solo verso.

In Asia, al contrario, sono state trovate tracce, risalenti pressappoco a quel periodo o poco dopo, di un mulino ad asse orizzontale con quattro pale "faccia al vento". Anche i primi mulini persiani, dei quali sono state trovate tracce, erano ad asse verticale. Un tronco portava da quattro ad otto bracci orizzontali che, a loro volta, sostenevano delle pale verticali. La tecnologia "eolica", per secoli, non subì grandi innovazioni, in quanto non prese mai il sopravvento rispetto alle altre fonti di energia naturale che utilizzavano metodi analoghi ma più facilmente individuabili e in ogni caso più "economici".

In primo piano l'energia idraulica che, sebbene variabile durante l'anno (periodi di piena si alternavano a periodi di secca), era meno mutevole del vento. Intorno al 1200 d.C., nel periodo delle crociate, i mulini a vento erano comunque già abbastanza radicati nel Medio Oriente, soprattutto ove non c'era disponibilità di acqua. Dopo il Medioevo, quando la tecnologia si spostò dal Mediterraneo verso i paesi del nord, s'iniziarono a vedere maggiori sviluppi dell'energia eolica. Le pale divennero più robuste e resistenti, per sopportare i venti più forti presenti in quelle zone con la superficie d'impatto più affilata verso l'esterno e per bilanciare le diverse velocità tangenziali della pala.

La torre, che sosteneva le pale, era ben ancorata alle fondamenta ed era mobile solamente nella parte alta, dove c'è il "longherone" (trave di sostegno) e l'asse delle pale.

Fu intorno al 1600, però, che i tecnici introdussero le tecnologie più raffinate. Prima fra tutte fu quella dei profili delle pale che meglio sfruttano la "portanza". Infatti, non è tanto l'impatto ortogonale del vento al piano di rotazione delle pale che fornisce maggior potenza (resistenza), ma quello laterale che sfrutta i profili aerodinamici (portanza) delle pale stesse. Dall'undicesimo secolo, sino alla fine del secolo diciannovesimo, l'uomo utilizzò la forza del vento (e dell'acqua) come una delle fonti primarie di energia. L'uso era, principalmente, meccanico: pompaggio, macina del grano, conerie, segherie, ecc..

L'invenzione della dinamo, da parte del belga Gramme, nella metà del diciannovesimo secolo, aprì nuovi orizzonti all'utilizzazione dell'energia idraulica ed eolica e nel 1887 il francese Duc de La Peltrie costruì il primo aerogeneratore realizzato in Europa e destinato alla produzione di energia elettrica. Dopo le prime applicazioni veniva dato il via allo sfruttamento dell'energia eolica nell'industria. Nel medesimo periodo anche gli Stati Uniti realizzavano la possibilità di produrre energia elettrica sfruttando il vento e Charles F. Brush, nel 1890, sperimentò nell'Ohio un "mulino a vento" per produrre elettricità.

Le necessità dell'industrializzazione esasperata di quegli anni, però, obbligò la ricerca e la produzione a rivolgersi verso altre fonti diverse abbandonando l'interesse verso i mulini e l'energia eolica. Nel 1970 la crisi petrolifera sconvolse le economie dei paesi industrializzati e spinse gli studiosi alla ricerca di energie alternative; fra esse ritrovò vita ed interesse l'energia eolica che ritornò in auge. Fra gli Stati che si distinsero, per la ricerca e le installazioni, ritroviamo gli Stati Uniti e in Europa la Danimarca. In particolare quest'ultima sviluppò le ricerche e le installazioni di parchi eolici evidenziando l'importanza delle energie alternative (e rinnovabili) per la tutela dell'ambiente. Oggi, la Danimarca detiene la leadership nel settore eolico sia nella ricerca, sia nella produzione e realizzazione di impianti; seguono, in ordine di importanza, la Germania e gli Stati Uniti. In Italia gli sviluppi sono stati abbastanza modesti anche se negli ultimi anni è iniziata una crescita degna di considerazione, in particolare nelle regioni meridionali (Campania e Puglia), più adatte ad ospitare dei parchi eolici e più attente ad indirizzare i propri investimenti verso fonti di energia alternativa e rinnovabile, anche in funzione della tutela dell'ambiente.

