

## ***Università degli studi di Padova***

**Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali  
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale**

# **IMPIANTI EOLICI: TECNOLOGIA E VALUTAZIONE ECONOMICA**

### **RELATORI:**

**Ch. Mo Prof. Mirto Mozzon**

**Ch. Mo Dott. Augusto Tassan**

**Laureanda:**

**Letizia Salarolo**

**Matricola n. 1046767**

**ANNO ACCADEMICO: 2015-16**



# INDICE

<b>SOMMARIO</b>	pag. 5
<b>INTRODUZIONE</b>	pag. 7
<b>1. L'ENERGIA EOLICA</b>	pag.9
<b>2. GLI IMPIANTI EOLICI</b>	pag. 23
<b>3. LO SVILUPPO DI UN PROGETTO EOLICO</b>	pag. 35
<b>4. L'ANALISI ECONOMICA E FINANZIARIA</b>	pag. 45
<b>5. L'IMPATTO AMBIENTALE DI UN IMPIANTO EOLICO</b>	pag. 57
<b>CONCLUSIONI</b>	pag. 69
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	pag. 71
<b>SITOGRAFIA</b>	pag. 73



# SOMMARIO

In questa tesi sono presentate alcune nozioni di base sull'energia eolica, senza entrare troppo nello specifico, ma con l'obiettivo di far conoscere e comprendere quali sono le principali tecnologie e i possibili futuri sviluppi, nonché le procedure di progettazione ed un'analisi economica dell'investimento.

Il primo capitolo affronta le tematiche di interesse generale sull'energia eolica: a partire da alcuni cenni storici sugli antichi mulini a vento e sul loro funzionamento fino ai moderni aerogeneratori, si passa poi ad analizzare le caratteristiche principali della risorsa vento e del suo sfruttamento.

Il secondo ed il terzo capitolo sono dedicati agli impianti eolici veri e propri: partendo dalle varie tipologie di aerogeneratori e dalla loro configurazione si andrà ad analizzare lo sviluppo di un progetto eolico, con particolare attenzione ai principi di funzionamento.

Infine, negli ultimi due capitoli vengono affrontati i temi relativi alla valutazione economica e finanziaria di un investimento nel settore eolico, nonché i principali impatti ambientali di tali impianti, con alcune soluzioni di analisi e mitigazione.



# INTRODUZIONE

Energie rinnovabili, energie alternative: sempre più spesso questi termini vengono impiegati alla stregua di luoghi comuni, sintomo che l'argomento energia è ormai di interesse a tutti i livelli sociali.

È fuor di dubbio che le energie rinnovabili, non solo nel prossimo futuro ma anche in arco di tempo decisamente più lungo, rivestiranno un peso sempre maggiore nel panorama economico ed energetico a livello mondiale: a supporto di tale affermazione sta il fatto che le principali aziende petrolifere si stanno muovendo verso una diversificazione degli impianti di produzione e dirottando parte degli investimenti verso il rinnovabile.

Recentemente, la parte del leone in Europa è di pertinenza del fotovoltaico, che gode di una forma di incentivazione (in Italia denominata Conto energia) molto gratificante, subito seguito dall'eolico, che ha visto il fiorire di impianti sempre più grandi, installati su torri che sfiorano i 100 metri di altezza e pale dal diametro di più di 80 metri, con potenze di picco per ogni torre fino a 3 MW.

Il principio di funzionamento dell'energia eolica è tra i più antichi del mondo; è però errato pensare che l'eolico sia una tecnologia semplice e poco sofisticata.

Il potenziale eolico mondiale rappresenta, da solo, 40 volte il totale dei consumi annuali di energia ad oggi stimati in circa 12.000 MTEP (Milioni di Tonnellate Equivalenti di Petrolio). Non meraviglia che, nel mondo, la crescita cumulativa dell'eolico abbia raggiunto già nel 2010 la soglia dei 200.000 MW di potenza installata, quindi 950 MW in Italia nel 2011. Nella sola penisola oltre 4.000 aerogeneratori hanno prodotto nel 2009 quasi 7 miliardi di kWh (pari al 2,1% del consumo interno lordo di energia elettrica), sufficienti a coprire i consumi domestici di circa sette milioni di cittadini e circa 8,4 miliardi di kWh nel 2010. In questa crescita tumultuosa, non tutto è stato fatto

per bene, anche se va detto che l'allarme sociale è senza dubbio sopravvalutato, considerato che si tratta di una fonte che ha molti pregi evidenti ed un numero limitato di difetti. Questi sono connessi essenzialmente all'impatto visivo e dagli errori commessi talvolta nell'uso del territorio.

L'energia pulita non esiste. L'unica energia pulita è quella risparmiata, cioè quella che non viene usata. Le scelte sulle fonti energetiche dovrebbero essere fatte dal punto di vista della minimizzazione dell'impatto ambientale solo in termini di analisi costi/benefici. L'eolico, realizzato bene, ha il rapporto costi/benefici più basso tra tutte le modalità di produzione elettrica, comprese l'idroelettrico ed il fotovoltaico che nel primo caso hanno rischi maggiori e impatto territoriale meno reversibile e nell'altro rendimenti inferiori e minore produttività. Ovviamente vale per l'eolico la legge non scritta che si applica a tutte le installazioni territoriali: si deve puntare non alla massimizzazione della producibilità, ma alla sua ottimizzazione, cercando il migliore equilibrio con le esigenze della riduzione dell'impatto ambientale eliminando anche i siti che, pur presentando una "vocazione eolica", presuppongono un eccesso infrastrutturale che è incompatibile con la natura stessa delle fonti rinnovabili.

# CAPITOLO 1

## L'energia eolica

### 1.1.Cenni introduttivi

L'energia eolica viene sfruttata da almeno 3000 anni tramite i mulini a vento, un tempo usati principalmente per la macinatura del grano e per il pompaggio dell'acqua.

Si tramanda che, già nel XVII secolo A.C., Hammurabi, il Re di Babilonia avesse progettato di irrigare la pianura mesopotamica per mezzo di mulini a vento; tuttavia i primi reperti storici sono datati al 300 A.C.: nella città di Anuradhapura ed in altre città dell'attuale Sri Lanka, l'energia dei monsoni è stata utilizzata per innalzare la temperatura sino a 1100-1200°C in fornaci la cui disposizione si adattava alle direzioni di provenienza dei venti.

Uno dei primi impianti eolici conosciuti si trova ad Alessandria d'Egitto ed è la macchina del matematico greco Erone (10-70 d.C.). comunque le prime testimonianze di mulini a vento usati su scala industriale per la macinatura dei cereali e la produzione dello zucchero sono delle macchine ad asse verticale costruite nel VII secolo d.C. a Sistan, nell'antica Persia (attuale Iran). Il mulino è costituito da un'asse verticale sul quale venivano montati radialmente alcuni bracci di sostegno a rudimentali pale realizzate con canne. Il vento investiva solo metà della sezione verticale data la presenza di un'apposita schermatura. La rotazione dell'asse verticale permetteva l'azionamento di macine per cereali.



**Figura 1.1.** Mulino a vento persiano

In Europa, invece, i mulini a vento si diffusero in seguito alle Crociate. Tuttavia alcuni studiosi ritengono che l'invenzione europea sia indipendente dalle tecnologie già

utilizzate in Medio-Oriente, sia per le differenti tecnologie tra i mulini europei, ad asse orizzontale, a quelli Medio-Orientali, ad asse verticale, che per l'impossibilità da parte degli europei di essere venuti in contatto con una tecnologia presente in aree molto lontane rispetto a quelle di svolgimento delle crociate.

Dal XII secolo i mulini a vento ad asse orizzontale divengono parte integrante dell'economia rurale. Essi prendono il posto dei mulini ad acqua, soprattutto in Inghilterra, dove i diritti di utilizzare l'acqua quale fonte di energia erano riservati alla sola classe nobile ed al clero.

Inoltre il funzionamento dei mulini a vento è meno influenzato dalle temperature rigide rispetto a quello dei mulini ad acqua a causa del congelamento.

Nel 1400, in Europa sono in funzione migliaia di mulini a vento. È da segnalare in particolare la loro diffusione in Olanda per il drenaggio delle acque (in questo periodo iniziano i lavori per il drenaggio delle aree del delta del Reno).

In America la comparsa dei mulini a vento risale al 1600 grazie alle colonizzazioni europee. Qui i mulini venivano usati soprattutto per il sollevamento dell'acqua. Tra il 1880 ed il 1930, solo negli Stati Uniti, ne furono installati milioni di unità per usi agricoli e domestici, e molte di queste macchine funzionano ancora.



**Figura 1.2.** Mulino a vento olandese



**Figura 1.3.** Mulino a vento americano

Per la maggior parte del XX secolo l' utilizzo dell' energia eolica fu concentrato soprattutto su sistemi di carica di batterie per l' alimentazione di utenze isolate. Nel periodo di picco tra il 1930 ed il 1940 si contano oltre 6 milioni di mulini a vento in aree rurali.

L'interesse ed il forte sviluppo della generazione di energia elettrica da fonte eolica hanno trovato impulso a partire dal primo shock petrolifero del 1973. L'improvviso aumento dei prezzi dei prodotti petroliferi ha infatti stimolato una serie di programmi di ricerca e sviluppo finanziati dai vari Governi.

Dopo questa fase di sviluppo e a partire dagli anni '80, si è affermato l'utilizzo industriale dell'energia eolica grazie alla diffusione delle *wind-farms* in Danimarca e negli Stati Uniti. A partire poi dagli anni '90 i maggiori sviluppi si sono realizzati in Europa.



**Figura 1.4.** Moderna pala eolica

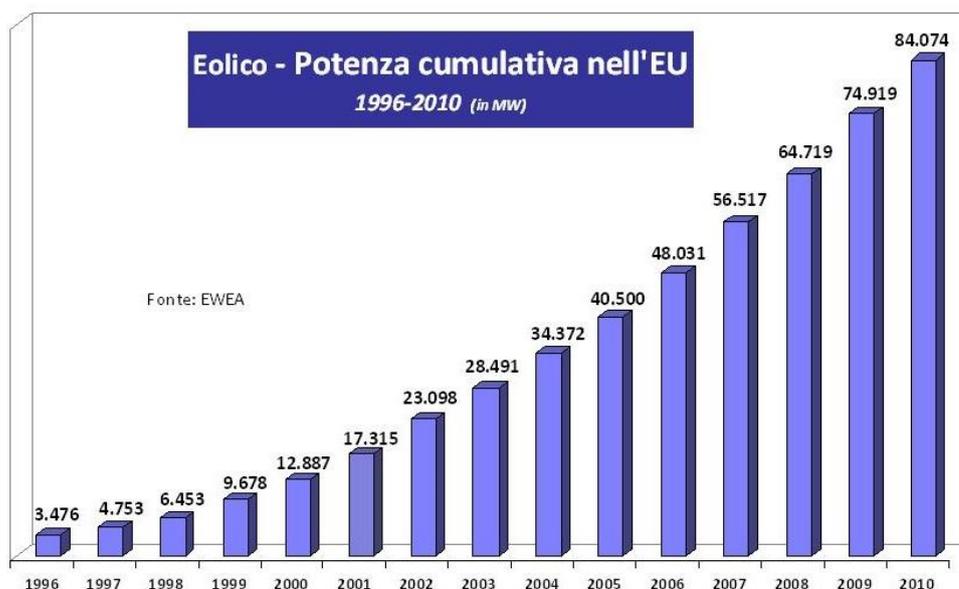
Secondo le ultime indagini, il settore eolico italiano annovera oltre 4500 aerogeneratori per una potenza complessiva superiore ai 5000 MW in continua crescita per potenza installata e numero di addetti, con previsioni di 16200 MW installati entro l'anno 2020, pari a circa il 7% del consumo interno previsto per quel periodo in Italia, a dispetto della recessione globale.

Il successo di questa forma di sfruttamento e generazione di energia fondamentale è dovuto alla larga disponibilità di tecnologie e prodotti affidabili, alla convenienza economica, inclusa la possibilità di poter produrre indipendentemente da crisi economiche e politiche (contrariamente a molte fonti oggi utilizzate) e dal senso etico che suscitano tutte le fonti rinnovabili per il rispetto dell'ambiente.

Esistono oggi grandi campi eolici installati a terra (on-shore) e in mare aperto al largo delle coste (off-shore), con aerogeneratori di taglia superiore ai 3 MW e con diametro

del rotore superiore ai 100 metri installati sia a terra sia nel mare aperto. Non ultimi vi sono i piccoli impianti di produzione denominati mini e micro eolici, nel passato relegati a funzioni di alimentazione di soccorso per abitazioni isolate (rifugi alpini, baite, isole, imbarcazioni, fari, boe, ecc.) o di aeromotori (azionamento di pompe dell'acqua per pozzi, mulini, ecc.), che oggi presentano taglie fino a 200 kW e possono soddisfare molte utenze domestiche e piccole utenze di tipo industriali, godendo di tutti gli incentivi vigenti. Come per tutti gli investimenti basati sullo sfruttamento di fonti rinnovabili, la produzione di energia è dipendente dalla disponibilità della fonte energetica, in questo caso, il vento; pertanto le caratteristiche e l'ubicazione geografica dell'impianto determinano la continuità della produzione.

Queste soluzioni sono anche vincenti nei confronti delle altre principali rinnovabili: infatti, se paragonate ad un impianto fotovoltaico, a pari sito, presentano un costo di realizzazione e un'occupazione della superficie minore; considerato inoltre che possono operare indipendentemente dalla presenza della luce, hanno una produzione di energia maggiore; portando così il punto di pareggio dell'investimento anche alla metà del tempo. Inoltre si dimostrano vantaggiose nei confronti dell'idroelettrico, che necessita di importanti infrastrutture, quali corsi o invasi e concessioni per lo sfruttamento dell'acqua, o del geotermico, limitato a pochi siti al mondo, oppure ancora delle biomasse, soggette al variare del costo del combustibile e al continuo controllo e abbattimento delle emissioni gassose.



**Figura 1.5.** Produzione di potenza eolica in Europa tra il 1996 e il 2010

## 1.2. Il vento

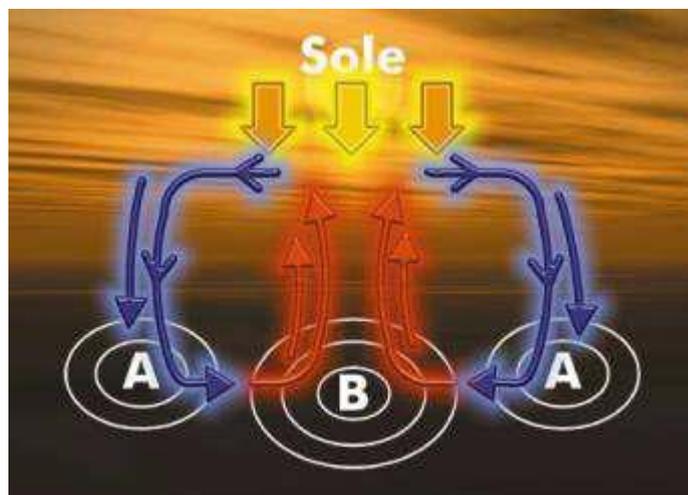
La conoscenza del vento e delle sue caratteristiche è di fondamentale importanza per tutti gli aspetti che riguardano l'utilizzo dell'energia eolica, dall'identificazione dei siti migliori per la sua produzione, alla valutazione della fattibilità tecnica ed economica di un impianto eolico, fino alla progettazione delle turbine eoliche ed alla comprensione dell'effetto della variabilità della produzione dell'energia elettrica sul sistema di distribuzione. Nei seguenti paragrafi saranno esaminate le caratteristiche fisiche e la natura del vento.

Si definisce vento il moto relativo di una particella d'aria rispetto ad una superficie orizzontale.

Il vento è il risultato dell'espansione e del moto convettivo dell'aria causati dal riscaldamento irregolare del Sole su grandi aree della superficie terrestre. La radiazione solare induce una serie di moti convettivi naturali in atmosfera per effetto del riscaldamento non uniforme della superficie terrestre.

Si crea in questo modo una macrocircolazione a celle: le masse d'aria si riscaldano, diminuiscono in densità e salgono, richiamando aria più fredda che scorre sulla superficie terrestre verso l'Equatore.

Questo movimento di masse d'aria calde e fredde produce le tipiche aree ad alta e bassa pressione, stabilmente presenti in atmosfera.

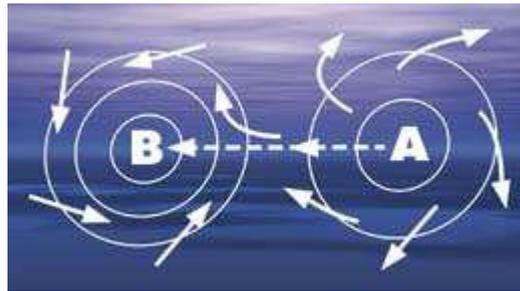


**Figura 1.6.** Il movimento delle masse d'aria

Poiché l'atmosfera ha la tendenza a ripristinare costantemente l'equilibrio, l'aria si muove dalle zone ad alta pressione, dove se ne accumula una maggiore quantità, verso quelle a bassa pressione, dove è meno concentrata, proprio come un liquido che tende a colmare le cavità che incontra nel suo percorso.

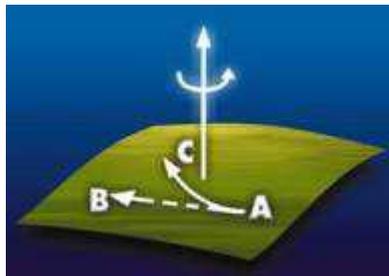
Il moto che ne deriva è il vento. Quanto più elevata è la differenza di pressione tra le due configurazioni (alta e bassa) e quanto più esse sono vicine, tanto maggiore sarà la velocità del vento.