## COME NASCE IL VENTO[2]

È noto che l'aria calda ha una densità inferiore rispetto a quella fredda, quindi tende a salire occupando il posto di quella fredda che tende a scendere. Pertanto questa differenza di densità è la forza spingente di questo rimescolamento dell'aria da cui ha origine il vento. Come si può intuire l'energia eolica deve essere considerata un effetto dell'energia solare. Il sole irradia sulla terra  $1.74 \cdot 10^{17}$  W di potenza, di questa circa il 2% viene convertita in energia eolica. In particolare si è calcolato che l'aria calda, salendo, raggiunge un'altezza di circa 10 km per poi giungere ai due poli; in virtù della rotazione terrestre il vento si sparge in tutto il pianeta: infatti se mancasse tale rotazione, il percorso dell'aria sarebbe equatore-poli e viceversa. La direzione dei venti è invece influenzata dalla forza apparente di Coriolis la quale provoca uno spostamento verso destra nell'emisfero settentrionale e una conseguente rotazione antioraria delle correnti ventose (il contrario avviene nell'emisfero meridionale). L'energia del vento è legata al movimento di masse d'aria che si spostano al suolo da aree ad alta pressione atmosferica verso aree adiacenti di bassa pressione, con velocità proporzionale al gradiente di pressione.

## AEROGENERATORI [8]

L'energia eolica è una fonte di energia rinnovabile, molto diffusa e disponibile sotto forma meccanica che a sua volta può essere trasformata con un buon rendimento in elettricità ma è utilizzabile anche per il pompaggio e per uso industriale. Le macchine in grado di trasformare l'energia eolica in energia meccanica di rotazione sono detti aerogeneratori. Essi sono costituiti essenzialmente da un sostegno che porta alla sua sommità la gondola o navicella, costituita da un basamento o da un involucro esterno; nella gondola sono contenuti l'albero di trasmissione lento, il moltiplicatore di giri, l'albero veloce, il generatore elettrico e i dispositivi ausiliari.

All'estremità dell'albero lento e all'esterno della gondola è fissato il rotore, costituito da un mozzo, sul quale sono montate le pale. Il rotore può essere posto sia sopravvento che sottovento rispetto al sostegno.

La gondola è in grado di ruotare rispetto al sostegno allo scopo di mantenere l'asse della macchina sempre parallelo alla direzione del vento ed è per questo che l'aerogeneratore viene definito "orizzontale". Opportuni cavi convogliano al suolo l'energia elettrica prodotta e trasmettono i segnali necessari per il funzionamento.

La forma delle pale è disegnata in modo che il flusso dell'aria che le investe azioni il rotore. Dal rotore, l'energia cinetica del vento viene trasmessa a un generatore di corrente collegato ai sistemi di controllo e trasformazione tali da regolare la produzione di elettricità e l'eventuale allacciamento in rete. L'aerogeneratore opera a seconda della forza del vento; al di sotto di una certa velocità la macchina è incapace di partire; perché ci sia l'avviamento è necessario che la velocità raggiunga una soglia minima di inserimento, diversa da macchina a macchina (circa 4-5 m/s).

Durante il funzionamento la velocità del vento "nominale" è la minima velocità del vento che permette alla macchina di fornire la potenza di progetto (10-12 m/s per qualche centinaia di kW per macchine di media taglia). Ad elevate velocità (20-25 m/s) l'aerogeneratore viene posto fuori servizio per motivi di sicurezza.

## **ANALISI DETTAGLIATA DEI COMPONENTI DI UN AEROGENERATORE [2, 9, 10, 11]**

La figura 1 di seguito riportata illustra in modo chiaro ed esauriente i componenti di una turbina eolica:

- Il rotore (rotor)
- La navicella o gondola (nacelle)
- L'albero di trasmissione lento (low-speed shaft)
- Il moltiplicatore di giri (gearbox)
- Il meccanismo di imbardata (yaw mechanism)
- La torre o sostegno (tower)
- L'albero di trasmissione veloce (high-speed shaft)
- Il sistema di frenaggio (brake)
- Il generatore elettrico (generator)
- Il controllore elettronico (controller)
- L'anemometro (anemometer)
- La banderuola (wind vane)
- Il sistema di raffreddamento (cooling unit), non riportato in figura 1.



lavorano sottovento. Il meccanismo d'imbardata è azionato da un controllore elettronico, il quale riceve ed elabora le informazioni sulla direzione del vento ricevute da una banderuola. Di solito l'angolo d'imbardata varia di pochi gradi per volta, quindi in modo graduale, ogni qual volta si registra una variazione di direzione del vento.