In realtà, il vento non si muove nella direzione dell'alta pressione verso la bassa, ma devia nel nostro emisfero verso destra, circolando attorno ai centri ad alta pressione in senso orario e attorno a quelli a bassa pressione in senso antiorario. Nell'emisfero sud accade l'opposto. Questo comportamento era già conosciuto nel passato.



**Figura 1.7.** Il movimento del vento nell'emisfero boreale

L'aria in movimento subisce nell'emisfero settentrionale una deviazione verso destra: la zona di superficie terrestre sottostante, infatti, durante il percorso dell'aria, ruota in senso antiorario. Per questo motivo, come è evidenziato nella figura successiva, la particella d'aria a, diretta verso b, si ritroverà in c.



**Figura 1.8.** L'effetto della forza di Coriolis

La deviazione è conseguenza della rotazione terrestre, come dimostrò nel 1835 il matematico francese G.G. De Coriolis (1792-1843), che è il secondo fattore dopo la radiazione solare ad influenzare il movimento globale delle masse d'aria. Infatti, salvo che sulla fascia equatoriale, in qualsiasi altro punto della Terra un corpo in movimento sente l'effetto della rotazione in modo tanto più sensibile quanto più si è in prossimità dei poli.

In realtà è la zona di superficie terrestre sottostante che durante il movimento dell'aria ruota in senso antiorario. È come se l'aria fosse sottoposta ad una forza, che non

esiste e per questo viene chiamata apparente (Forza di Coriolis o deviante) e che sembra imprimere una spinta verso ovest ad ogni oggetto che si muove, in maniera non solidale alla superficie terrestre quando questo si sposta verso nord nell'emisfero boreale. Gli effetti sono tanto maggiori quanto maggiore è la velocità dell'aria.

I venti locali sono dovuti a differenze di pressione localizzate e sono influenzati dalla topografia. Ad esempio, le tipiche variazioni giornaliere sono dovute alle differenze di temperatura tra notte e giorno.

La presenza di rilievi naturali o artificiali induce solitamente incrementi nella velocità del vento. Questo effetto è dovuto a due fattori:

- l'altitudine, lo strato limite terrestre è caratterizzato da velocità che aumentano con l'altezza della superficie e le cime di colline e montagne si possono trovare nella zona dello strato limite con alte velocità del vento;
- l'accelerazione del flusso del vento indotta dalla riduzione della sezione di passaggio sopra ed intorno ai rilievi o all'attraversamento di passi o valli strette parallele al flusso del vento.

Alla stessa maniera, la topografia di una zona può portare a riduzioni della velocità del vento, alcuni esempi possono essere valli coperte, aree di crinale sottovento o punti di stagnazione del flusso. Infine, a scala spaziale ancora inferiore, il flusso del vento può essere alterato dalla turbolenza dovuta, ad esempio, alla presenza di un ostacolo o direttamente generata dalle turbine di un impianto eolico.

Anche gli effetti termici possono portare a forti variabilità locali. Le regioni costiere sono solitamente ventose, e ciò è dovuto al riscaldamento differente tra la terra ed il mare. Mentre il mare è più caldo della terra, si sviluppa una circolazione locale dell'aria (brezza) dalla terra al mare, con l'aria calda che si solleva dal mare e l'aria fredda che si riabbassa sulla terra. Quando la terra è più calda del mare, il risultato è opposto. Gli effetti termici possono essere causati anche da differenze nell'altitudine: masse di aria fredda possono muoversi da alte montagne verso le valli sottostanti generando venti anche forti. Vi sono infinite variazioni della velocità del vento a lungo termine che possono essere collegate alle variazioni di temperatura a lungo termine di cui vi è ampia evidenza storica. A parte questi andamenti a lungo termine, in una data località ci sono evidenti variazioni delle condizioni anemologiche da un anno all'altro che possono avere cause diverse e che si possono accoppiare a fenomeni climatici globali quali, ad esempio, aumenti del pulviscolo atmosferico dovuti ad eruzioni vulcaniche o effetti dovuti alle macchie solari.

### 1.3.La forza del vento

Durante l'antichità gli uomini non tardarono a individuare nel vento un elemento naturale impiegabile come forza motrice.

Dallo studio della dinamica dei venti e dalla loro interazione con i corpi nacque così la scienza dell'aerodinamica, che consentì la realizzazione di velieri, pale per mulini, automobili, fino ad arrivare agli odierni velivoli, ma anche strutture più robuste ed elastiche rispetto all'azione del vento, quali sistemi di aerazione e ventilazione, paracaduti, elicotteri e alianti.

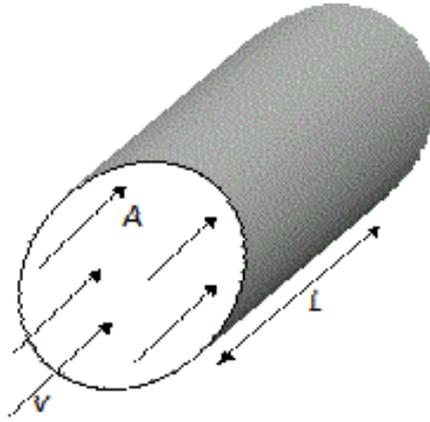
Bisogna dire però che, dell'energia solare disponibile, solo il 2%, pari a circa 360 TW, alimenta i gradienti termici che producono i venti. Il 35% dell'energia dei venti viene dissipato ad 1 km dalla superficie terrestre; l'energia rimanente è quella disponibile per la conversione in altre forme di energia (meccanica, elettrica) ma solo il 10% di questa può essere effettivamente utilizzata.

Su scala globale, l'energia eolica è paragonabile alle altre fonti rinnovabili ed è pari a circa 20 volte il valore dei consumi energetici mondiali. Inoltre, in aree caratterizzate da buone condizioni anemologiche, la producibilità energetica è paragonabile se non superiore a quella dell'energia solare.

<i>Fonte</i>	<i>Potenza totale [W]</i>	<i>Potenza disponibile [W]</i>
Solare	$1,8 \times 10^{17}$	-
Eolica	$3,6 \times 10^{15}$	$1,3 \times 10^{14}$
Idraulica	$9,0 \times 10^{12}$	$2,9 \times 10^{12}$
Geotermica	$2,7 \times 10^{13}$	$1,3 \times 10^{11}$
Maree	$3,0 \times 10^{12}$	$6,0 \times 10^{11}$

**Tabella 1.1.** Potenza totale e teoricamente estraibile dalle fonti rinnovabili

Le molecole dell'aria in movimento possiedono energia cinetica, quindi, localmente, la potenza di un flusso d'aria è data dalla quantità di molecole di aria che attraversano una data sezione perpendicolare al flusso stesso in un dato intervallo di tempo.



**Figura 1.9.** Flusso di vento attraverso un cilindro di base A

In riferimento alla figura, la massa di aria che attraversa la sezione A del cilindro nel tempo t, è determinata dalla densità dell'aria  $\rho$  e del volume del cilindro V. La potenza teorica  $P_0$  ottenibile dalla vena di fluido indisturbata è l'energia cinetica dell'aria divisa per il tempo ed è pari a:

$$P_0 = E_c/t = \frac{1}{2} \cdot \frac{m \cdot v^2}{t}$$

Essendo  $\rho = m / V$ ,  $V = A L$ ,  $m = \rho A L$ , si ottiene quindi:

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot L \cdot v^2}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Dalla precedente, la potenza teorica specifica può essere calcolata per differenti velocità del vento; nella successiva tabella sono riportati alcuni risultati che rappresentano la variazione della potenza teorica specifica in funzione della velocità di un flusso di vento che attraversa una superficie di area unitaria e ad essa ortogonale.

<i>Velocità del vento [m/s]</i>	<i>Potenza specifica [KW/m²]</i>
0	0
5	0,06
10	0,50
15	1,68
20	4,00
25	7,81
30	13,50

**Tabella 1.2.** Potenza specifica del vento in funzione della velocità

Dalle formule precedenti è evidente come la potenza del vento dipenda anche dalla densità dell'aria che può essere calcolata in base alla seguente espressione:

$$\rho = 1,2929 \frac{P_A - VP}{760} \cdot \frac{273}{T}$$

Dove  $P_A$  è la pressione atmosferica (in mm di mercurio),  $VP$  è la tensione di vapore (in mm di mercurio) e  $T$  è la temperatura (in gradi Kelvin). Alte temperature e basse pressioni riducono la densità dell'aria e, conseguentemente, la potenza. Il principale fattore che incide sulle variazioni della densità dell'aria è la variazione della pressione con l'altitudine: un aumento di 1000 m di quota porta ad una riduzione del 10% della pressione e, quindi, ad una riduzione del 10% della potenza. Nel caso in cui si conosca solo l'altitudine, la densità dell'aria può essere stimata in base alla seguente formula:

$$\rho = 1,226 - (1,194 \cdot 10^{-4}) \cdot z$$

Il valore standard solitamente utilizzato nelle elaborazioni è di 1226 Kg/m<sup>3</sup>, che corrisponde ad una temperatura di 15°C ed alla pressione dell'aria a livello del mare.

#### 1.4. Le forze aerodinamiche nella pala dell'aerogeneratore

Si consideri ora un aerogeneratore, che è un corpo fisso, in attesa che il vento lo investa per trasferire la sua energia alle pale mobili connesse che si metteranno a ruotare.

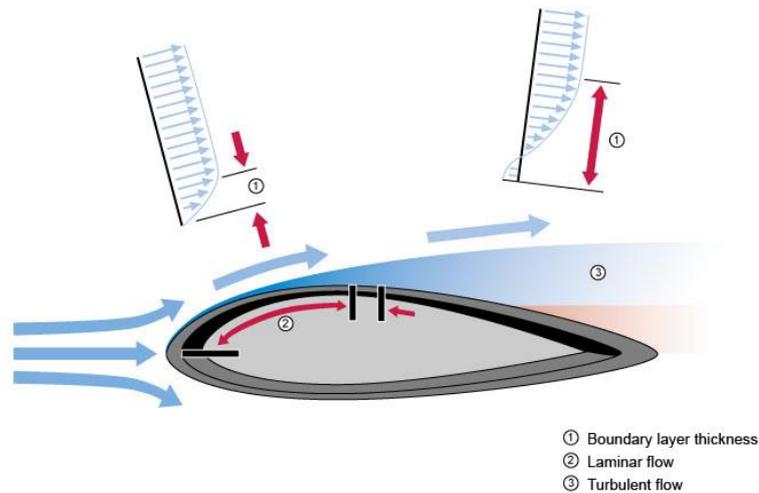
Il vento è un insieme continuo di particelle e quindi quando il corpo sarà investito da queste opporrà una forza contraria, detta *resistenza*.

In funzione della posizione assunta nei confronti della vena fluida delle particelle di vento, il corpo può diventare *portante* (si solleva) o *deportante* (si abbassa).

La posizione si stabilisce in funzione dell'angolo di incidenza, che può essere positiva (in tal caso il corpo diviene portante) oppure negativa (il corpo diviene deportante). L'incidenza assoluta si ha quando l'angolo è pari a zero e il corpo genera solo resistenza.

Il punto di applicazione della forza si definisce come centro di pressione (CP). A parità di incidenza, la forma del corpo può cambiare considerevolmente i valori di portanza; la ricerca della migliore forma da adottare ha portato ai profili alari, che generalmente sono curvi. La forma curva determina depressioni maggiori sul dorso e deflette maggiormente verso il basso il flusso di aria ventrale. A incidenza zero in corpo curvo

produce già portanza; di conseguenza, sul dorso, si verificano aumenti di velocità con diminuzione di pressione, mentre il contrario accade in corrispondenza del ventre.



**Figura 1.10.** Incidenza del vento sulla pala

Se si determina un aumento dell'angolo di incidenza, si nota una esaltazione della capacità di sostentamento, fino a una condizione oltre la quale queste improvvisamente crollano. Tale fenomeno prende il nome di *stallo*.

In funzione delle applicazioni si sviluppa il profilo idoneo più efficiente che sarà dato comunque dal rapporto tra portanza e resistenza.

Nel caso della pala dell'aerogeneratore, l'efficienza del funzionamento, più che sull'effetto della spinta del vento, si basa sull'effetto della portanza: in pratica l'aerogeneratore lavora disintegrando il vento.

Poiché il vento cambia di intensità e direzione continuamente, le pale dovranno essere sempre *a segno*, così da assicurare la massima portanza, facendo cioè scorrere in moto laminare il vento con la minima resistenza ed evitando il moto turbolento così come definito dal fisico irlandese Osborne Reynolds.

La caratteristica principale di una pala per aerogeneratore è quella di avere angolo di calettamento variabile lungo la sua lunghezza (*svergolamento*), che le consente di mantenere un angolo di attacco ottimale con il vento e di lavorare nell'aria con incidenza costante. Altra caratteristica peculiare è costituita dal fatto che la velocità dell'aria cambia nelle varie sezioni della pala, aumentando dal mozzo verso le estremità: questo fa sì che la spinta del vento non venga applicata lungo la direzione della traiettoria del profilo, ma lungo il piano di rotazione della pala.

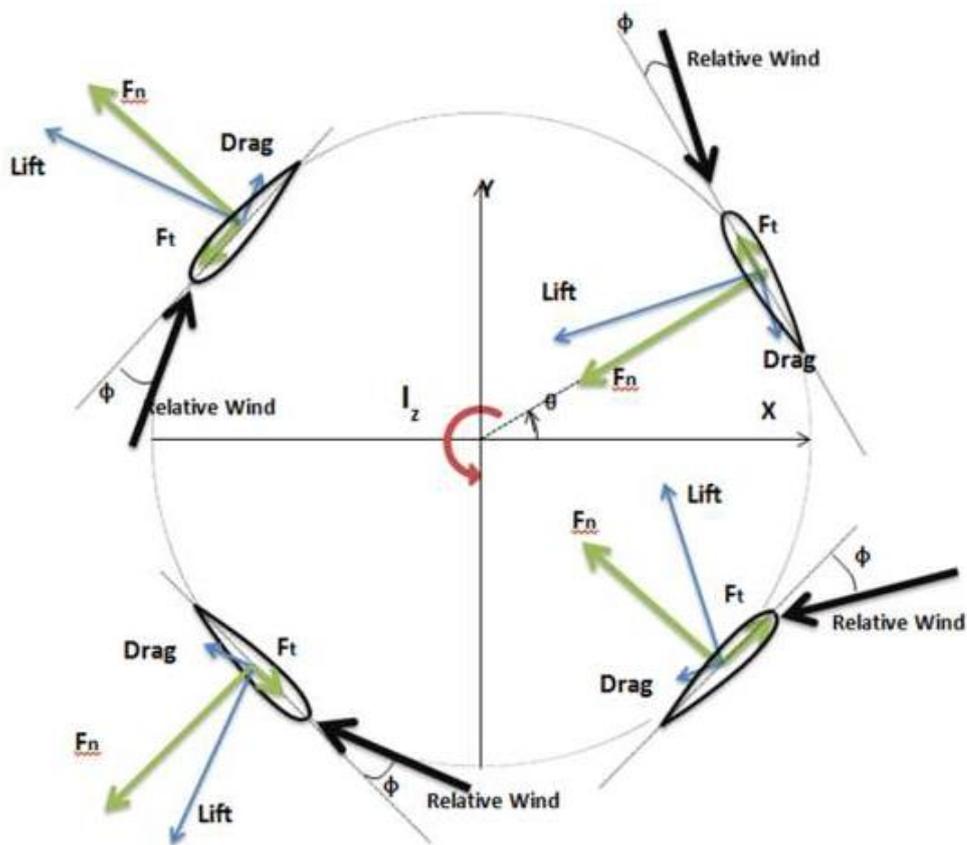
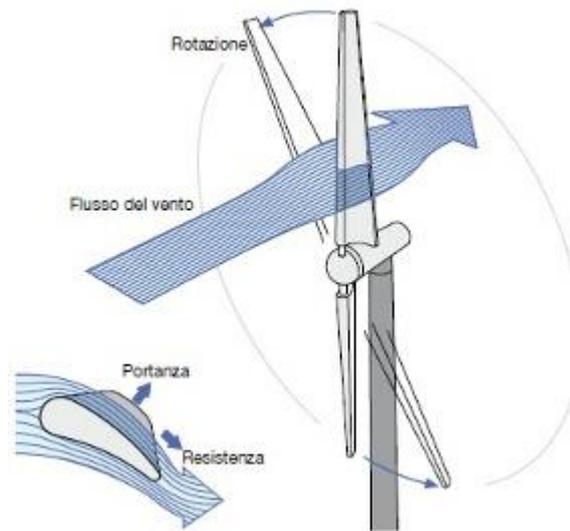


Figura 1.11. Aerodinamica della pala

In pratica la pala produce lavoro grazie a un salto di energia cinetica del flusso del vento e a un piccolo salto di pressione nelle immediate vicinanze del piano di rotazione delle pale.

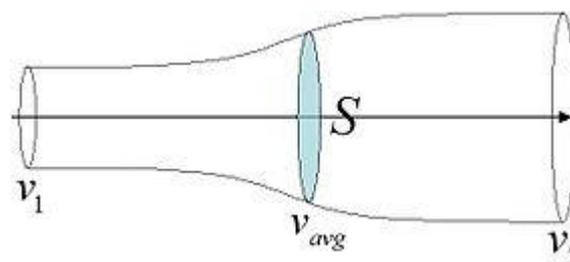
Dai calcoli applicati alle pale si ottengono almeno tre limiti di progettazione: innanzitutto il rendimento massimo si ottiene con un angolo di incidenza di riferimento pari a  $45^\circ$ ; in secondo luogo, le dimensioni delle pale non devono eccedere nel rapporto con il peso, altrimenti, per effetto giroscopico, il palo potrebbe essere divelto dalla sua base; in terzo luogo, le dimensioni delle pale non devono eccedere in lunghezza, ovvero la velocità periferica non deve avvicinarsi agli 800 km/h (222m/s) per evitare la generazione di onde d'urto transoniche che causerebbero una forza in contrapposizione che andrebbe a sommarsi alla resistenza aerodinamica.