La torre sostiene il peso della navicella e del rotore, e svolge pertanto la funzione di struttura portante dell'intero aerogeneratore. In linea di principio un'elevata altezza della torre rappresenta un vantaggio, in quanto la velocità del vento aumenta con la quota dal suolo (per la spiegazione di tale fenomeno si rimanda alla teoria dello strato limite riportata nel paragrafo successivo). Ovviamente l'aumento dell'altezza della torre è limitato da problemi di stabilità strutturale e di costi. In seguito agli studi effettuati ed all'esperienza maturata col passare degli anni, la progettazione prevede altezze delle torri che rappresentano un buon compromesso tra le problematiche evidenziate in precedenza: le moderne turbine eoliche da 1 MW hanno un'altezza variabile tra i 50 e gli 80 m. Le torri possono essere tubolari o a traliccio: le prime sono più sicure, in quanto consentono al personale di servizio ed ai tecnici di accedere alla navicella ed al rotore attraverso una scala interna; tuttavia le torri a traliccio sono meno costose.

L'albero di trasmissione veloce lavora a 1500 RPM ed alimenta il generatore di energia elettrica. Esso è dotato di un disco di frenaggio meccanico d'emergenza.

Il sistema di frenaggio può essere di tipo idraulico, meccanico o elettrico. Il primo tipo è montato sull'albero di trasmissione lento e viene utilizzato durante il normale funzionamento della turbina eolica; il secondo tipo è montato sull'albero di trasmissione veloce e viene utilizzato nei casi di emergenza, come la rottura del sistema di frenaggio idraulico, o durante le fasi di manutenzione e di riparazione; il terzo tipo è usato in configurazioni particolari e più sofisticate di aerogeneratori.

Il generatore elettrico (detto anche alternatore) è una macchina elettrica che trasforma energia meccanica (che in questo caso è fornita dalla forza del vento, ma in generale può provenire da motori, turbine idrauliche, a vapore o a gas, motori a carburazione e Diesel, ecc.) in corrente elettrica alternata. Gli alternatori sono costituiti da due parti fondamentali, una fissa e l'altra rotante, dette rispettivamente statore e rotore, su cui sono disposti avvolgimenti di rame isolati. I due avvolgimenti si dicono induttore e indotto; a seconda del tipo di alternatore l'induttore può essere disposto sul rotore e l'indotto sullo statore e viceversa. Gli alternatori sincroni sono macchine reversibili, ossia possono funzionare anche come motori (cioè si mettono in movimento rotatorio se ricevono energia elettrica). In essi generalmente si dispone sullo statore l'avvolgimento indotto e sul rotore l'induttore. Quest'ultimo è realizzato con elettromagneti eccitati in corrente continua (poli). Gli alternatori a magnete permanente, simili ai precedenti, utilizzano magneti permanenti in sostituzione dei poli di eccitazione. Negli alternatori a ferro rotante gli avvolgimenti indotti e induttori sono fissi e la produzione di energia elettrica si ottiene con il movimento del rotore, costituito da un cilindro di ferro lamellato sul cui bordo sono ricavati denti che assolvono la stessa funzione dei poli negli alternatori sincroni. Gli alternatori asincroni sono costituiti da motori asincroni fatti rotare da motori primi a velocità leggermente maggiore di quella di sincronismo. Gli alternatori necessitano di un continuo raffreddamento durante il loro funzionamento. Sulla maggior parte delle turbine eoliche ciò avviene incapsulando il generatore elettrico in un tubo, nel quale si trova un grande ventilatore, che ha il compito di raffreddare l'aria; poche industrie del settore eolico adottano la soluzione del raffreddamento ad acqua: infatti, se da un lato i

generatori elettrici raffreddati ad acqua offrono la possibilità di ottenere una configurazione più compatta, che si traduce in un aumento dell'efficienza elettrica, dall'altro richiedono la presenza di un radiatore all'interno della navicella per lo smaltimento del calore generato dal sistema di raffreddamento ad acqua.

La connessione alla rete elettrica può essere di tipo diretto o indiretto: nel primo caso il generatore è collegato direttamente ad una rete trifase a corrente alternata, mentre nella seconda configurazione la corrente passa dalla turbina in una serie di apparecchiature elettriche, che servono ad adattarla alla rete di trasmissione esterna. I generatori asincroni provvedono automaticamente a questo adattamento. Nella figura 2 è rappresentato un alternatore.

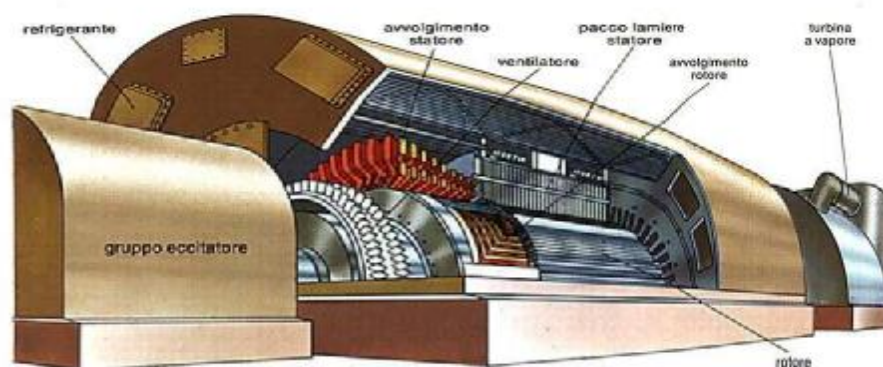


Figura 2: generatore elettrico (alternatore)