**Figura 1.12.** Principio di funzionamento di un aerogeneratore

Il fisico tedesco Albert Betz, fu in grado di sviluppare una propria legge applicata alle eliche e alle pale degli aerogeneratori riassunta qui di seguito.

Gli aerogeneratori sono turbine eoliche che utilizzano l'energia cinetica di un flusso d'aria che attraversa il rotore. La differenza di velocità della massa d'aria tra monte ( $V_1$ ) e valle ( $V_2$ ) del rotore si riflette in una differenza nell'area occupata dalla massa d'aria, corrispondente alla quantità di energia cinetica che muove il rotore.



**Figura 1.13.** Portata del vento attraverso le pale dell'aerogeneratore

Una turbina eolica devia il vento prima che questi arriva alla turbina stessa: ciò significa che non sarà mai possibile sfruttare tutta l'energia disponibile del vento.

Secondo la teoria di Betz la potenza estraibile da una turbina eolica (potenza meccanica utile) è data dalla seguente espressione:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot 4a \cdot (1 - a)^2$$

Dove  $A$  è l'area spazzata del rotore (in  $m^2$ ),  $v_1$  è la velocità del vento indisturbato a monte della turbina (in  $m/s$ ) e  $a$  è il fattore di interferenza che rappresenta il disturbo generato dal flusso del vento a valle della turbina dato da  $(v_1-v)/v_1$  dove  $v$  è la media tra le velocità del vento indisturbato a monte ed a valle del rotore.

Definendo il coefficiente di potenza  $c_p$  come rapporto tra la potenza  $P$  e la potenza  $P_0$  risulta:

$$c_p = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot 4a \cdot (1-a)^2}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3}$$

L'interferenza ottimale, cioè quella per cui il rendimento è massimo, è pari ad  $1/3$ ; sostituendo questo valore nell'espressione precedente si ottiene il massimo valore del coefficiente di potenza:

$$c_p = \frac{16}{27} \cong 0,593$$

Il massimo rendimento teorico energetico è quindi pari al 59,3%, questo valore è noto come Limite di Betz.

Allo stato attuale delle tecnologie, come già detto in precedenza, non è possibile raggiungere il valore massimo dell'energia estraibile dal flusso del vento per mezzo di una turbina eolica; solo nei casi ottimali il coefficiente di potenza raggiunge valori dell'ordine di 0,45-0,50.

# CAPITOLO 2

## Gli impianti eolici

### 2.1.Introduzione

L'evoluzione tecnologica delle moderne turbine eoliche è una storia di sfide ingegneristiche e scientifiche unite ad un forte spirito imprenditoriale. Negli ultimi venti anni, la taglia delle turbine è aumentata di un fattore superiore a 100 e i costi di generazione dell'energia si sono ridotti di 5 volte. L'industria eolica si è così trasformata da un settore idealistico e di nicchia ad una componente consolidata dell'industria energetica.

Come già evidenziato precedentemente, il concetto di motore alimentato dal vento è antico ma, nonostante l'evoluzione tecnologica, produrre una turbina eolica efficiente ed efficace non è affatto semplice perché il sistema deve soddisfare contemporaneamente diverse esigenze:

- generare energia elettrica di alta qualità e secondo specifici standard di compatibilità con la rete di distribuzione (frequenza, tensione e contenuto armonico);
- lavorare in remoto, con basse emissioni acustiche ed elevato rendimento aerodinamico;
- far fronte ad un'elevata variabilità delle caratteristiche del vento;
- richiedere interventi limitati di manutenzione;
- competere economicamente con le altri fonti di energia.

### 2.2.Tipologia e classificazione degli aerogeneratori

Esistono diverse classificazioni delle turbine eoliche in base ad esempio alle loro caratteristiche costruttive, alla potenza, alla taglia o per soluzione impiantistica. In base alla disposizione dell'asse del rotore, gli aerogeneratori sono classificati in due grandi categorie:

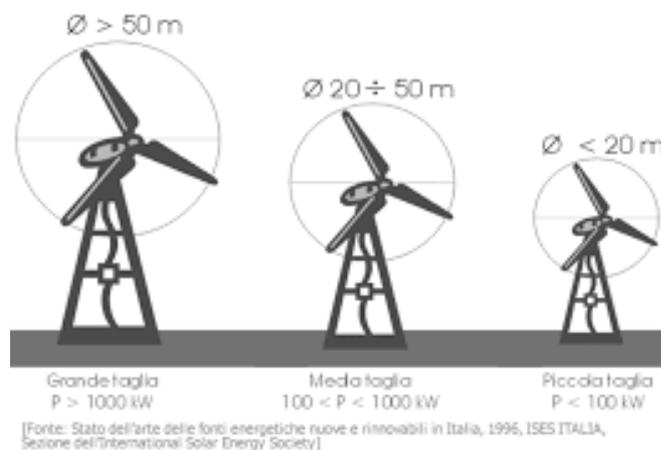
- ad asse orizzontale;
- ad asse verticale.

I primi sono ancora oggi quelli caratterizzati dal maggiore sviluppo tecnologico e dalla maggiore diffusione commerciale. Inoltre, gli aerogeneratori ad asse orizzontale, salvo alcune macchine ad asse verticale in fase di sperimentazione, sono tipici delle classi di

potenza di tagli superiore al MW di potenza. I secondi sono tipici delle classi di potenza inferiori al MW.

Le macchine eoliche si possono dividere in tre grandi gruppi, assumendo come criterio discriminante la taglia intesa sia come classe di potenza del generatore che come diametro del rotore.

Si definiscono aerogeneratori di piccola taglia quelli con potenza del generatore inferiore ai 100 kW e diametro del rotore minore di 20 m. Gli aerogeneratori di media taglia sono quelli con potenza compresa tra 100 kW e 1000 kW e diametro tra 20 m e 50 m. Infine ci sono quelli di grande taglia con potenza del generatore maggiore di 1000 kW e diametro del rotore superiore a 50 m.



**Figura 2.1.** Classificazione degli aerogeneratori per taglia

La necessità di incrementare la taglia delle turbine è motivata da una serie di fattori energetici ed economici.

Il primo obiettivo dei costruttori è sempre stato quello di massimizzare l'energia producibile dalle turbine eoliche. E poiché questa aumenta con l'aumentare della superficie spazzata, la conseguenza è stata il continuo aumento di altezza e diametro delle turbine eoliche.

Allo stesso tempo, l'incremento della taglia delle turbine ha portato ad una riduzione dei costi unitari dei materiali e delle infrastrutture.

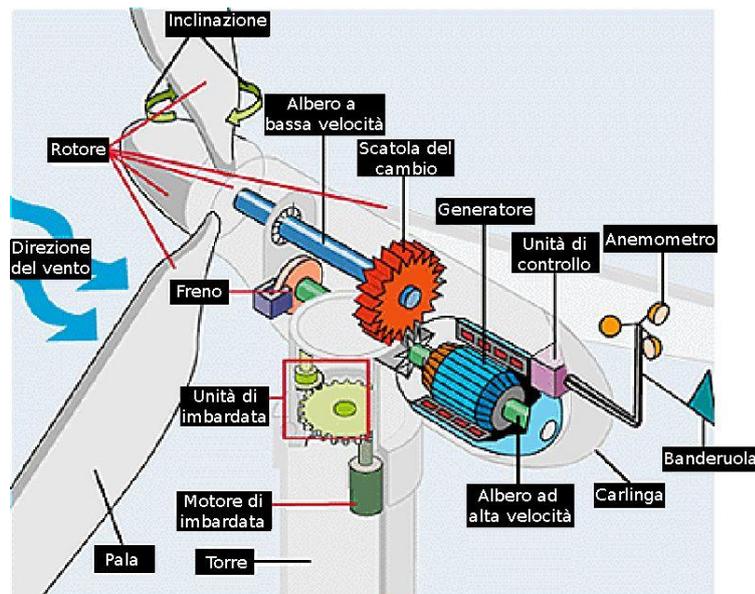
Nel più recente passato, il fattore chiave che ha influenzato ulteriormente lo sviluppo verso turbine di taglia sempre maggiore è stata la necessità per le applicazioni *off-shore* (impianti in mare aperto) di limitare il peso dei costi delle infrastrutture, proporzionalmente più alti rispetto a quelli degli impianti *on-shore* (impianti su terraferma), ed abbattere i costi per la manutenzione riducendo il numero delle macchine installate.

### 2.3. Configurazione generale di un aerogeneratore

Fermo restando che sono possibili, e talora disponibili sul mercato, configurazioni diverse, quella di seguito descritta è la configurazione più generale di un aerogeneratore. Le pale della macchina sono fissate su un mozzo e nell'insieme costituiscono il rotore, il mozzo a sua volta è collegato a un primo albero, o albero lento, che ruota alla stessa velocità angolare del rotore. L'albero lento è collegato ad un moltiplicatore di giri, da cui si diparte un albero veloce che ruota con velocità angolare data da quella dell'albero lento per il rapporto di moltiplicazione del moltiplicatore. Sull'albero veloce è posto un freno a valle del quale c'è il generatore elettrico da cui si dipartono i cavi elettrici di potenza.

Nella maggior parte delle macchine odierne, tutti i componenti menzionati sono ubicati in una cabina detta navicella la quale, a sua volta, è posizionata su un supporto cuscinetto in maniera da essere facilmente orientabile a seconda della direzione del vento.

Oltre a tali componenti, è presente un sistema di controllo che ha, nel caso più generale, diverse funzioni: il controllo della potenza che può essere eseguito comandando meccanicamente, elettronicamente ed idraulicamente la rotazione delle pale intorno al loro asse principale, in modo da aumentare o ridurre la superficie esposta al vento e, quindi, la portanza o anche tramite la possibilità di progettare il profilo delle pale in maniera da creare turbolenza aerodinamica quando la velocità del vento supera il limite massimo; il controllo dell'orientamento della navicella, detto controllo dell'imbardata, serve a mantenere la macchina orientata nella direzione del vento, ma può anche essere utilizzato, in linea di principio, per il controllo della potenza. L'intera navicella è posizionata su una torre che può essere a traliccio o conica tubolare.

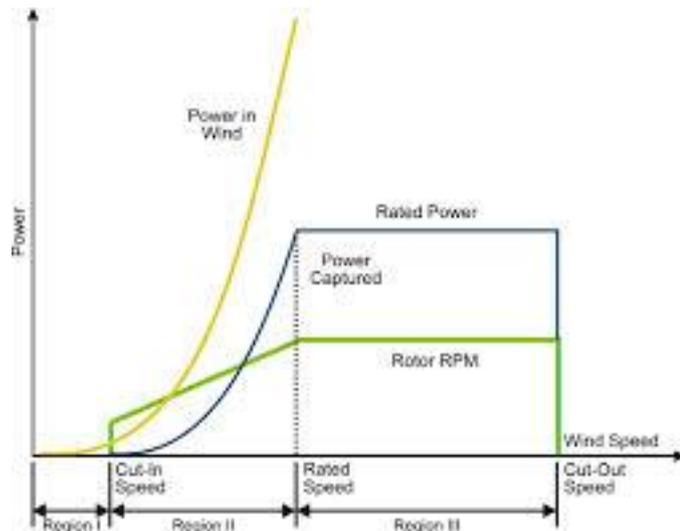


**Figura 2.2.** Schema dei componenti di un aerogeneratore

La macchina si avvia quando è presente un vento di velocità sufficiente (cut-in wind speed) e si interrompe quando vi è un vento di velocità superiore a quella massima per la quale è stata progettata (cut-off wind speed). La macchina è inoltre progettata per generare la potenza nominale (rated output power) ad una prefissata velocità del vento. La velocità del vento a cui viene raggiunta è detta appunto velocità nominale (rated output speed).

### 2.3.1. Il rotore

Generalmente, una moderna turbina eolica entra in funzione a velocità del vento di circa 3-5 m/s e raggiunge la sua potenza nominale a velocità di circa 10-14 m/s. A velocità del vento superiori, il sistema di controllo del passo inizia a funzionare in maniera da limitare la potenza della macchina e da prevenire sovraccarichi al generatore ed agli altri componenti elettromeccanici. A velocità di circa 22-25 m/s il sistema di controllo orienta le pale in maniera da interrompere la rotazione e da evitare forti sollecitazioni e danni meccanici e strutturali. L'obiettivo è quello di far funzionare il rotore con il massimo rendimento possibile con velocità del vento comprese tra quella di avviamento e quella nominale (intervallo all'interno del quale le moderne turbine di media e grande taglia generano circa il 50% dell'energia prodotta), di mantenere costante la potenza nominale all'albero di trasmissione quando la velocità del vento aumenta e di bloccare la macchina in caso di venti estremi.



**Figura 2.3.** Andamento della potenza in funzione della velocità

### 2.3.2. Le pale

Dai circa 10-15 m del 1980, la lunghezza delle pale ha raggiunto i 45 m per molte delle turbine utilizzate per impianti *on-shore* ed oltre i 60 m per le turbine *off-shore*.

L'utilizzo di nuovi materiali e di strumenti di lavoro e di analisi sempre più sofisticati ha portato ad evidenti miglioramenti nella progettazione delle pale con il risultato di avere pale sempre maggiori con aumento dei pesi più contenuti. Il recente utilizzo su alcuni modelli delle fibre del carbonio in sostituzione alle fibre di vetro ha consentito di ottenere pale più leggere ma, al tempo stesso, più resistenti e, quindi, più adatte in siti caratterizzati da forti venti.

A questo proposito, sebbene le fibre di carbonio siano circa dieci volte più costose delle fibre di vetro, l'utilizzo di pale più leggere riduce i carichi ai quali è sottoposta l'intera struttura di un aerogeneratore e, quindi, i costi totali di produzione.

Anche la progettazione ha conseguito risultati incoraggianti adattando le pale alle specifiche classi di vento: in siti caratterizzati da bassi venti, non essendoci il problema di forti sollecitazioni, è possibile utilizzare pale più lunghe ma anche più leggere e meno resistenti in maniera da massimizzare la producibilità di energia.

### 2.3.3. Il sistema di generazione

La generazione di energia elettrica da fonte eolica richiede un funzionamento dei sistemi elettrici differenti dal solito: mentre la maggior parte delle applicazioni richiede energia elettrica per produrre una coppia, i sistemi eolici usano una coppia per produrre energia elettrica. Inoltre, applicazioni di questo tipo funzionano generalmente ad una potenza nominale costante; le turbine eoliche, invece, devono generare energia elettrica a potenze variabili e funzionano per la maggior parte del tempo a bassi livelli

di potenza dove devono operare, diversamente dalla maggioranza delle macchine elettriche, alla massima efficienza aerodinamica ed elettrica per massimizzare la conversione dell'energia del vento in energia elettrica.

Il funzionamento del sistema di generazione a velocità variabili, caratteristico ormai della quasi totalità delle turbine eoliche in commercio, garantisce un miglior adattamento alle necessità della rete di distribuzione dell'energia, una riduzione dei carichi e può essere ottenuto in diverse maniere.

Il sistema tradizionalmente utilizzato sulle turbine eoliche prevede l'utilizzo di un albero di trasmissione, un moltiplicatore di giri a più stadi, un generatore ed un convertitore di potenza che permette di connettere il generatore alla rete con un'uscita stabile. L'energia elettrica generata a frequenza variabile, dipendente dalla velocità di rotazione del rotore, viene convertita dal convertitore (o dall'inverter) alla frequenza della rete.

#### *2.3.4. La torre di sostegno*

Esistono varie tipologie di torre di sostegno, ma la configurazione ormai consolidata è quella tubolare in acciaio su fondazione in cemento armato le cui caratteristiche dipendono dal sito di installazione. La principale variabile di una torre rimane la sua altezza: la maggior parte delle moderne turbine utilizza torri da 60 a 80 metri di altezza, ma, sempre più frequentemente, questo valore raggiunge anche i 100 metri. Quando le turbine era progettate esclusivamente per impianti *on-shore*, l'andamento dell'altezza delle torri di sostegno era direttamente proporzionale alla variazione della dimensione dei rotori. Attualmente, con l'entrata in produzione di turbine per impianti *off-shore*, questa proporzionalità è meno evidente.

#### *2.3.5. I sistemi di controllo e di protezione*

I sistemi di controllo ricevono segnali da decine di sensori e, attraverso una serie di operazioni automatiche, servono a:

- controllare la velocità del rotore;
- mantenere la turbina in allineamento con il vento;
- attivare o disattivare il generatore;
- mantenere i parametri di funzionamento del sistema di generazione in condizioni ottimali;
- proteggere la turbina da velocità eccessive o danni causati da condizioni estreme del vento;

- riconoscere malfunzionamenti ed inviare segnali di emergenza e di richiesta di intervento.

I sistemi di controllo possono essere di tipo passivo o attivo. I primi utilizzano i propri sensori ed entrano in funzione mediante l'utilizzo di forze naturali. I secondi usano apparecchiature elettriche, meccaniche, idrauliche o pneumatiche e necessitano di trasduttori che acquisiscano le variabili che determinano l'azione di controllo necessaria. Variabili tipiche da monitorare a questo scopo sono: velocità del rotore, velocità del vento, vibrazioni, temperatura esterna e del generatore, tensione e frequenza, carichi elettrici, potenza in uscita, errore di orientamento della navicella.