Il controllore elettronico contiene un computer, che ha il compito di verificare le condizioni generali dell'aerogeneratore e di comandare il meccanismo di imbardata. Nel caso si segnalino delle anomalie o malfunzionamenti, come il surriscaldamento del moltiplicatore di giri o del generatore di corrente, il controllore provvede a fermare immediatamente l'aerogeneratore e ad avvisare il personale attraverso un collegamento (generalmente effettuato via modem).

L'anemometro e la banderuola sono strumenti che rilevano rispettivamente la velocità e la direzione del vento. Le indicazioni fornite dall'anemometro sono analizzate dal controllore elettronico, che provvede a far funzionare l'aerogeneratore se la velocità del vento si mantiene all'interno del range delle velocità di set-point (da 5 a 25 m/s) o a non farlo partire o a bloccarlo in caso contrario. Le informazioni fornite dalla banderuola servono invece al controllore elettronico a direzionare la turbina sopravvento, utilizzando il meccanismo d'imbardata.

Infine, come già accennato, il sistema di raffreddamento è dotato di un ventilatore, oppure di un sistema di raffreddamento ad acqua, che servono a raffreddare il generatore elettrico e di un'unità di raffreddamento dell'olio contenuto nel moltiplicatore di giri.

### **AERODINAMICA[2, 7, 8, 9]**

La progettazione della pala deve tener conto dell'esigenza di assicurare a essa un'adeguata resistenza a fatica che consenta di prevedere una vita economicamente accettabile e una buona efficienza. I carichi variabili sulla pala durante la sua rotazione sono dovuti al peso proprio e a quello di eventuali manicotti di ghiaccio, alle rapide

fluttuazioni in direzione e intensità della velocità del vento, al fenomeno dello strato limite (l'intensità del vento che investe le parti più alte del rotore è maggiore di quella che investe le parti più basse). Quest'ultimo fenomeno si registra ogni volta che un fluido investe una superficie solida: infatti una corrente fluida subisce un rallentamento che avviene in una regione ben definita e limitata, vale a dire lo strato limite; esso inizia all'interfacies fluido-solido ove la velocità del fluido è nulla e termina ove la velocità raggiunge il 99% di quella di bulk (nel bulk fluido la velocità si assume uniforme e costante mentre all'interno dello strato limite si ha un profilo crescente di velocità). Una descrizione qualitativa del funzionamento di un aeromotore risulta più immediata ricorrendo al paragone con l'aerodinamica di un aereo. Come è noto, una superficie avente sezione a profilo alare posta in un flusso d'aria è soggetta a una forza risultante di due componenti: la portanza, perpendicolare alla velocità del vento, e la resistenza, parallela alla velocità del vento. Queste due forze dipendono, tra gli altri fattori, dal tipo di profilo e, per ogni profilo, dall'angolo con cui il flusso d'aria investe l'ala. Negli aeroplani la portanza è la forza utile che sostiene il peso dell'aereo, mentre la resistenza è quella forza compensata dalla spinta di propulsione dell'aereo stesso. Analogamente, in un rotore eolico, ogni sezione della pala si comporta come un profilo alare posto in un flusso d'aria la cui velocità è data dalla risultante della velocità del vento naturale e della velocità del vento dovuto alla rotazione della pala stessa (pari, quest'ultima, e contraria alla velocità periferica di rotazione della sezione). In sostanza, negli aerei grazie al profilo dell'ala, la vena fluida al di sopra di essa ha una velocità più elevata rispetto alla vena fluida inferiore: ciò determina una spinta perpendicolare all'ala (la portanza è sempre ortogonale alla velocità del vento) che è noto come "effetto lift".

La direzione e l'intensità del flusso d'aria risultante variano da una estremità all'altra della pala, dato che la componente dovuta alla rotazione della pala varia con la distanza dal centro del rotore. Il vento causa, come si è detto, una forza risultante, la cui componente sul piano di rotazione partecipa al movimento del rotore mentre quella parallela alla direzione del vento sarà assorbita dal sostegno. L'insieme delle componenti utili di tutte le sezioni delle pale fornisce così l'energia meccanica sull'albero della macchina. Qualitativamente la pressione dell'aria aumenta quando investe il rotore (per il principio di Bernoulli una diminuzione della velocità provoca un aumento della pressione), mentre diminuisce bruscamente dopo l'impatto per poi aumentare a valle fino a raggiungere la pressione atmosferica. Inoltre appena dietro il rotore si formano dei vortici dovuti alla turbolenza del moto. I materiali più usati per la costruzione delle pale sono i seguenti: acciaio, materiali compositi rinforzati con fibra di vetro (poliestere), legno, leghe d'alluminio, materiali compositi di tipo innovativo (ad esempio quelli che utilizzano fibre di carbonio e Kevlar come materiali rinforzanti). A prescindere dai materiali utilizzati, tutti i costruttori sottopongono a collaudo e verifica i vari componenti della turbina eolica: si entra nel campo della dinamica strutturale, la quale con l'ausilio di sofisticati modelli matematici studiano i carichi fluttuanti sopportabili dalla turbina. L'aeroelasticità si occupa dell'interazione fra una struttura elastica e un fluido esterno. Per le turbine eoliche l'interazione tra turbina e flusso del vento determina i carichi sulla turbina e la sua risposta dinamica. Pertanto una corretta progettazione prevede l'uso di un valido modello matematico sull'interazione aeroelastica. La stabilità è un altro requisito fondamentale: dopo il disastro del Tacoma Narrows Bridge si sono moltiplicati gli studi sulle vibrazioni provocate da un flusso, che furono la causa del crollo del ponte da parte del vento (le vibrazioni generarono momenti torcenti non smorzati). Altro concetto rilevante è

l'efficienza del rotore. E' dimostrato (A. Betz) che solo una parte, e precisamente il 59,3%, della potenza posseduta dal vento può essere teoricamente assorbita dal rotore.

## CONVERSIONE DELL'ENERGIA DEL VENTO IN ENERGIA DI ROTAZIONE[2, 3]

Una turbina eolica ottiene la sua potenza convertendo la forza del vento in una forza di rotazione che agisce sul rotore. La quantità di energia che il vento trasferisce al rotore dipende dalla densità dell'aria, dall'area del rotore e dalla velocità del vento.

L'energia cinetica di un corpo in movimento è proporzionale alla sua massa (o peso), quindi l'energia cinetica del vento dipende dalla densità dell'aria. In altre parole, più pesante è l'aria maggiore sarà l'energia ricevuta dalla turbina. A pressione atmosferica e a 15 °C la densità dell'aria è circa 1,225 kg/m<sup>3</sup> e decresce leggermente con l'aumentare dell'umidità. Inoltre la densità dell'aria aumenta al diminuire della sua temperatura e diminuisce al diminuire della sua pressione.

L'area del rotore determina quanta energia una turbina è capace di raccogliere dal vento. Poiché l'area aumenta con il quadrato del diametro del rotore, perciò se si raddoppia il diametro, una turbina riceverà 4 volte più energia. Una tipica turbina da 600 kW ha un diametro del rotore di 44 m e un'area di 1500 m<sup>2</sup>.

Un ulteriore fattore che influenza la quantità di energia che viene trasferita al rotore è la velocità del vento, infatti:

- energia cinetica del vento  $KE = \frac{1}{2} * massa * velocità * velocità$
- momento  $Mo = massa * velocità$
- potenza per unità d'area  $P = KE * Mo$

quindi la potenza ottenuta è proporzionale alla terza potenza della velocità del vento; se la velocità del vento raddoppia, la potenza sarà 8 volte maggiore.

In condizioni normali, a densità costante,  $P = 0.006 v^3$ ; per una velocità del vento pari a 10 m/s si ottiene una potenza di  $P = 0.6 \text{KW} / \text{m}^2 = 600 \text{W} / \text{m}^2$  che è identica alla potenza solare media.

In realtà non tutta l'energia posseduta dal vento può essere assorbita dal rotore, ma solo una parte (precisamente il 59,3%). Infatti, per cedere tutta la sua energia il vento dovrebbe ridurre a zero la sua velocità immediatamente dopo il rotore e quindi ci troveremmo con una massa d'aria perfettamente immobile alle spalle del rotore che impedirebbe all'altra massa d'aria in movimento di entrare nel rotore. In realtà il vento, passando attraverso il rotore, subisce un rallentamento e cede solo parte della sua energia cinetica; questo rallentamento avviene in parte prima e in parte dopo il rotore. Per calcolare la potenza fornita dal vento al rotore si può fare riferimento alla teoria di Betz.