Questi sistemi sono anche responsabili di una serie di decisioni critiche per la sicurezza, quale l'interruzione del funzionamento dell'aerogeneratore in funzione di venti estremi. Poiché la maggior parte delle turbine lavora a velocità variabile, i sistemi di controllo regolano anche la velocità di rotazione ed i carichi del generatore in maniera da massimizzare il rendimento energetico in condizioni di velocità del vento variabili e ridurre i carichi sul sistema di generazione.

I sistemi di protezione possono essere di tipo meccanico, elettrico o aerodinamico, si attivano in occasione di malfunzionamenti del sistema di controllo o di altri malfunzionamenti riportando la turbina in sicurezza attraverso il blocco del rotore in qualsiasi condizione di funzionamento e sono costituiti da un'unità di acquisizione, un'unità di attivazione ed un'unità di blocco. Alcune situazioni tipiche che richiedono l'entrata in funzione del sistema di protezione sono: velocità eccessive, sovraccarichi o rotture del generatore, disconnessione dalla rete, sovraccarichi elettrici. Il sistema di protezione deve inoltre avere precedenza sui sistemi di controllo, funzionare anche in caso di interruzione dell'alimentazione elettrica, essere costituito da componenti progettati in alta classe di sicurezza.

L'unità più importante di un sistema di protezione è quella di blocco. Un'unità di blocco aerodinamica può funzionare ruotando la punta della pala o l'intera pala di 90° intorno all'asse longitudinale generando così delle forze aerodinamiche che si oppongono alla coppia del rotore. Altre tipologie di freni aerodinamici possono essere dei paracadute o degli spoiler.

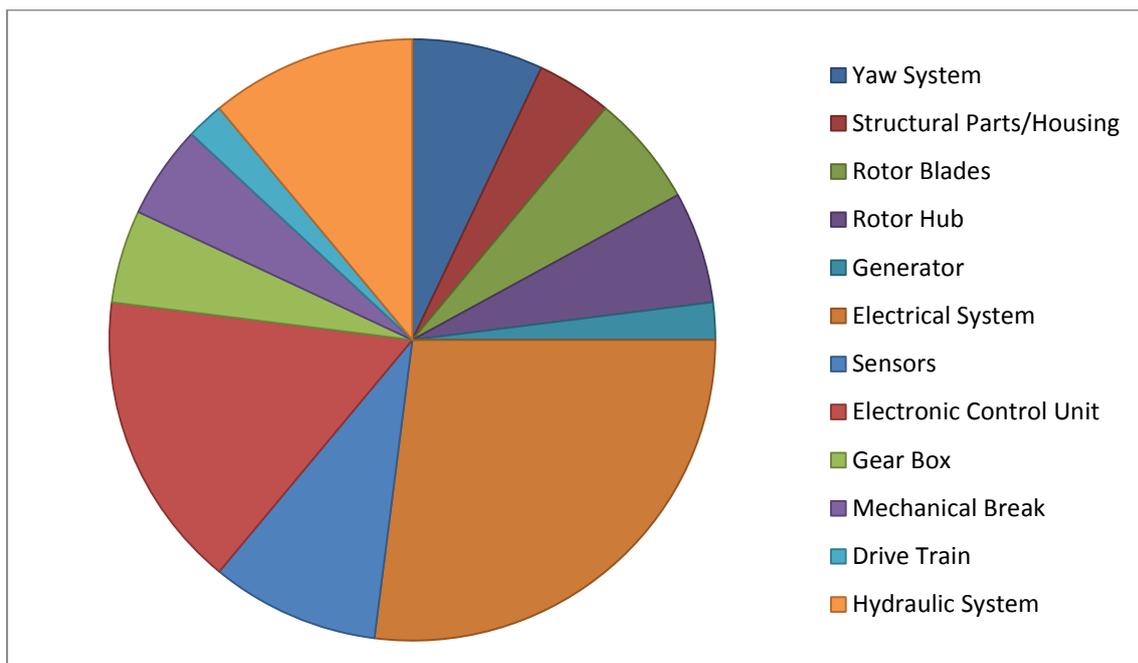
#### *2.3.6.Sviluppi tecnologici futuri*

L'evoluzione delle tecnologie applicate alle turbine eoliche ha raggiunto negli ultimi anni livelli di eccellenza. Sebbene nuove soluzioni siano già in fase di sviluppo avanzato, l'incremento dell'efficienza energetica di queste macchine, ottenuto in particolare aumentando le dimensioni del rotore e l'altezza, è un processo che porta ad

una serie di vincoli di tipo logistico ed economico che vanno tenuti in forte considerazione.

Uno dei vincoli che limita l'incremento di taglia delle turbine è che, se da una parte la producibilità energetica aumenta con il quadrato del diametro del rotore, dall'altra il volume, e quindi la massa, aumentano con il cubo del diametro. Ciò vuol dire che il costo di una turbina cresce più velocemente del ricavo proveniente dall'energia prodotta rendendo, ad un certo punto, antieconomico l'incremento di taglia.

Un altro vincolo è rappresentato dalla trasportabilità di questi componenti. Quindi, l'obiettivo dello sviluppo tecnologico è una sfida continua per i progettisti ed i produttori che richiede lo studio di nuovi materiali, più leggeri e resistenti, di sistemi di controllo e di potenza innovative, di approcci progettuali differenti e di processi produttivi, di trasporto e di montaggio più efficienti. Nella successiva figura sono rappresentati i settori dove l'industria eolica dovrebbe concentrare maggiormente le attività di ricerca e sviluppo.



**Figura 2.4.** Settori di ricerca e sviluppo

#### 2.4. Gli impianti *off-shore*

Gli impianti eolici *off-shore* hanno la possibilità di sfruttare una risorsa (il vento) abbondante e ampiamente diffusa, il potenziale economico di poter raggiungere costi competitivi e, quindi, di poter avere un importante impatto sulle future richieste di energia a livello mondiale.

Rispetto alle turbine installate *on-shore*, le *off-shore* si differenziano per le seguenti caratteristiche:

- la taglia è sempre superiore ai 2 MW;
- i sistemi di fondazione;
- la velocità di rotazione della punta delle pale è maggiore e può arrivare a valori superiori a 80 m/s;
- poiché il profilo verticale del vento in mare è meno ripido, non è necessario raggiungere altezze elevate del mozzo e, quindi, l'altezza della torre di sostegno è generalmente di 80 m, inferiore all'altezza delle turbine *on-shore* di pari taglia;
- impatti potenziali sull'ambiente differenti.

Per quanto riguarda le fondamenta, a seconda della profondità, si possono adottare diverse modalità di fondazione che devono essere in grado di sopportare, oltre che i carichi statici, la combinazione dei carichi dinamici dovuti al vento, al moto ondoso ed alla struttura della turbina stessa. Nel dimensionamento delle strutture di fondazione è inoltre determinante la conoscenza delle caratteristiche geologiche e geotecniche del fondo da valutare attraverso una completa serie di indagini specifiche in sito.



**Figura 2.5.** Esempio di impianto *off-shore*

L'industria eolica *off-shore* rimane un settore relativamente giovane e che, conseguentemente, sarà oggetto di un forte sviluppo nei prossimi anni.

A differenza di ogni altro settore dell'industria *off-shore*, nel caso dell'eolico *off-shore*:

- ogni impianto è costituito da installazioni multiple e distribuite su aree molto più ampie;

- molti impianti sono posizionati vicino alla costa ed in acque basse;
- le questioni economiche pongono vincoli molto restrittivi.

Questi fattori implicano che il contributo degli altri settori dell'industria *off-shore* sia limitato e che le tecnologie debbano evolvere in breve tempo utilizzando le informazioni di un numero limitato di progetti.

L'implementazione delle tecnologie avrà come obiettivi l'aumento dell'affidabilità degli impianti, la riduzione dei rischi (economici, tecnici e sulle persone) e dei costi, la protezione dell'ambiente e l'eliminazione delle barriere di tipo tecnico, normativo, ambientale, socioeconomico e politico che rallentano lo sviluppo di tale industria.

## 2.5. Gli impianti minieolici

Il minieolico ha iniziato a svilupparsi a partire dalla fine degli anni '90, grazie alla crescita del mercato eolico "domestico", relativo cioè alle applicazioni per usi residenziali o per piccole aziende agricole. Le aree di particolare interesse per questo mercato sono quelle caratterizzate da prezzi elevati delle fonti fossili o molti dei Paesi in Via di Sviluppo (PVS), dove ancora oggi molte persone vivono senza energia elettrica.

Negli ultimi anni le turbine di piccola taglia (con potenza inferiore ai 100 kW) hanno avuto un notevole sviluppo tecnologico grazie soprattutto all'esperienza maturata nel settore delle turbine con potenze superiori. Il maggior risultato è stato l'abbassamento del limite minimo di funzionamento degli aerogeneratori che possono iniziare a produrre energia anche con velocità del vento inferiori a 2 m/s.

In questa categoria si possono distinguere due tipologie principali di turbine classificate in base all'orientazione dell'asse, verticale o orizzontale, con diverse potenze e con *range* di funzionamento molto ampi per quanto riguarda la velocità del vento e che, quindi, possono funzionare per alcune migliaia di ore all'anno.

Anche dal punto di vista economico i sistemi minieolici devono raggiungere la piena competitività: i costi per kW installato variano da 2000 a 6000 euro per le turbine ad asse orizzontale e ad oltre 15000 euro per quelle ad asse verticale contro, ad esempio, i 1500 €/kW delle turbine di grande taglia.

### *2.5.1. Le turbine ad asse orizzontale*

Sono ancora oggi quelle caratterizzate dalla maggiore diffusione commerciale e ne esistono di diversi tipi a seconda del numero di pale. All'aumentare del numero di pale diminuisce la velocità di rotazione, aumenta il rendimento e cresce il prezzo.

Il mercato si è concentrato sul bipala e tripala, orientandosi prevalentemente su quest'ultima configurazione caratterizzata da coppia motrice più uniforme (e quindi

durata maggiore), energia prodotta leggermente superiore (cioè rendimento maggiore), nonché minore disturbo visivo, in virtù di una configurazione più simmetrica e di una minore velocità di rotazione.

Le turbine ad asse orizzontale hanno il vantaggio di essere:

- tecnologicamente mature ed efficienti;
- adatte ai regimi anemologici italiani;
- economiche (i prezzi variano da 6000 a 2000 €/kW a seconda della taglia e sono a queste inversamente proporzionali).

Tra gli svantaggi vanno ricordati quelli di non essere adatte all'ambiente urbano, di essere rumorose e di avere, anche se di dimensioni nettamente inferiori rispetto alle turbine di taglia superiore, impatto visivo.

La maggior parte delle turbine utilizza pale realizzate in materiale compositi: fibre di vetro rinforzato, con minor frequenza, fibre di carbonio e, raramente, legno. È stato abbandonato l'utilizzo di alluminio a causa della sua propensione alla deformazione sotto sforzo.

Le dimensioni ridotte non consentono l'alloggio di motori di imbardata o altri componenti di cui sono dotate le turbine di taglia superiore: quasi tutte le mini turbine montano timoni direzionali per orientare il rotore in direzione del vento.

Il sistema di generazione più diffuso è costituito da alberi a trasmissione diretta, alternatori a magneti permanenti e funzionamento a velocità variabile: si tratta della configurazione più semplice e robusta. Per le turbine ad uso domestico si trovano le seguenti configurazioni di alternatore: magneti permanenti, alternatore convenzionale a campo avvolto, generatore a induzione.

### *2.5.2. Le turbine ad asse verticale*

I vantaggi di queste macchine sono di essere adatte all'ambiente urbano e di non essere rumorose (emissioni pari a 0 dB ad 1 metro di distanza).

Gli svantaggi sono invece di non essere ancora adatte ai regimi anemologici italiani ed economiche (i prezzi sono superiori a 5000 €/kW e possono raggiungere i 15-20000 €/kW).

Le due principali tipologie di turbine ad asse verticale sono:

- la macchina di Savonius;
- la macchina di Darreius.

La macchina di Savonius fu inventata circa sessanta anni fa da un finlandese ed è impiegata essenzialmente per il pompaggio dell'acqua, e, di recente, anche nel campo della produzione di energia elettrica. Si tratta di una macchina molto semplice dal punto di vista sia costruttivo che del funzionamento. Oltre alle caratteristiche di

semplicità, ha il vantaggio di essere molto robusta e di avere una forte coppia di spunto, cosa che ne consente l'avviamento anche con venti debolissimi.

La macchina di Darreius fu inventata negli anni '20 da una francese che le diede il nome. Viene anche chiamata ibrida perché presenta contemporaneamente caratteristiche di altre macchine: asse di rotazione verticale – analogamente alla Savonius – e pale di tipo aerodinamico, come gli altri aerogeneratori.

La macchina di Darreius è caratterizzata da grande semplicità di costruzione e da alto rendimento che si attesta attorno al 40%, riuscendo a combinare i vantaggi di entrambe le tipologie.

Il regime di rotazione è molto elevato. Invece, la coppia di spunto molto bassa non permette a questa tipologia di macchine di avviarsi con venti deboli.



**Figura 2.6.** Esempi di macchina di Savonius e di Darreius

# CAPITOLO 3

## Lo sviluppo di un progetto eolico

### 3.1.Fasi principali

Il progetto di un impianto eolico si suddivide in due grosse fasi:

- lo studio di fattibilità, che comprende lo studio anemometrico;
- la realizzazione.

La prima fase, lo studio di fattibilità, include le valutazioni per cui il progetto può essere realizzato dal punto di vista tecnico, la convenienza dal punto di vista economico e i tempi di esecuzione. Il fine è quello di assicurarsi, prima di impegnarsi soprattutto economicamente, del suo successo; può essere rivisto e aggiornato più volte fino a ottenere il risultato desiderato.

Lo studio di fattibilità è solitamente impiegato come parte centrale del piano di impresa o *business plan*, utile per reperire i finanziamenti necessari e per ottenere permessi autorizzativi. La seconda fase, la realizzazione, include tutto il necessario perché il progetto sia pianificato, definendone il contesto, gli obiettivi, le responsabilità, il costo e la qualità, fino alla messa in esercizio dell' impianto.

Prevede l'acquisto delle apparecchiature, gli appalti, la direzione e la sicurezza dei lavori, i collaudi, l'allaccio in rete e la vendita dell'energia.

#### *3.1.1.Lo studio di fattibilità*

L'approccio a un progetto eolico è globale e multidisciplinare: a questo fine è importante inquadrare correttamente in che ambito questo sarà sviluppato e quali sono gli attori coinvolti e se il progetto sarà realizzato per se stessi, per altri o da terzi.

In tutte le fasi di realizzazione dell'impianto non bisogna mai dimenticare che il principale referente è l'utente, al fine di soddisfare tutte le sue necessità. La realizzazione deve inoltre soddisfare lo stato dell'arte, i vincoli economici e quelli temporali.

Si andranno pertanto a definire:

- producibilità elettrica dell'impianto;
- condizioni di vendita e possibili scenari di ritorno economico;
- autorizzazioni e permessi necessari.

La producibilità di un impianto eolico è, chiaramente, legata alla disponibilità del vento, espressa in funzione della distribuzione di frequenza e della durata della velocità del vento. Non è pertanto sufficiente conoscere la velocità media del vento in un sito per stimare la quantità di energia elettrica producibile; occorre conoscere l'intera distribuzione del vento nel tempo.

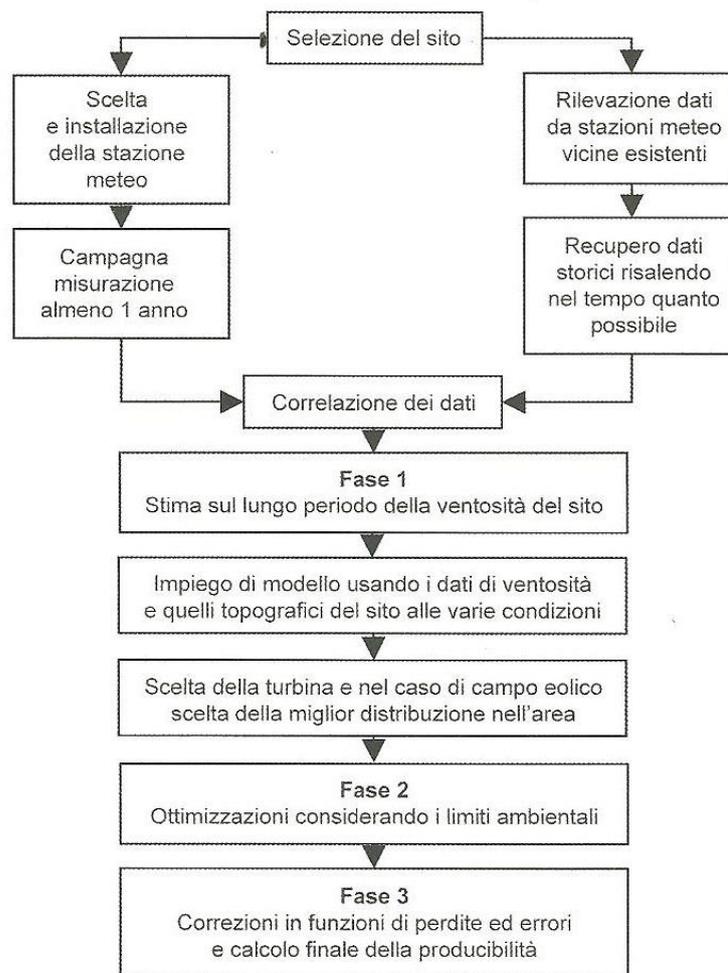
È possibile affidarsi a un'analisi preliminare e successivamente attivarsi per una campagna anemologica, specie se si desidera ricevere un finanziamento e quindi comprovare con dati oggettivi le valutazioni davanti al finanziatore. È il caso di evidenziare che la campagna è inoltre richiesta obbligatoriamente per ottenere autorizzazioni ambientali.