## TEORIA DI BETZ[4, 9]

Le ipotesi alla base della teoria di Betz sono le seguenti:

1. Concetto di tubo di flusso: il tubo di corrente che attraversa il rotore non interagisca con la restante porzione di fluido che lo circonda.
2. In ogni sezione del tubo di flusso sussista una distribuzione di velocità permanente, uniforme e monodimensionale lungo l'asse. Il rallentamento di vena sul rotore è distribuito uniformemente sulla sezione del disco.
3. Nelle sezioni infinitamente a monte e a valle si possa ritenere una situazione fluidodinamica indisturbata dalla presenza della macchina, ovvero sussista la pressione atmosferica dell'ambiente esterno, proprio come nella condizione di moto indisturbato.
4. Il flusso eolico non incontri ostacoli oltre la turbina, né sopravento né sottovento.

5. Il vento sia stazionario e di intensità costante con la quota.
  6. Non ci siano effetti di rotazione della vena a causa dell' "estrazione" di quantità di moto.
  7. Si trascuri la comprimibilità dell'aria, cioè la densità sia ritenuta costante.
- La vena fluida, caratterizzata da una velocità  $v_1$ , raggiunge le pale del rotore. Lì essa viene rallentata fino al raggiungimento di una velocità  $v_2$ . Naturalmente nel passaggio da 1 a 2 deve valere l'**equazione di continuità**, per cui si può scrivere (supponendo la densità costante per l'ipotesi 7):

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = m$$

Deve essere verificata anche l'**equazione di conservazione della quantità di moto** per cui:

$$F = m(v_1 - v_2) = d(mv)/dt$$

Dove **F** è la forza (orizzontale) esercitata dal flusso sulla macchina  
 La **potenza** è dunque:

$$W = Fv = vm(v_1 - v_2) \quad (a)$$

Facendo un **bilancio tra entrata e uscita dell' energia cinetica** associata alla vena fluida si trova la potenza ceduta:

$$W = m (v_1^2 - v_2^2)/2 \quad (b)$$

ma, poiché le potenze trovate nel modo (a) e nel modo (b) devono coincidere, si ricava:

$$W = Fv = vm(v_1 - v_2) = m (v_1^2 - v_2^2)/2$$

quindi:

$$v = (v_1 + v_2)/2$$

Il rallentamento avviene dunque, per metà nel tratto di corrente a monte e per metà nel tratto di corrente a valle del rotore

Definendo un **fattore di interferenza a** come:

$$a = 1 - v/v_1$$

si ottiene:

$$v = v_1(1 - a)$$

e

$$v_2 = v_1(1 - 2a) \quad (c)$$

Il fattore **a** rappresenta la misura in cui il flusso viene rallentato a monte della turbina (al massimo  $a=0.5$  quando si ha il blocco del flusso alla sezione 2).

Sostituendo la (c) nella (b) si ottiene la **potenza estraibile** da un flusso eolico **secondo la teoria di Betz**:

$$W = (1/2) m v_1^2 4a(1 - a)$$

considerando che  $m = \rho v A = \rho v_1(1 - a)A$  si ottiene:

$$W = (1/2) \rho A v_1^3 4a(1 - a)^2$$

Imponendo l'annullamento della derivata prima di W rispetto ad a si può trovare l'**interferenza ottimale** (l'interferenza per cui si ha l'estrazione della massima potenza).

Il valore  $a=1$  non ha senso per cui  $a_{ott}=1/3$

Rapportando tale valore della potenza con quello che si avrebbe se la velocità restasse costante si può definire un **coefficiente di prestazione**:

$$cp = [(1/2)mv_1^3 4a(1-a)^2] / [(1/2)mv_1^3]$$

il valore del coeff. di prestazione per  $a=1/3$  è:

$$cp=0,593$$

quindi si può dunque sottrarre al massimo il 60% della potenza associata alla vena fluida.

## IMPATTO AMBIENTALE[5]

Una delle maggiori perplessità sulla installazione di centrali eoliche, da parte dei politici e delle popolazioni locali, dipende dalle preoccupazione sul loro impatto ambientale. E' quindi opportuno sottolineare le caratteristiche di questa fonte il cui impatto ambientale è limitato, specialmente attraverso una buona progettazione: l'energia eolica è una fonte rinnovabile, in quanto non richiede alcun tipo di combustibile, ma utilizza l'energia cinetica del vento (conversione dell'energia cinetica del vento, dapprima in energia meccanica e poi in energia elettrica); è pulita, perché non provoca emissioni dannose per l'uomo e per l'ambiente. 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.

Gli aspetti ambientali che vengono presi in considerazione sono invece correlati a possibili effetti indesiderati, che hanno luogo su scala locale; essi sono:

- emissioni evitate
- occupazione del territorio
- impatto visivo
- rumore
- effetti elettromagnetici
- interferenze elettromagnetiche
- effetti su flora e fauna.