Di seguito vengono riportati graficamente i principali elementi da considerare e i flussi informativi da seguire per il calcolo ipotetico della producibilità; naturalmente, più informazioni si avranno a disposizione provenienti da sorgenti diverse più il modello sarà esatto nella sua previsione.

È importante anche poter disporre di dati caratteristici di aerogeneratori in alternativa l'uno all'altro per poter effettuare diverse simulazioni, valutarne i comportamenti e scegliere la macchina in funzione di un modello o di un costruttore, potrebbe determinare la scelta di un prodotto magari più costoso come spesa iniziale ma in grado di ripagare in tempi più brevi in funzione dell'alto rendimento oppure, se il sito è percorso da venti prevalenti costanti, determinando così condizioni per cui le prestazioni dei generatori si equivalgono, la scelta del prodotto sarebbe determinata unicamente dal prezzo di acquisto.

Una volta individuata la producibilità, si accoppierà un modello di funzionamento produttivo dell'impianto eolico, dove andranno inseriti i dati ambientali e operativi, delle apparecchiature e delle variabili in gioco, compresa la dismissione dell'impianto realizzato.

In questo modo, si potranno calcolare i possibili scenari di ritorno economico. Considerando che il prezzo di vendita è stabilito e la produzione è tutta acquistata, bisognerà quantificare almeno quando l'impianto si ripaghi nel suo complesso e da quando comincerà a generare profitto considerando gli oneri di conduzione e detraendone le tasse.



**Figura 3.1.** Principali elementi da considerare e flussi informativi da seguire per il calcolo ipotetico della producibilità

Al fine di una maggiore schematicità di seguito si riportano i dati utili minimi:

- a) potenza nominale aerogeneratore (kW);
- b) numero degli aerogeneratori componenti l'impianto eolico;
- c) ore annue equivalenti di funzionamento degli aerogeneratori a potenza nominale, da cui risulti la loro producibilità teorica annua di energia;
- d) efficienza impianto/componenti elettrici (media 3,0%);
- e) disponibilità di aerogeneratori (stima 3,0%);
- f) sporcamento e ghiaccio sulle pale (stima 1,0%);
- g) interferenza da altri ostacoli (stima 0,2%);
- h) isteresi del vento sovrastante (stima 0,4%); 46
- i) indisponibilità della rete, variabile a seconda del sito (0,5-1,0%);
- j) costo di impianto complessivamente sostenuto per unità di potenza installata (€/kW);
- k) distanza del sito dal possibile punto di allacciamento alla rete elettrica (km);

- l) onere medio annuo di esercizio e manutenzione espresso come percentuale del costo di impianto;
- m) compenso annuo corrisposto ai proprietari dei terreni e ai comuni, ad esempio espresso come percentuale del ricavo dalla vendita dell'energia;
- n) prezzo di vendita medio dell'energia elettrica ceduta alla rete (€/kWh);
- o) incentivazione mediamente percepita (ad esempio prezzo dei certificati verdi) per unità di energia elettrica ceduta alla rete (€/kWh);
- p) numero di anni di disponibilità dell'incentivazione (ad esempio, anni in cui vengono concessi i certificati verdi);
- q) numero di anni di durata dell'investimento (di solito pari alla vita utile degli aerogeneratori);
- r) tasso di attualizzazione;
- s) tasso di interesse atteso per il capitale proprio.

Per gli impianti di taglia uguale o inferiore a 20 kW, i punti i), k), m) e n), che sono installati in edifici o comunque in prossimità del contatore/punto di consegna e che sfruttano lo scambio sul posto, non sono validi.

Per quanto riguarda gli indicatori finanziari i principali da ricavare sono:

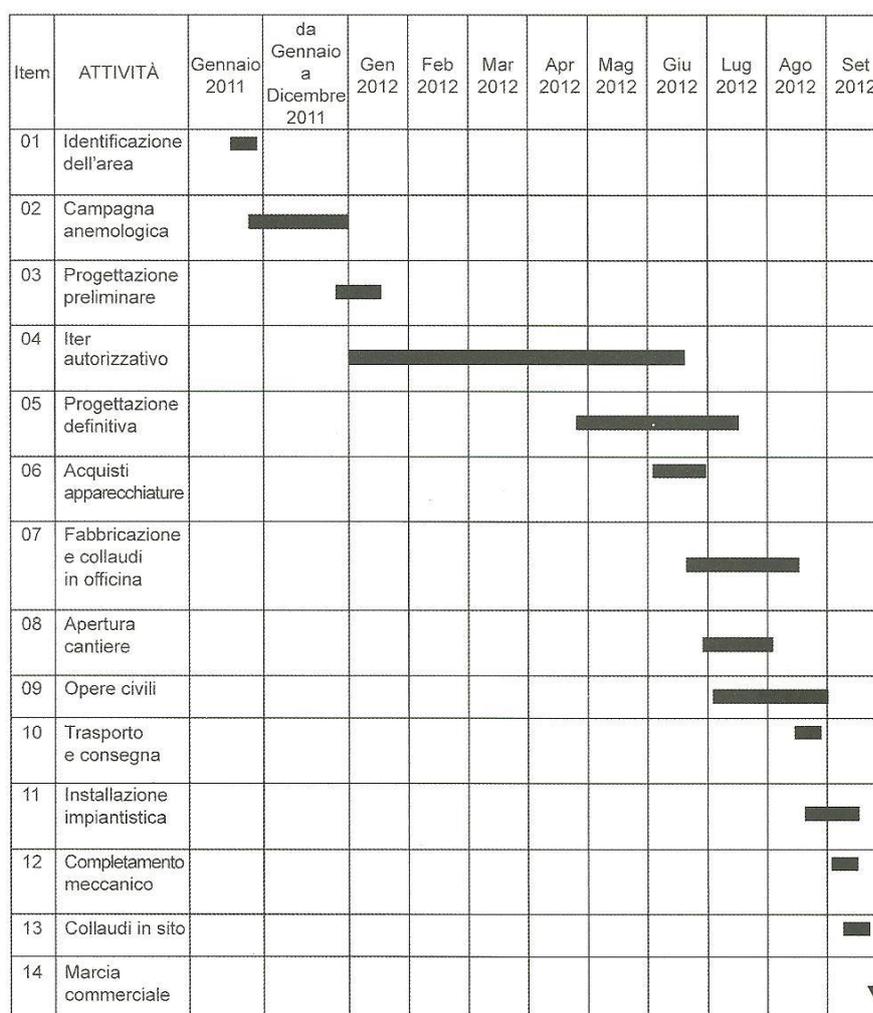
- valore attuale netto (VAN): è un indicatore completo, solitamente rappresentato graficamente per facilità di letture, il cui percorso ideale prevede che il primo anno sarà negativo e pari, in valore assoluto, al costo capitale dell'impianto stesso. Negli anni successivi, con l'inizio della produzione di energia, subentreranno anche i ricavi ottenuti dalla vendita di quest'ultima e degli eventuali certificati verdi. In generale, l'investimento risulterà conveniente se alla fine della durata della vita utile dell'impianto, il VAN sarà positivo, indifferente se nullo oppure disastroso se negativo. Quanto maggiore è il VAN, tanto più vantaggioso si prospetta l'investimento;
- costo medio dell'energia (CME): può essere interpretato come il ricavo costante per unità di energia prodotta e venduta (€/kWh), ovvero l'introito unitario che compensa esattamente i costi sostenuti, senza dare utili. Rappresenta la valutazione più immediata per confrontare l'attrattiva della fonte eolica rispetto ad altre fonti energetiche;
- tasso interno di rendimento (TIR): è quel valore del tasso di attualizzazione che rende nullo il VAN. Risulta utile per confrontare l'investimento in un impianto eolico con tassi di interesse che potrebbero essere percepiti in un investimento di tipo puramente finanziario (titoli, azioni, depositi, ecc.). se il TIR è inferiore a questi ultimi l'iniziativa è senz'altro sconsigliabile. Quanto maggiore è il VAN, tanto più vantaggioso si prospetta l'investimento;

- tempo di ritorno (TR) dell'investimento, cioè in quanto tempo il flusso di cassa raggiunge i costi di investimento (punto di pareggio – *break even point*). Quanto più è breve il TR, quanto prima l'investimento genererà profitto netto.

Ultimo passo dello studio di fattibilità è la previsione dei tempi e delle risorse che si ritengono necessari per arrivare a realizzare l'impianto.

Questa previsione, oltre a essere riportata analiticamente, può essere illustrata graficamente attraverso un diagramma di Gantt, dove sull'asse verticale sono indicate in sequenza di accadimento le principali attività ritenute necessarie, rappresentate poi a indicare la durata e l'arco temporale in barre orizzontali di lunghezza variabile.

Le barre temporali esprimono l'arco di tempo in cui si prevede sia iniziata e conclusa l'attività, l'impegno esatto va valutato in funzione della specifica lavorazione.



**Figura 3.2.** Diagramma di Gantt relativo ad un impianto eolico

Si noti come le fasi più lunghe sono rappresentate dalla campagna anemologica, senza la quale però si correrebbe il rischi di avere un'alta incertezza sulla producibilità

del sito, e dall'iter autorizzativo. Quest'ultimo in particolare è un percorso critico per la realizzazione dell'impianto, la cui durata può essere estremamente variabile e non dipende direttamente dall'investitore, pertanto si consiglia di procedere agli acquisti delle apparecchiature, che costituiscono il maggior aggravio economico solo al termine dell'iter e una volta ottenute tutte le autorizzazioni.

Le attività successive sono dipendenti dalla disponibilità sul mercato dei prodotti e dalla celerità con cui si realizzerà l'impianto. Un punto critico è rappresentato dall'eventuale complessità dell'opera civile, solo al termine della quale potrà essere installato l'aerogeneratore. Un riferimento temporale minimo è quello di considerare, a opera finita, almeno 40 giorni per permettere alla gettata di calcestruzzo di arrivare correttamente a fine maturazione.

In passato si tendeva ad affidare a un unico fornitore, di tipo *integratore*, la realizzazione del progetto e a cui si trasferiva ogni rischio economico e tecnologico. Oggi invece un metodo diffuso e molto più orientato alla gestione finanziaria consiste nell'affidare a professionisti *consultant* gli studi preliminari e di fattibilità dell'intervento. Gli stessi professionisti accompagnano poi il committente in tutte le fasi successive, quali l'acquisto delle tecnologie, l'assegnazione degli appalti, la realizzazione e il collaudo del progetto, garantendo così competenze specifiche per raggiungere risultati in assoluta imparzialità.

Un ulteriore ruolo assegnato a professionisti è quello di direttore dei lavori, il quale per assicurare tempi e metodi si serve di varie tecniche di gestione del progetto (dette anche di *project management*).

### 3.1.2. La realizzazione

Nello sviluppo della realizzazione dell'impianto eolico i riferimenti principali saranno il rispetto dei tempi di esecuzione e della spesa preventiva al fine di garantire il ritorno dell'investimento all'interno di quanto stimato e messo a disposizione dall'investitore.

Il diagramma di Gantt prodotto in fase preliminare viene così rivisto, estendendo in dettaglio le attività e aggiornando le date in funzione dello sviluppo dei lavori: a ciò si affianca il progressivo incremento delle spese per consentire di vigilare costantemente sui progressi e intervenire per tempo sugli eventuali scostamenti con quanto preventivato.

L'attività di progettazione è essenzialmente l'ingegnerizzazione di quanto previsto. Il documento CEI 0-2, *Guida per la definizione della documentazione di progetto degli impianti elettrici*, pur nato per una specifica disciplina, fornisce comunque un'impronta di riferimento per sviluppare la documentazione necessaria per un impianto di generazione eolica.

Per il progetto elettrico si raccomanda che questo consideri quanto segue:

- il collegamento non deve causare disturbi alla tensione e alla continuità sulla rete;
- in caso di mancanza di tensione sulla rete, l'impianto del produttore non può in alcun caso immettere tensione;
- qualunque evento anomalo, che si verifichi sull'impianto del produttore, deve provocare l'automatica interruzione del parallelo;
- semplicità e rapidità di manutenzione;

Sul mercato esistono programmi di ausilio alla stesura della documentazione nel rispetto degli standard, alcuni dei quali sono realizzati anche dagli stessi produttori delle apparecchiature. Per il progetto civile o comunque della struttura di sostegno questo deve sempre prevedere:

- la verifica strutturale;
- la condizione peggiore di vento.

La condizione peggiore di vento da considerare per i calcoli delle strutture di supporto e nella scelta delle apparecchiature è un fenomeno meteorologico eccezionale quale può essere, per esempio, la tromba d'aria. I dati di una tromba d'aria di progetto da considerarsi dovranno essere almeno i seguenti:

- velocità tangenziale 88 m/s;
- velocità di traslazione 18 m/s;
- caduta di pressione 1,245 kgf/m<sup>2</sup> in 5 s.

È importante prevedere la possibilità di dismettere o ampliare in futuro l'impianto, considerando, ad esempio, la facile rimozione e la possibilità di effettuare la sostituzione dell'aerogeneratore con uno di nuova fabbricazione mantenendo la medesima fondazione.

In conclusione, sono necessari l'accertamento e la valutazione di tutto il progetto, comprendente l'attività di analisi critica documentata, esauriente e sistematica di quanto progettato per valutarne le capacità di soddisfare i requisiti di qualità, individuare eventuali problemi e proporre soluzioni denominate *design review*.

Riguardo agli acquisti, se il progetto non ritiene necessario l'impiego di specifiche apparecchiature o comunque l'utilizzo di queste è limitato a impianti di taglia uguale o inferiore a 20 kW, è sicuramente utile rivolgersi a costruttori nazionali che possono garantire rapidamente assistenza, disponibilità di ricambi e conformità a disposizione di legge italiana.

Per ciò che concerne gli appaltatori per i lavori civili, di montaggio e installazione, la soluzione migliore consiste nel rivolgersi a imprese qualificate quanto più vicine

possibile al sito di installazione che sicuramente potranno garantire, a parità di qualità di prestazione e di costi, servizi logistici e costi più convenienti rispetto a imprese più distanti.

Per impianti superiori a 20 kW, si consiglia di eseguire sempre i collaudi di officina almeno degli aerogeneratori e degli inverter per qualificarne la bontà e soprattutto come occasione formativa per conoscere al meglio quanto si sta acquistando e un domani si sottoporrà a manutenzione.

L'attività in sito comporta l'apertura del cantiere che dovrà essere condotto nel rispetto della sicurezza e delle norme antinfortunistiche.

Per i rischi specifici, le fasi di lavorazione interessate sono l'esecuzione di:

- lavori civili, siano queste le fondazioni in calcestruzzo o la sola installazione di un palo a muro;
- l'installazione dell'aerogeneratore, che solitamente comporta la movimentazione di carichi ingombranti e pesanti in quota;
- l'energizzazione di impianto, che deve essere sempre preceduta da una verifica di continuità e isolamento delle connessioni elettriche.

Al momento della messa in opera è obbligatoria la presenza di almeno un membro dell'ufficio della direzione dei lavori incaricato a norma di legge e di un responsabile tecnico dell'impresa appaltatrice.

Per quanto riguarda il trasporto, va preventivamente verificato che gli ingombri delle apparecchiature possano accedere al sito senza problemi. Per quel che concerne la posa, deve essere innanzitutto premontato tutto quanto può essere eseguito a terra in tutta sicurezza; successivamente vengono erette e fissate, per mezzo di autogru, prima la torre e poi la navicella e, per finire, le pale.

Chi esegue i montaggi deve raggiungere l'aerogeneratore in modo sicuro e opportunamente assicurato per mezzo dei dispositivi di protezione individuale necessari.

Visti i rischi e la complessità dell'operazione, per la durata di tutte queste operazioni (solitamente un giorno) l'area di lavoro dovrà essere opportunamente recintata e andrà interdetto il transito ai non addetti ai lavori. La squadra di lavoro dovrà essere composta da tre persone più il gruista.

Una volta installato l'aerogeneratore, rimangono da ultimare le connessioni che possono essere predisposte preventivamente, così come la posa del quadro inverter. Seguirà l'energizzazione e il periodo di prova di almeno sei mesi per gli aerogeneratori di taglia superiore ai 6 kW; la verifica può essere efficacemente svolta tramite un sistema di telecontrollo.



**Figura 3.3.** Fase di realizzazione della fondazione di un aerogeneratore

### 3.2.La manutenzione

Durante la manutenzione particolare attenzione deve essere posta a tutti gli elementi in movimento che con il tempo possono deformarsi o cedere, costituendo così un pericolo di collisione incipiente.

I periodi migliori per programmare la manutenzione periodica sono all'inizio e alla fine della stagione invernale, ovvero prima e dopo la stagione di maggior producibilità prevista, peraltro corrispondente a quella di maggior funzionamento, anche nelle condizioni climatiche più gravose.

Attraverso le informazioni raccolte nelle banche dati di assicurazioni e costruttori è possibile osservare che le parti soggette a maggior frequenza di guasto sono anche quelle che richiedono maggior tempo per la loro sostituzione, determinando così un fermo impianto più prolungato.

In funzione delle dimensioni dell'impianto, possono essere adottati sistemi di autodiagnostica, ad esempio per le apparecchiature elettriche, o misure attraverso sistemi portatili come quelli per rilevare anomalie attraverso la misura delle vibrazioni.

Generalmente, le operazioni di manutenzione rientrano nel contratto sottoscritto tra il proprietario dell'impianto ed i fornitori dei componenti (turbine, impianti elettrici, sistema di monitoraggio e controllo a distanza, ecc.) che si impegnano a svolgere direttamente le attività previste. Complessivamente, la forza lavoro per queste operazioni è composta da 2 addetti ogni 20-30 turbine installate. Mediamente, l'attività su ogni turbina è di circa 40 ore all'anno.



## CAPITOLO 4

### L'analisi economica e finanziaria

#### 4.1. Analisi economica

I principali parametri che incidono sull'economia di un impianto eolico sono:

- costi di investimento;
- costi di gestione e manutenzione;
- produzione di energia elettrica e prezzo di vendita;
- meccanismi di incentivo o di finanziamento;
- vita della turbina;
- tasso di sconto.

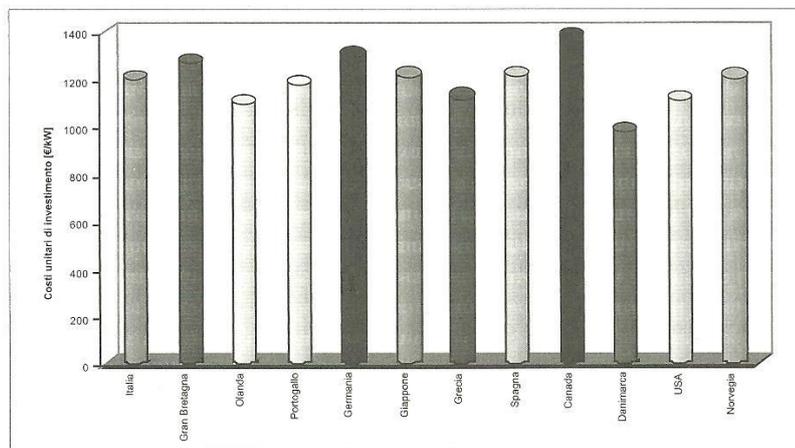
Tra questi, i più importanti sono la produzione energetica della turbina ed i costi di investimento. Poiché la prima dipende in massima parte dalle condizioni anemologiche, la scelta della turbina ottimale è determinante per la fattibilità economica di un impianto.

I costi capitali di un progetto eolico sono dominati dai costi della turbina scelta: questi incidono mediamente per il 76% sul totale; mentre i costi per la connessione alla rete e quelli per le fondazioni si attestano rispettivamente al 9% ed al 7% circa (tabella 4.1.).

	<b>Percentuale [%]</b>
Turbine	75,6
Fondazioni	6,5
Opere elettriche	1,8
Connessioni alla rete	8,9
Viabilità	0,9
Sistemi di controllo	0,3
Consulenze	1,2
Terreni	3,9
Costi finanziari	1,2

**Tabella 4.1.** Ripartizione percentuale dei costi capitali di un impianto eolico

Il costo totale per kW installato è di circa 1000-1500 € e può variare in maniera significativa da un paese all'altro. I costi più bassi vengono registrati in Danimarca, seguita da Grecia e Olanda. Per Gran Bretagna, Spagna e Germania, i costi sono del 25-30% più alti che in Danimarca; nel nostro Paese lo sono circa del 20%.

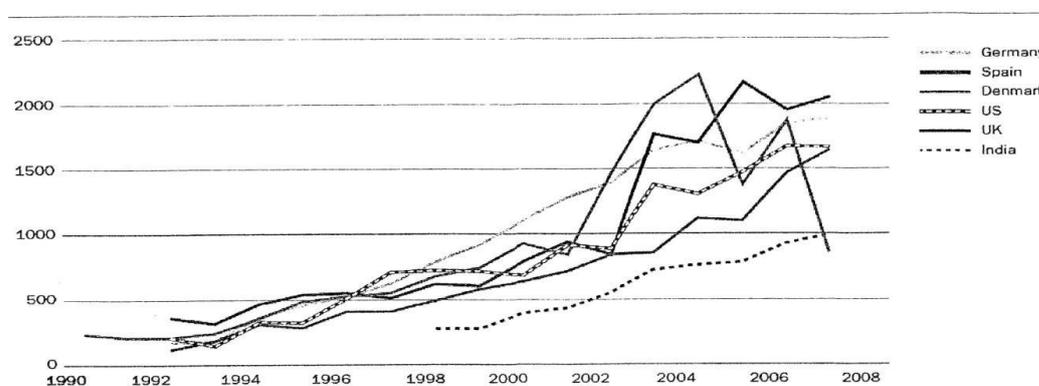


**Figura 4.1.** costi unitari totali di investimento in varie aree geografiche

Negli ultimi anni, tre sono i fattori dominanti del settore eolico:

- L'incremento di taglia delle turbine;
- L'aumento costante dell'efficienza della produzione energetica delle turbine;
- La riduzione dei costi di investimento per kW installato.

In figura 4.2 è mostrato l'andamento della taglia media delle turbine installate nei principali mercati internazionali: è evidente il forte incremento degli ultimi 10-15 anni, come ad esempio in Gran Bretagna dove la taglia media è passata dai 200 kW del 1990 ai 2 MW del 2007 (su valori leggermente inferiori si assestano Germania, Spagna e Stati Uniti).



**Figura 4.2.** Evoluzione della taglia media delle turbine sui principali mercati internazionali nel periodo 1990-2008 in varie aree geografiche

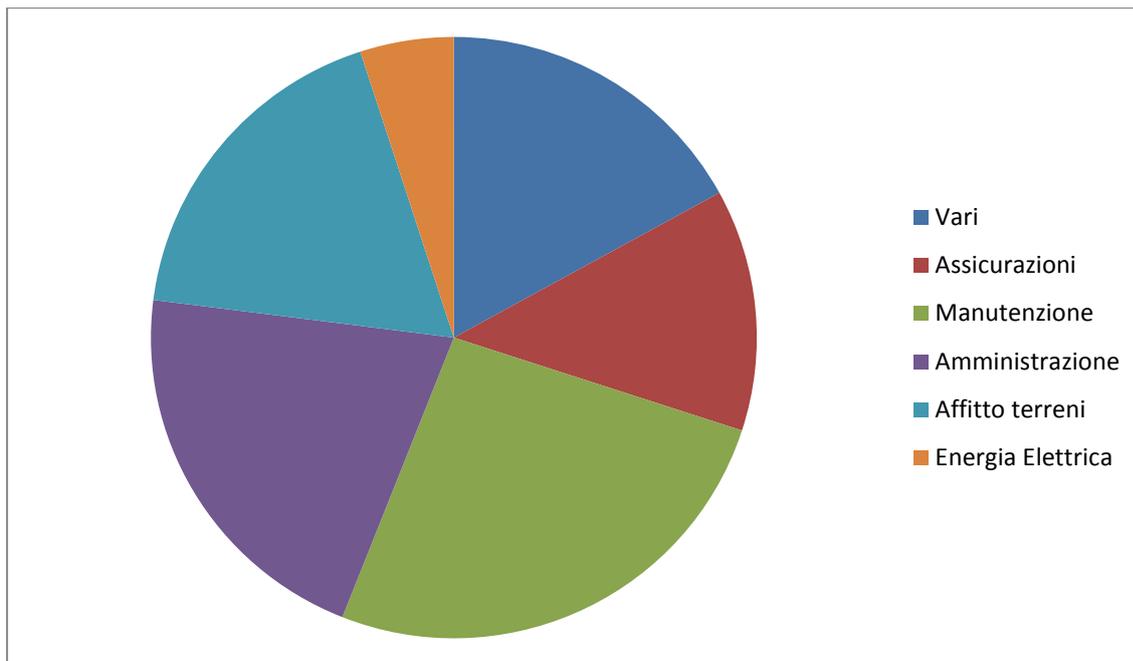
Alle macchine che superano il MW di potenza appartiene una quota di mercato superiore al 95%, con il segmento delle taglie superiori ai 2 MW che assume via via maggiore importanza anche per le applicazioni *on-shore*: ad oggi la quota di mercato supera il 6%, contro lo 0,3% del 2003. Sono migliorati significativamente sia i metodi di misurazione e di valutazione delle caratteristiche anemologiche di un sito, portando a scelte di siti ottimali e delle turbine più adatte da installare, che le apparecchiature meccaniche ed elettriche. Tutto ciò ha portato ad un incremento costante del 2-3% annuo dell'efficienza delle turbine negli ultimi 15 anni.

I costi delle turbine nel periodo 1989-2004 sono diminuiti mediamente più del 2% all'anno corrispondenti ad una riduzione sull'intero periodo superiore al 30%. Questo andamento si è poi invertito, nel biennio 2004-2006, a causa dell'elevato incremento della domanda di turbine combinato all'aumento dei prezzi delle materie prime e della carenza delle forniture (non imputabili unicamente ai produttori di turbine ma anche a difficoltà da parte dei produttori dei singoli componenti). Si è infatti registrato un + 20% dei costi a livello internazionale, con punte del + 40% negli Stati Uniti e in Canada. Nell'ultimo periodo l'andamento dei costi si è mantenuto pressoché costante.

I costi delle attività di gestione e manutenzione incidono per il 20-25% sul costo del kWh prodotto attualizzato sull'intero periodo di vita di una turbina. Questo valore è circa del 10-15% all'inizio dell'operatività della turbina e può salire fino a 30-35% verso il termine del ciclo di funzionamento della stessa.

Le voci che rientrano nei costi di gestione e manutenzione sono:

- costi assicurativi;
- costi di ordinaria manutenzione;
- costi di manutenzione straordinaria (pezzi di ricambio e interventi di riparazione);
- costi di affitto dei terreni;
- costi amministrativi;
- costi di fornitura dell'energia elettrica;
- costi vari.



**Figura 4.3.** Ripartizione percentuale costi di gestione e manutenzione di un impianto eolico

Alcune di queste voci di costo sono facilmente stimabili: ad esempio, per la manutenzione ordinaria e le assicurazioni è prassi stipulare contratti standard che coprono quasi la totalità del ciclo di vita dell'impianto. Al contrario, ciò non è possibile ad esempio per i costi della manutenzione straordinaria sui quali incidono maggiormente gli interventi sulle turbine.

Infatti, nonostante questi costi aumentino con l'età di una turbina, allo stato attuale solo poche turbine installate hanno raggiunto i 20 anni di vita attesa e, quelle che lo hanno fatto, sono nettamente differenti dalle turbine attualmente sul mercato.

In base all'esperienza acquisita a livello europeo (in particolare Danimarca, Germania, Spagna e Gran Bretagna), i costi complessivi possono essere valutati in 1,2-1,5 centesimi di euro per kWh generato.

Per il prossimo futuro è ragionevole pensare che, così come accade per i costi per kW installato delle turbine, anche i costi di gestione e manutenzione possano ridursi con l'incremento della taglia delle turbine. Inoltre, i produttori delle turbine stanno inoltre cercando di ridurre in maniera significativa questi costi sviluppando modelli che richiedano minori interventi di controllo periodico programmato e minor durata delle interruzioni di funzionamento forzato per consentire agli addetti di intervenire.

Il costo totale per kWh prodotto è calcolato normalizzando i costi di investimento e di gestione, manutenzione sull'intera vita della turbina e dividendoli per la produzione annua di energia elettrica: il risultato è un costo medio sull'intera vita dell'impianto.

La produzione della turbina è il fattore più importante e la convenienza economica dipende ampiamente dal fatto se la turbina sia o meno ubicata in un sito di buona ventosità.

Negli ultimi 20 anni, il costo medio per un impianto in area con buone condizioni di vento è passato da 0,092 €/kWh (calcolato su una turbina di 95 kW di potenza) a 0,053 €/kWh (calcolato in una turbina di 2 MW di potenza), per una riduzione superiore al 40%.

Circa il 75-80% dei costi di produzione di una turbina dipendono dai costi di investimento: costi della turbina, delle fondazioni, delle apparecchiature elettroniche e della connessione alla rete. Questo differenzia gli impianti eolici dalla tecnologie convenzionali alimentate da fonti fossili dove il 40-60% dei costi di produzione sono dovuti al combustibile ed ai costi di manutenzione e gestione.

Per quanto riguarda gli impianti *offshore*, la potenza complessiva di un impianto in mare aperto è pari all'1,2% circa della potenza eolica installata a livello mondiale. Il 98,8% degli impianti *offshore* sono concentrati in Europa nel Mare del Nord e nel Mar Baltico. Gran Bretagna, Olanda, Svezia e Germania dominano il settore. Gli impianti sono tutti installati in acque basse (ad una profondità minore di 20 m) e ad una distanza inferiore di 20 km dalla costa, per minimizzare i costi delle fondazioni e delle linee elettriche sottomarine.

Questa tipologia di impianti sono ancora del 40-50% più cari di quelli su terra ma, grazie ai vantaggi dovuti a migliori condizioni di vento e minori impatti visivi, il settore è in forte espansione con tassi di crescita molto alti ed obiettivi ambiziosi.

I costi dipendono principalmente dalle condizioni meteorologiche e dal moto ondoso, dalla profondità e dalla distanza dalla costa.

L'intervallo dei costi di investimento sostenuti per la costruzione di alcuni impianti più recenti varia da 1,2 a 2,7 milioni di euro a MW installato.

Valori più elevati rispetto agli impianti *on-shore* sono dovuti alle strutture ed alla complessa logistica per installare le torri. Ad esempio, le turbine sono del 20% più costose e le torri e le fondazioni possono arrivare a costare 2,5 volte in più rispetto a quelle degli impianti *on-shore*.

Nella seguente tabella sono riportate le percentuali di incidenza sul costo complessivo delle singole fasi di sviluppo.

Confrontando questi valori con quelli relativi agli impianti *on-shore*, le principali differenze sono riconducibili al maggior costo delle fondazioni (che incide al 21% sui costi totali), delle stazioni di trasformazione e delle linee elettriche sottomarine (doppi rispetto a quelli sulla terra) e degli studi di impatto ambientale.

	Percentuale [%]
Turbine (compresi trasporto e posa in opera)	49
Fondazioni	21
Stazione di trasformazione e cavo sottomarino di collegamento alla costa	15
Cavi sottomarini di collegamento tra le turbine	5
Progettazione e gestione	6
Studio di impatto ambientale	3
Varie	1

**Tabella 4.2.** Ripartizione percentuale dei costi capitali di un impianto eolico offshore

Tuttavia, con lo sviluppo del settore sono previsti alcuni miglioramenti tecnologici e, di conseguenza, delle riduzioni dei costi.

I costi di investimento più alti sono bilanciati da una produzione di energia elettrica più elevata: salvo gli impianti più obsoleti, gli impianti installati in Europa superano tutti le 3000 ore equivalenti all'anno, con punte superiori a 4000 ore equivalenti l'anno.

Per il calcolo dei costi dell'energia prodotta, sono state considerate le seguenti ipotesi:

- i costi di gestione e manutenzione sull'intera vita dell'impianto sono pari a 16
- €/MWh;
- i costi di bilanciamento della produzione sono pari a 3 €/MWh;
- l'analisi economica è effettuata come per gli impianti *on-shore*.

Il costo dell'energia prodotta varia da un minimo di 0,06 €/kWh ad un massimo di 0.093 €/kWh.

Per gli impianti minieolici, invece, il costo per le macchine ad asse orizzontale varia tra i 2000 ed i 6000 €/kW mentre per quelle ad asse verticale un po' di più. Il costo dell'energia risulta variabile tra 0,1 e 0,3 €/kWh. Ha un peso rilevante, nella scelta dell'impianto, la tariffazione e il tipo di utilizzo.

#### *4.1.1.L'energia eolica a confronto con le altre tecnologie di generazione*

La spinta allo sviluppo delle fonti rinnovabili di energia viene dalla situazione di incertezza a livello globale sui costi futuri dell'energia, dalla dipendenza dal petrolio, dalla sua disponibilità e dagli obblighi di riduzione di emissioni inquinanti. In questo paragrafo, per poter procedere al confronto tra i costi dell'energia prodotta con fonti fossili e quella prodotta da fonte eolica, per il calcolo dei primi è stato utilizzato il modello Recab, sviluppato dalla Agenzia Energetica Internazionale.

Il costo della produzione di energia elettrica da fonte convenzionale è determinato da

quattro componenti:

- costo del combustibile;
- costo delle emissioni di CO<sub>2</sub>;
- costi di gestione e manutenzione;
- costi capitali.

Per i prezzi dei combustibili e della CO<sub>2</sub> evitata sono stati considerati due scenari di riferimento:

- Scenario 1 : prezzo del petrolio 59 \$/barile, prezzo del carbone 1,6 €/GJ, prezzo del gas naturale 6,05 €/GJ e prezzo della CO<sub>2</sub> evitata 25 €/t
- Scenario 2 : prezzo del petrolio 118 \$/barile, prezzo del carbone 2,4 €/GJ, prezzo del gas naturale 12,1 €/GJ e prezzo della CO<sub>2</sub> evitata 35 €/t.

Nel primo scenario i costi di generazione dell'energia eolica sono superiori di oltre il 30% rispetto ai costi delle tecnologie convenzionali.

Nel secondo scenario, invece, la competitività dell'energia eolica aumenta notevolmente: i costi dell'energia prodotta da impianti *on-shore* sono inferiori a quelli dell'energia prodotta da centrali a gas a ciclo unico combinato e sono solo del 10% superiori a quelli delle centrali a carbone. Per impianti con migliori condizioni di vento, l'energia eolica produce l'elettricità meno cara.

La previsione dell'andamento dei costi energetici è complicata se si considera che questi sono guidati principalmente dal costo del petrolio.

Queste incertezze implicano considerevoli rischi sui costi futuri di generazione delle celle elettriche tradizionali.

Al contrario, i costi a kWh generato da fonte eolica si mantengono mediamente costanti durante tutta la vita dell'impianto.

Pertanto, uno scenario di maggiore penetrazione nel sistema di produzione dell'energia elettrica potrebbe contrastare incrementi inattesi o improvvisi dei costi futuri dei combustibili fossili, giustificando eventuali costi maggiori dell'energia eolica. Tutte le precedenti considerazioni non tengono conto del processo in atto in molti paesi di internalizzazione dei costi sociali ed ambientali nei costi di generazione dell'energia delle fonti fossili.