Questi aspetti siano tuttavia di lieve rilevanza tanto da poter affermare che il bilancio costi ambientali/benefici ambientali è ampiamente positivo.

### Emissioni evitate[5, 6]

Ogni unità di elettricità prodotta dal vento sostituisce un'unità di elettricità che sarebbe altrimenti stata prodotta mediante combustibili fossili, la quale comporta l'emissione di sostanze inquinanti e di gas serra. Il livello delle emissioni dipende dal combustibile e dalla tecnologia di combustione e dal controllo dei fumi. Ecco i valori delle principali emissioni associate alla generazione elettrica:

**CO<sub>2</sub> (anidride carbonica): 860 g/kWh**

**SO<sub>2</sub> (anidride solforosa): 10 g/kWh**

**NO<sub>2</sub> (ossidi di azoto): 3 g/kWh**

Tra questi gas, il più rilevante è l'anidride carbonica o biossido di carbonio, il cui progressivo incremento potrebbe contribuire all'effetto serra e quindi causare drammatici cambiamenti climatici.

La riduzione di emissioni, prodotta dall'uso dell'energia eolica, può essere calcolata usando la seguente formula:

$$\text{CO}_2 \text{ (in ton)} = (A \times 0.3 \times 8760 \times 860) / 1000$$

$$\text{SO}_2 \text{ (in ton)} = (A \times 0.3 \times 8760 \times 10) / 1000$$

$$\text{NO}_x \text{ (in ton)} = (A \times 0.3 \times 8760 \times 3) / 1000$$

dove

A = la stima della capacità di sviluppo dell'energia eolica in MW

0.3 è una costante che tiene in conto l'intermittente natura del vento, la disponibilità delle turbine eoliche e le ordinarie perdite

8760 è il numero di ore in un anno

Una tipica turbina nell'UK ha una capacità di 0.66MW e quindi contribuirà alle seguenti riduzioni di emissioni

- **1491.65 ton of CO<sub>2</sub>**
- **17.34 ton of SO<sub>2</sub>**
- **5.2 ton of NO<sub>x</sub> ogni anno.**

Altri benefici dell'eolico sono: la riduzione della dipendenza dall'estero, la diversificazione delle fonti energetiche, la regionalizzazione della produzione.

### **Occupazione del territorio[5]**

In base al rapporto tra la potenza degli impianti e il terreno complessivamente necessario (anche per la distanza delle macchine), la densità di potenza per unità di superficie è circa di 10 W/m<sup>2</sup>. Tuttavia le macchine eoliche e le opere di supporto (cabine elettriche, strade) occupano solamente il 2-3% del territorio per la costruzione di un impianto, quindi la densità di potenza ottenibile è da considerarsi nettamente superiore, dell'ordine delle centinaia di W/m<sup>2</sup>. Bisogna ricordare che la parte del terreno non occupata dalle macchine può essere impiegata per altri scopi, come l'agricoltura e la pastorizia, senza alcuna controindicazione.

### **Impatto visivo[5]**

Gli aerogeneratori per la loro configurazione sono visibili in ogni contesto in cui vengono inseriti, in modo più o meno evidente in relazione alla topografia e all'antropizzazione del territorio. Un aerogeneratore da 500 kW di potenza ha un diametro del rotore e un'altezza della torre di circa 40 metri, mentre uno da 1500 kW misura, per questi due valori, circa 60 m. L'impatto nel paesaggio tra i due tipi di macchina è moderatamente diverso, per cui aumentare la taglia delle macchine potrebbe ridurre, a parità di potenza globale installata, l'impatto visivo. L'impatto visivo è un problema di percezione e integrazione complessiva nel paesaggio; comunque è possibile ridurre al minimo gli effetti visivi sgradevoli assicurando una debita distanza tra gli impianti e gli insediamenti abitativi. Sono state individuate, inoltre, soluzioni costruttive tali da ridurre tale impatto: impiego di torri tubolari o a traliccio a seconda del contesto, di colori neutri, adozione di configurazioni geometriche regolari con macchine ben distanziate. L'aspetto dell'impatto visivo è ormai oggetto di approfonditi studi.

### **Impatto acustico[5]**

Il rumore emesso da una centrale eolica non è percettibile dalle abitazioni, poiché una distanza di poche centinaia di metri è sufficiente a ridurre il disturbo sonoro. In generale, la tecnologia attuale consente di ottenere, nei pressi di un aerogeneratore, livelli di rumore alquanto contenuti, tali da non modificare il rumore di fondo, che, a sua volta, è fortemente influenzato dal vento stesso, con il risultato di mascherare

ancor più il contributo della macchina. A meno che non si voglia metter su casa entro un raggio di trecento metri da una wind farm, scopriamo che il ronzio degli aerogeneratori è ben al di sotto, in termini di decibel, del chiasso di un ufficio pubblico o del rumore che sentiamo stando in automobile o in mezzo al traffico, senza mai arrivare a quello di molte industrie attive nelle periferie delle città. Lo stesso vento che soffia, di per sé, certe notti fa più rumore di una wind farm.