I valori delle esternalità (emissioni di CO<sub>2</sub>, consumi di acqua, inquinamento, ecc.), assegnati direttamente dai governi o determinati da specifiche commissioni, possono essere nulli ma arrivare anche ad essere superiori a 0,1 €/kWh prodotto, come nel caso degli impianti termoelettrici a carbone più obsoleti e inquinanti.

Nel caso dell'energia eolica, le esternalità sono tutte positive perché quella eolica è una fonte energetica locale, la generazione di elettricità non richiede consumi di acqua

e non porta all'emissione di gas climalteranti; pertanto, l'internalizzazione dei costi renderebbe l'energia prodotta da fonte eolica più economica dell'energia prodotta dalle fonti fossili.

Confrontando, infine, i costi delle altre fonti rinnovabili, è possibile affermare che quella eolica è la più economica.

#### 4.2.Strumenti di ingegneria finanziaria

Il finanziamento di nuovi impianti eolici è diverso da quello degli impianti alimentati da fonti fossili perché sono differenti le caratteristiche dei costi: gli impianti eolici, come la maggior parte degli altri impianti alimentati da fonti rinnovabili, hanno alti costi di costruzione e bassi costi di gestione; al contrario, gli impianti tradizionali hanno costi di costruzione inferiori ma costi di gestione più alti dovuti, principalmente, al costo del combustibile.

La finanza di progetto (*project finance*) è lo strumento di ingegneria finanziaria principale per la costruzione di impianti eolici. Una volta solo pochi istituti finanziari erano interessati al settore eolico, le transazioni erano semplici e molto gravose per i proprietari e per gli investitori.

A partire dalla seconda metà degli anni '90, con il forte sviluppo del settore eolico, caratterizzato da ampi miglioramenti tecnologici e dalla significativa riduzione dei costi, questa tendenza si è invertita.

Gli ingenti e interessanti investimenti hanno attratto compagnie energetiche, investitori istituzionali, banche commerciali e di investimento, compagnie assicurative, società di *leasing* e altre istituzioni finanziarie.

In questo periodo di tempo si sono sviluppate diverse strutture di finanziamento degli impianti eolici, che si differenziano tra loro per la struttura del capitale e per i soggetti coinvolti nell'investimento.

La finanza di progetto è un approccio multidisciplinare al finanziamento (a lungo termine) di specifici investimenti caratterizzati da ampi livelli di complessità di strutturazione; nonché dalla possibilità di ricorrere ad un elevato coinvolgimento di finanziamenti provenienti dal settore bancario.

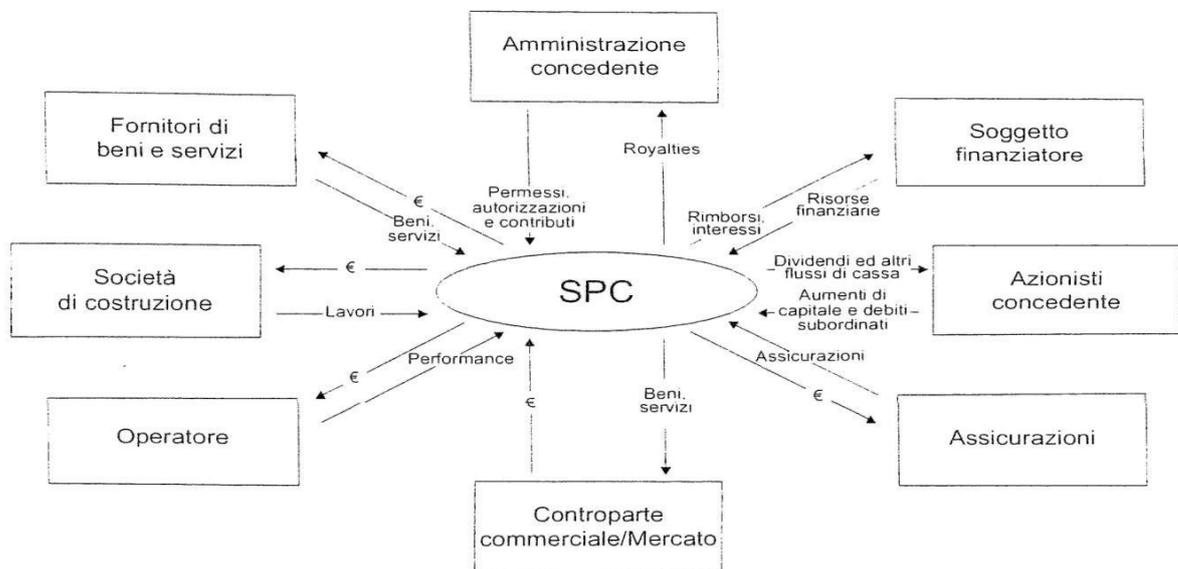
La principale garanzia per il rimborso dei finanziamenti è rappresentata dai flussi di cassa del progetto, che si devono manifestare con adeguati livelli di certezza, e da una efficace gestione dei rischi legati all'iniziativa, che permette di limitare la possibilità che i flussi di cassa previsti vengano meno.

La valutazione di sostenibilità economico/finanziaria della singola iniziativa di base esclusivamente sulla qualità (intesa come capacità di generare flussi di cassa a fronte

di un determinato livello di rischio) del singolo progetto e non su merito creditizio dei singoli azionisti.

La natura prevedibile del flusso di cassa di un impianto eolico rende queste centrali particolarmente adatte a questo meccanismo di finanziamento.

La struttura tipica di un progetto prevede la creazione di una società di scopo (*Special Purpose Company o Special Purpose Vehicle*), costituita nella forma giuridica di S.r.l. o di S.p.a. La creazione della SPC serve per mantenere separati gli *assets* del progetto da quelli dei soggetti proponenti l'iniziativa e di canalizzare il flusso di cassa ai creditori secondo un ordine di priorità coincidente con quello finanziario. Altri soggetti coinvolti possono essere i finanziatori, il gestore, i fornitori e i clienti/mercato.



**Figura 4.4.** Struttura tipica di un project finance

La SPC viene finanziata sia da capitali di equità (azioni), fornito da promotori e pari al 25-30%, il rimanente 75-70% da capitale di debito normalmente ottenuto da un pool di banche.

La percentuale di capitale finanziato (capitale di debito) dipende dalle entrate previste e si basa sui valori statistici di stima della producibilità energetica dell'impianto.

Le principali forme di finanziamento sono le seguenti:

- finanziamento bancario;
- finanziamento obbligazionario;
- finanziamenti all'esportazione;
- *leasing*;
- cofinanziamenti.

Il finanziamento può essere diviso in due parti: il finanziamento per la costruzione ed il finanziamento a termine. Il primo, come dal termine, serve a garantire i fondi necessari per la costruzione e poi diventa il secondo a fine lavori.

La durata media dei finanziamenti è di circa 10-15 anni, anche se nell'ultimo periodo, in seguito alla crescita dell'esperienza dei soggetti finanziatori nel settore dell'energia eolica, i tempi si stanno allungando. Il tasso di interesse viene fissato nell' 1-1,5% in più rispetto al tasso base al quale i soggetti finanziatori prestano il denaro.

Durante il finanziamento, gli investitori devono rispettare con i soggetti finanziatori una serie di impegni da inserire in uno specifico accordo tra le parti. Questi obblighi possono includere:

- la realizzazione dei lavori secondo i progetti approvati;
- la presentazione di fatture, ricevute, certificati o altre documentazione che giustifichi le spese;
- la comunicazione periodica di informazioni sulla gestione tecnica e commerciale;
- la copertura assicurativa.

Prima di approvare il finanziamento si procede con la fase di studio della fattibilità tecnica ed economico finanziaria (*due diligence*) del progetto. La *due diligence* può essere divisa in più fasi che trattano in maniera separata gli aspetti tecnici, legali e commerciali.

Una volta terminata positivamente la *due diligence*, i rischi che rimangono sono di tre tipi:

- rischi finanziari, cioè il rischio che la SPC non ricava i pagamenti previsti dall'accordo con il soggetto che acquista l'energia prodotta;
- rischi di completamento del progetto, cioè il rischio che il progetto non sia completato in tempo;
- rischi gestionali, cioè i rischi causati da un funzionamento dell'impianto al di sotto dei livelli previsti nella costruzione del piano economico e finanziario o da un incremento dei costi previsti per la gestione e la manutenzione dello stesso.

La complessiva gestione dei rischi del progetto e degli accordi contrattuali definisce il *security package*, che è l'elemento principale che deve garantire ai soggetti finanziatori il recupero dei capitali resi disponibili per la SPC.

Un'altra possibilità di finanziamento, motivata dal ruolo sempre più importante nel settore eolico delle grandi compagnie, è quella di utilizzare per la costruzione dell'impianto fondi propri: *portfolio financing*. Il portafoglio è un insieme di impianti che viene proposto ai diversi soggetti finanziatori, le turbine sono diffuse geograficamente e

sono modelli diversi così da evitare il rischio di simultanee condizioni non ottimali di vento.

#### 4.3.Meccanismi di supporto ed incentivazione

La metodologia di intervento su cui fondavano le politiche ambientali internazionali ha gradualmente ceduto il passo ad un sistema volto ad attuare processi produttivi a basso impatto ambientale. Dall'approccio basato sulla regolazione si è passati all'uso di strumenti di tipo economico-finanziario, idonei a garantire equilibrio tra ambiente e mercato.

In tabella 4.3 è riportato uno schema della classificazione delle strategie di promozione e sostegno alle fonti rinnovabili e, quindi, anche all' energia eolica.

	Prezzo	Quantità	Indiretti
<b>Politiche nazionali</b>			
Sostegno all'investimento	Incentivi all'investimento Sgravi fiscali bassi Interessi/prestiti agevolati	Bandi di gara per la concessione di finanziamenti Mercato dei certificati (es. Certificati Verdi, Renewable Portfolio Standards)	Tasse ambientali Semplificazione delle procedure autorizzative
Sostegno alla generazione	Tariffe fisse incentivate (FIT) Premi fissi	Bandi di gara per la stipula di contratti a lungo termine	Tasse di connessione Costi di bilanciamento
<b>Accordi volontari</b>			
Sostegno all'investimento	Azionariato popolare Apporti di capitale		Accordi volontari
Sostegno alla generazione	Tariffe verdi		

**Tabella 4.3.** Classificazione dei meccanismi di supporto

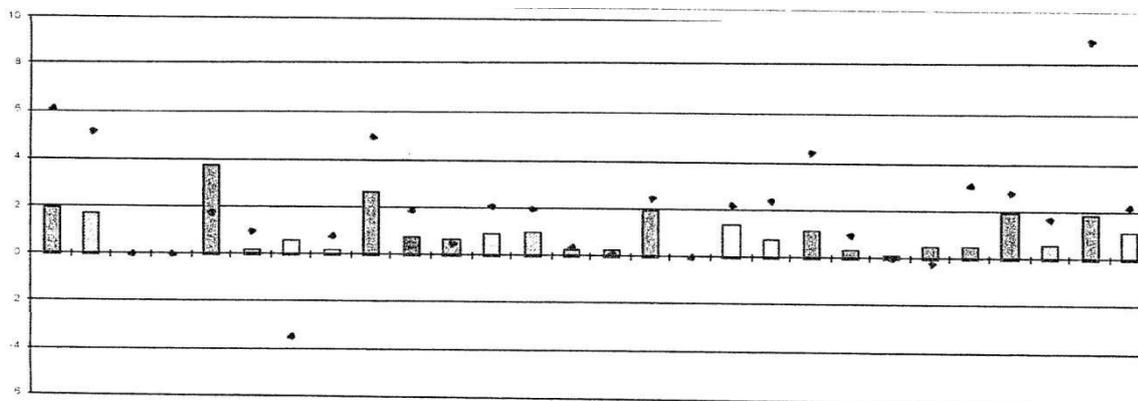
Come si vede dallo schema, esistono due tipi di sostegno alla generazione dell'energia elettrica: le tariffe fisse incentivate o un premio fisso in aggiunta al prezzo dell'energia che una istituzione di un governo, una compagnia elettrica o un distributore è obbligato a pagare per l'energia prodotta. Nel primo caso la tariffa è fissa; nel secondo è fisso il premio e, quindi, il prezzo totale a kWh prodotto è variabile in funzione del prezzo dell'energia elettrica.

In generale è possibile valutare il successo o meno dei meccanismi di supporto e di incentivazione attraverso due criteri:

- efficacia, che indica il rapporto tra l'energia elettrica generata in un dato intervallo di tempo e le potenzialità della tecnologia utilizzata;
- efficienza economica, che confronta il livello di supporto con i costi di generazione.

Altri due criteri per valutare il successo dei programmi di sostegno sono la credibilità per gli investitori e la riduzione dei costi nel tempo.

In figura 4.5 è illustrato il risultato di uno studio condotto sull'efficacia delle politiche di supporto per il periodo 1998-2005, misurata in termini di generazione di energia elettrica aggiuntiva all'anno in confronto con il potenziale aggiuntivo disponibile, nei paesi dell'UE27.



**Figura 4.5.** Efficacia dei meccanismi di supporto ed incentivo nei Paesi dell'UE27 nel periodo 1998-2005

# CAPITOLO 5

## L'impatto ambientale di un impianto eolico

### 5.1. Gli aspetti ambientali dell'energia eolica

Il settore della produzione di energia è ancora dominato dai combustibili fossili che contribuiscono negativamente ai problemi ambientali a livello mondiale: emissione di sostanze inquinanti e cambiamenti climatici.

Al contrario, l'uso delle fonti energetiche rinnovabili rappresenta una delle chiavi per lo sviluppo sostenibile. Tra queste, il vento è pulito, libero, disponibile a scala locale ed inesauribile. Le turbine eoliche non necessitano di alcun tipo di combustibile, quindi, non causano i rischi e le degradazioni ambientali tipiche della filiera dei combustibili fossili e, durante il funzionamento, non producono emissioni di gas climalteranti o di sostanze tossiche.

Pertanto l'energia eolica ha senza dubbio un impatto positivo a lungo termine sull'ambiente, sulla biodiversità e sui cambiamenti climatici.

Nonostante ciò, la costruzione e il funzionamento di un impianto eolico può provocare impatti ambientali negativi, che devono essere attentamente valutati e, se necessario, mitigati. Per fare ciò si deve quindi procedere con lo Studio di Impatto Ambientale (SIA).

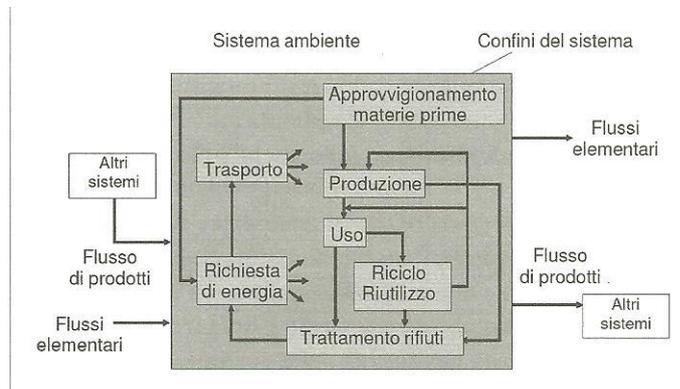
Il SIA è parte integrante della documentazione da presentare a corredo della proposta di realizzazione di un impianto eolico ed è determinante per l'ottenimento delle autorizzazioni ambientali a seguito di una procedura di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), la quale assicura che tutti gli impatti ambientali di un progetto siano stati identificati e valutati con l'obiettivo di eliminare o minimizzare gli effetti negativi sin dal principio piuttosto che cercare di contrastarli in fase più avanzata.

### 5.2. I benefici ambientali: l'Analisi del Ciclo di Vita (LCA)

I vantaggi della tecnologia eolica possono essere evidenziati mediante l'uso di una metodologia chiamata Analisi del Ciclo Di Vita (LCA).

Gli obiettivi di una LCA sono quelli di definire un quadro completo delle interazioni con l'ambiente di un prodotto, un processo o un servizio, contribuendo a comprendere le conseguenze ambientali direttamente o indirettamente causate e quindi dare le

informazioni necessarie per definire i comportamenti e gli effetti ambientali di un'attività e identificare le opportunità di miglioramento al fine di raggiungere le migliori soluzioni per intervenire sulle condizioni ambientali.



**Figura 5.1.** Schema di funzionamento di una LCA

Una LCA considera l'intero ciclo di vita del prodotto, del processo o dell'attività ed è distinta in cinque fasi di analisi:

- mete e scopi;
- inventario del ciclo di vita;
- valutazione dell'impatto del ciclo di vita;
- l'interpretazione;
- LCA usi e strumenti.

Una LCA non considera solo le emissioni dirette dovute alla realizzazione, al funzionamento e alla dismissione di un impianto eolico, ma anche i pesi ambientali e la richiesta di risorse associate con l'intero ciclo di vita di tutti i processi rilevanti che sono nella categoria dell'energia.

Una LCA su un impianto eolico si divide generalmente in cinque fasi:

- costruzione, comprese le materie prime per la realizzazione delle torri, delle navicelle, del rotore, delle pale, delle fondazioni e delle linee elettriche;
- operazioni in sito, compreso l'assemblaggio dei componenti e la posa in opera delle turbine;
- trasporto, che comprende i trasporti necessari alla fornitura delle materie prime, i trasporti dei componenti delle turbine ed il trasporto durante la fase di funzionamento dell'impianto;
- funzionamento, con particolare riferimento alla attività di manutenzione che comprendono i cambi di olio e lubrificanti ed i trasporti necessari;

- dismissione, che comprende i lavori di smontaggio delle turbine, i trasporti necessari a trasferire i componenti dal sito all'area di stoccaggio, il riciclaggio di alcuni componenti, il deposito degli inerti in cave di risulta e lo smaltimento di altri materiali quali oli e lubrificanti.