## **Interferenze sulle comunicazioni[5]**

La macchina eolica può influenzare: le caratteristiche di propagazione delle telecomunicazioni (come qualsiasi ostacolo), la qualità del collegamento in termini di segnale-disturbo e la forma del segnale ricevuto con eventuale alterazione dell'informazione. Una adeguata distanza degli aerogeneratori fa sì che l'interferenza sia irrilevante.

## **Flora e fauna[5]**

Sulla base delle informazioni disponibili, si può affermare che le possibili interferenze di qualche rilievo degli impianti eolici con la flora e la fauna riguardano solo l'impatto dei volatili con il rotore delle macchine. In particolare, le specie più influenzate sono quelle dei rapaci; gli uccelli migratori sembrano adattarsi alla presenza di questi ostacoli. In genere le collisioni sono molto contenute.

## **I benefici occupazionali: l'Europa[5]**

L'eolico è caratterizzato, come le altre tecnologie che utilizzano fonti di energia rinnovabili, da costi di investimento elevati in rapporto ai ridotti costi di gestione e manutenzione. A parità di costo dell'energia prodotta, tale specificità può avere il vantaggio di essere trasformata in occupazione, in quanto si viene a sostituire valore aggiunto al combustibile utilizzato negli impianti convenzionali.

Secondo un'analisi del Worldwatch Institute, l'occupazione diretta creata per ogni miliardo di kWh prodotto da fonte eolica è di 542 addetti, mentre quella creata, per la stessa produzione di elettricità, dal nucleare e dall'utilizzo del carbone (compresa l'estrazione del minerale) è, rispettivamente, di 100 e 116 addetti.

L'occupazione nel settore eolico è associata alle seguenti principali tipologie di attività: costruzione (generatori eolici, moltiplicatori di giri, rotore - cioè pale e mozzo - torre, freni, sistemi elettronici, navicella) installazione (consulenza, fondazioni, installazioni elettriche, cavi e connessione alla rete, trasformatori, sistemi di controllo remoto, strade, potenziamento della rete elettrica) e gestione/manutenzione.

Se guardiamo alla realtà della Danimarca, paese che produce il 60% delle turbine installate nel mondo, notiamo che il numero di addetti coinvolti direttamente e indirettamente (in quest'ultimo caso per i componenti acquistati da produttori nazionali) nel 1995, con una potenza prodotta di 566 MW, è stato di 8.500. In questo computo non è considerata la voce "ricerca" che comprende attività di ricerca in senso tradizionale, ma anche attività eseguite da società di ingegneria, istituzioni bancarie e assicurative. Per quanto riguarda l'occupazione creata dalla gestione degli impianti, trascurata in questa cifra, si stima che sia pari a circa 1 addetto per MW installato (vanno aggiunte, in questo caso, qualche centinaio di persone).

Da questi dati risulta quindi che l'occupazione associata alla costruzione delle macchine è circa 4 volte maggiore a quella associata all'installazione e gestione degli impianti.

Uno studio sul settore, nel Regno Unito, è particolarmente interessante perché condotto in un paese che, al contrario della Danimarca, importa gran parte delle turbine eoliche; si è stimato che gli addetti nell'eolico, per il periodo 1994-95, siano, comunque, anche in questo caso, un numero significativo, cioè circa 1.300.

## FONTI E RIFERIMENTI

- [1]: [http://www.uni.com/stampa/art\\_vari/energia\\_eolica.shtml](http://www.uni.com/stampa/art_vari/energia_eolica.shtml)
- [2]: <http://www.windpower.org/core.htm>
- [3]: <http://zebu.uoregon.edu>
- [4]: <http://digilander.libero.it/clodd/>
- [5]: <http://www.isesitalia.it/home.html>
- [6]: <http://auswea.com.au>
- [7]: <http://www.risoe.dk/vea/index.htm>
- [8]: <http://enelgreenpower.enel.it/it/>
- [9]: [www.energiab.it](http://www.energiab.it) (ingg. Doria, Forni, Puglioli, Andretta)
- [10]: <http://www.nrel.gov/wind/>
- [11]: [http://members.tripod.com/matteogalli/energia/mcch\\_altrenatore.htm](http://members.tripod.com/matteogalli/energia/mcch_altrenatore.htm)