In termini di LCA, i risultati mostrano che la fase di costruzione dell'impianto è quella con i maggiori ambientali. Questi impatti sono dovuti alla produzione di materie prime, in particolare l'acciaio, il calcestruzzo e l'alluminio che richiedono importanti consumi energetici. La fase di produzione energetica è quella con i minori impatti poiché le turbine non producono emissioni e gli impatti dovuti alle fasi di trasporto e di operatività dell'impianto non sono significativi se paragonati agli impatti totali dell'energia eolica.

È importante osservare come una modifica della taglia complessiva dell'impianto non produca variazioni significative in termini di impatto ambientale.

### 5.3. Impatto visivo e paesaggistico

Il fenomeno dell'impatto visivo è complesso e difficile da definire. Il paesaggio indica un'area, percepita dalla popolazione, le cui caratteristiche sono l'interazione di fattori naturali e/o antropici.

Una importante caratteristica positiva degli impianti eolici è quella di essere elementi non permanenti e di poter essere dismessi al termine del loro ciclo di vita. Pertanto, gli impatti visivi e paesaggistici sono tra i più diffusi motivi di preoccupazione e di ostacolo allo sviluppo degli impianti eolici.

La determinazione di cosa costituisca effettivamente un impatto visivo negativo è altamente soggettivo, ma in generale si può definire come tale quello procurato da un qualsiasi nuovo elemento che produca una riduzione della qualità visiva di un paesaggio esistente.

In molti casi sono le dimensioni delle turbine a essere considerate come la principale, se non unica, fonte di impatto visivo e paesaggistico creato da un parco eolico. A questo proposito, alcune indagini indicano che poche turbine di grandi dimensioni sono preferite a molte di piccole dimensioni e che gli intervistati vedono nel movimento del rotore un elemento discriminante in senso positivo.

Le opere di mitigazione (armonizzare le turbine con l'ambiente circostante) possono essere:

- usare turbine omogenee per colore, forma e dimensioni;
- usare torri di sostegno tubolari e non a traliccio e con colori neutri ed antiriflesso;
- utilizzare turbine con lo stesso verso di rotazione delle pale;

- limitare disposizioni a “macchia”;
- disporre le turbine uniformemente;
- ridurre la densità il più possibile;
- limitare l’uso di segnalatori luminosi e sincronizzare l’intermittenza;
- ripristinare i luoghi sia dopo la realizzazione che dopo la dismissione;
- utilizzare barriere verdi, realizzate con specie autoctone;
- determinare delle distanze minime di rispetto tra impianti eolici differenti.

#### 5.4.Impatto acustico

Nelle moderne turbine eoliche le problematiche legate all’impatto acustico si sono fortemente ridotte, in quanto il livello di emissione acustica può anche essere programmato durante la fase iniziale di scelta della macchina.

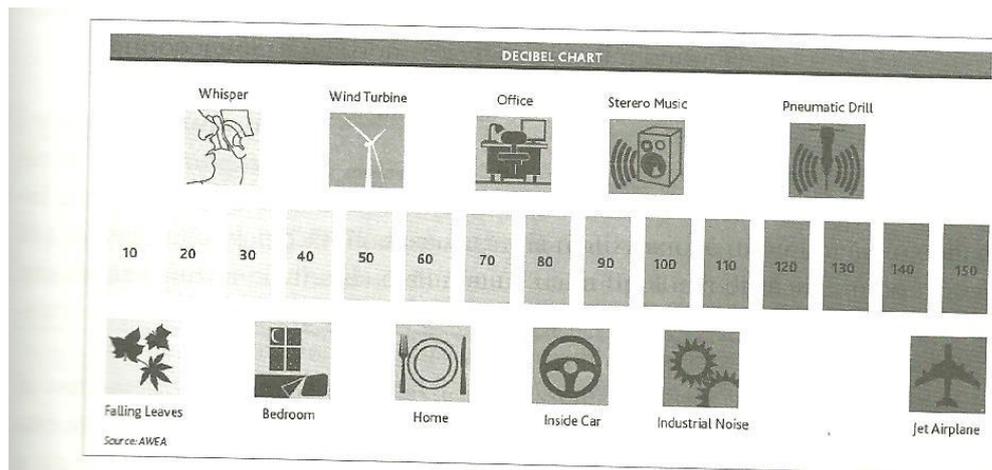
Vengono prodotti due tipi di rumore: il rumore aerodinamico prodotto dalle pale in rotazione ed il rumore meccanico prodotto dalle parti elettromeccaniche (generatore, moltiplicatore di giri, sistemi di raffreddamento ed altre componenti), più basso del primo e già non più percepibile a poche decine di metri di distanza.

La trasmissione del rumore può avvenire direttamente per via aerea o può propagarsi lungo la struttura per poi trasmettersi in aria. Inoltre, la navicella, il rotore e la torre potrebbero comportarsi da casse di risonanza, trasmettendo il rumore.

Il rumore aerodinamico delle pale non è diverso da quello prodotto dal vento stesso attraverso gli alberi o altri ostacoli o direttamente alle orecchie di un ascoltatore ma è comunque distinguibile perché è intermittente, maggiormente quando le condizioni del vento non sono tali da mascherarlo.

Le moderne tecnologie hanno permesso di ridurre il rumore aerodinamico attraverso:

- la riduzione della velocità di rotazione della punta delle pale ha valori inferiori ai 65 m/s;
- l’utilizzo del pitch control (regolazione del passo) che permette la rotazione delle pale lungo l’asse longitudinale e, quindi, la riduzione della portanza aerodinamica attraverso la variazione diretta dell’angolo di attacco.

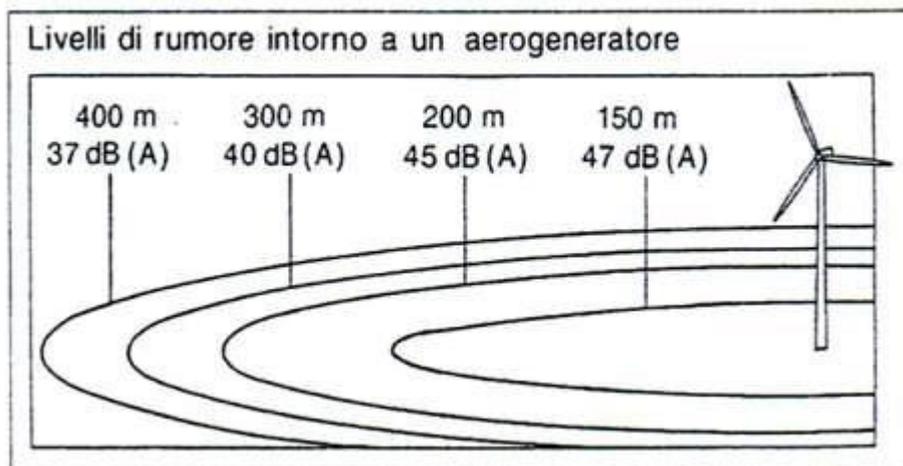


**Figura 5.2.** Livelli di emissione in dB di rumore per diverse sorgenti

La questione del rumore appare meno problematica se la confrontiamo non con l'assoluto (e mai tale, in realtà) silenzio della campagna, ma con altri rumori assai più insistenti con cui conviviamo ogni giorno. Il rumore percepito ad una certa distanza dagli aerogeneratori è ben al di sotto, in termini di decibel, del chiasso di un ufficio pubblico o del rumore cui siamo sottoposti in automobile o in mezzo al traffico, senza mai arrivare a quello di molte industrie attive nelle periferie delle città.

Il problema sembra ancora più trascurabile, ove si tenga anche conto di ulteriori elementi:

- il rumore percepito in prossimità di impianti eolici viene talvolta erroneamente attribuito ai soli generatori eolici, in realtà in zone ventose ed a qualche centinaio di metri di distanza dai generatori stessi, il rumore di fondo causato dal vento è paragonabile a quello dovuto agli aerogeneratori;
- a circa 200 metri di distanza dal singolo aerogeneratore il livello di emissioni acustiche che si percepisce è molto simile come intensità a quello cui si è sottoposti in situazioni ordinarie che si vivono quotidianamente quali lo stare in una vettura in movimento o in un ufficio;
- a circa 350 metri di distanza da un impianto eolico il livello di emissioni acustiche che si percepisce è variabile da 35 a 45 decibel, valore equivalente a quello prodotto da un tradizionale frigorifero in funzione;
- la reazione della maggioranza delle persone è di valutare il rumore prodotto dalle turbine, anche a breve distanza, molto inferiore rispetto a quanto ritenuto. Ad esempio un indagine svolta in Gran Bretagna ha messo in evidenza come la maggior parte degli abitanti che vivono nei pressi di centrali eoliche, ad una distanza variabile dai 300 ai 1300 m, non ha manifestato alcun problema.



**Figura 5.3.** Distribuzione spaziale del rumore prodotto da un moderno aerogeneratore in terreno aperto e pianeggiante

L'obiettivo principale è quello di stabilire se i livelli acustici in corrispondenza di eventuali recettori sensibili presenti nell'area prevista per la realizzazione di un impianto eolico siano compatibili con i livelli massimi previsti dalla normativa vigente e di evitare così fastidi o interferenze sulla qualità della vita dei residenti nell'area di un impianto eolico. I livelli di pressione acustica prodotti da un impianto eolico possono essere misurati ma, come nel caso degli impianti visivi e paesaggistici, anche la percezione dell'impatto acustico è, in parte, soggettiva e dipende dalla tolleranza individuale.

Per la riduzione delle emissioni acustiche possono essere messi in atto una serie di interventi di mitigazione, tra i quali ci possono essere:

- posizionare le turbine ad una distanza minima dai ricettori sensibili;
- seguire le migliori pratiche gestionali per la riduzione del rumore in fase di costruzione;
- evitare il taglio della vegetazione presente nel sito;
- mantenere le turbine in buone condizioni di funzionamento con gli opportuni interventi di manutenzione;
- chiudere accordi con i proprietari/occupanti dei ricettori sensibili.

### 5.5. Impatto sui segnali elettromagnetici

Gli impianti eolici possono avere impatti potenziali sui segnali elettromagnetici principalmente in due maniere: attraverso le interferenze elettromagnetiche generate dalle turbine e dalle linee elettriche o creando un ostacolo e, quindi, delle distorsioni ai segnali.

Il grado e la natura dell'interferenza possono dipendere: dalle caratteristiche delle pale, dalle caratteristiche del ricevitore del segnale, dalla frequenza del segnale e dal tipo di propagazione delle onde radio nell'atmosfera.

Le interferenze possono essere prodotte dalla torre, dalle pale in rotazione e dal generatore.

Un altro impatto richiede particolare attenzione, soprattutto nel caso che gli impianti eolici siano proposti nelle vicinanze di aeroporti civili e militari, basi militari o stazioni radar o lungo rotte aeree o navali: l'impatto sui sistemi radar.

Per questo motivo è importante l'analisi preliminare della situazione dei segnali di qualsiasi tipo presenti in un'area interessata dalla realizzazione di un impianto eolico, per evitare che vi siano interferenze.

#### 5.6. Impatto dovuto al trasporto dei componenti

Gli impatti dovuti al trasporto dei componenti di un impianto eolico si possono verificare sulla rete stradale o sul traffico.

Per mitigare gli effetti sulla viabilità è importante l'individuazione delle migliori tecnologie e modalità di trasporto. Per quanto riguarda invece le modalità di trasporto, di solito, il trasporto dei componenti degli aerogeneratori avviene per elementi separati su autoarticolati.

Nel caso, invece, di impatti significativi sul traffico, la prima soluzione è quella della ricerca di percorsi alternativi per decongestionare i tratti critici. Altra soluzione può essere quella di concentrare i flussi di traffico dei mezzi di trasporto in ore della giornata nelle quali vi siano le più favorevoli condizioni di traffico *ante operam* o nelle quali non vi sia pericolo per gli abitanti delle località attraversate.

#### 5.7. Impatto su aria, acqua e suolo

In fase di esercizio, gli impianti eolici, a differenza degli impianti alimentati da fonti fossili, non producono in atmosfera emissioni climalteranti o di sostanze pericolose.

Gli unici impatti sulla qualità dell'aria sono concentrati nella fase di costruzione e hanno eventuali effetti negativi localizzati e solo a breve termine; essi sono dovuti alla produzione di polveri durante le fasi di cantiere e alle emissioni dei mezzi di trasporto e di cantiere. Per controllare le emissioni di polveri si può limitare il traffico veicolare, migliorare le condizioni del manto stradale e fare dei trattamenti temporanei della superficie di lavoro.

Per quanto riguarda gli impatti sulle acque sono essenzialmente di due tipi:

- impatti di tipo qualitativo (inquinamento delle acque);
- impatti di tipo quantitativo (es. modifiche dei corpi idrici).

Nel caso delle acque di falda, in fase di analisi degli impatti, è molto importante la precisa individuazione degli acquiferi e delle aree di ricarica. Infatti, altri impatti possono essere dovuti alle vibrazioni prodotte in fase di realizzazione, con possibili crolli, o alla posa in opera di fondazioni profonde. In questi casi gli interventi di mitigazione sono quasi tutti riconducibili alle buone pratiche di gestione e di mantenimento delle aree in fase di cantiere.

Invece, il suolo e il sottosuolo rappresentano le interfacce in cui hanno luogo alcune interazioni tra le varie componenti dell'ambiente naturale e costruito; infatti, sul suolo e nel sottosuolo avvengono numerosi fenomeni fisici e chimici quali processi di alterazione, erosione, di dilavamento. Per minimizzare tali impatti è bene:

- Definire un quadro generale dell'area interessata dalla realizzazione dell'impianto (geografia e geologia);

- fare un'analisi amministrativa (analizzare gli strumenti di pianificazione esistenti);
- individuare i potenziali impatti;
- cercare di evitare sbancamenti dei pendii più esposti (denudamento ed erosione).

#### 5.8.Impatto dovuto alla produzione di rifiuti solidi o pericolosi

La produzione di rifiuti può avvenire sia in fase di produzione che di esercizio. La maggior parte dei rifiuti solidi deriva dall'attività di escavazione, dalla demolizione di strutture pre-esistenti e dallo sversamento accidentale di oli lubrificanti, combustibili, fluidi di lavaggio e vernici. Per mitigare l'impatto dei rifiuti solidi, soddisfatte le normative vigenti, è utile reimpiegare i materiali stoccati temporaneamente in deposito (i depositi devono rispettare delle normative di ubicazione e di installazione). Per mitigare lo sversamento di liquidi inquinanti è necessaria la realizzazione di vasche di contenimento e l'uso di lubrificanti biodegradabili. Infine, si può attuare una raccolta differenziata, vietare la dispersione nel terreno di qualsiasi sostanza e il disfarsi di residui in cantiere.

#### 5.9.Impatto su risolve archeologiche, storiche ed architettoniche

Può succedere che nelle vicinanze, o, in alcuni casi, all'interno delle aree preposte per la realizzazione di un impianto eolico vi può essere la presenza di elementi di interesse archeologico, storico o architettonico, con i quali vi possono essere interferenze dirette o indirette.

Gli impatti indiretti sono le alterazioni ad un sito archeologico, ad una risorsa architettonica o ad un luogo di fede (posizionare l'impianto modificando la percezione

visiva, creando rumore o riducendo l'accessibilità). Gli impatti diretti sono le modifiche ad un sito o ad una struttura dovute alla realizzazione dell'impianto. Attraverso lo studio delle fonti, di ricognizioni aeree e di indagini preventive è possibile eseguire una mappatura del rischio archeologico.

#### 5.10. Impatto su sicurezza e salute

Gli impatti che possono causare rischi per la sicurezza e la salute delle persone sono:

- campi elettromagnetici: essi possono causare effetti a breve termine, che possono essere percepiti immediatamente e che possono procurare disturbo o effetti a lungo termine sulla salute umana;
- caduta di ghiaccio: in determinate condizioni meteorologiche non è raro che vi sia la formazione di ghiaccio sulle pareti esterne delle turbine, soprattutto sulle parti mobili, che poi possono cadere in seguito ad un rialzo della temperatura;
- caduta di parti della pala in caso di rottura: durante il normale funzionamento le pale della turbina sono soggette alla forza centripeta, a quella gravitazionale e ad una serie di forze aerodinamiche che producono una serie di sollecitazioni assiali e torsionali sulle stesse e che possono causare la rottura della pala o di una parte di questa;
- incendio: l'eventualità dello scoppio di un incendio è legata in particolare alla fase di cantiere e dovuta alla presenza di macchine o attrezzature elettriche e al deposito ed utilizzo di carburanti ed oli combustibili;
- elettrocuzione: tali eventualità si potrebbero verificare nel caso di correnti generate dai componenti di un impianto eolico per malfunzionamenti o da fulmini che possono colpire gli aerogeneratori e che possono essere trasmesse attraverso il terreno o altri conduttori.

Tutti questi pericoli possono essere evitati, o quantomeno ridotti, con delle buone pratiche di progettazione e delle procedure di sicurezza.

#### 5.11. Impatto degli impianti eolici *offshore*

Gli impianti eolici *offshore* presentano delle caratteristiche di maggior complessità rispetto agli impianti *on shore* sia per quanto riguarda la fase di realizzazione che quella di manutenzione e gestione e, proprio perché realizzati in ambiente marino, possono interferire con tre elementi: il mare, la linea di costa e la zona costiera sotto diversi aspetti.

Rispetto ad un impianto *on-shore*, l'impatto visivo di un impianto *offshore* può essere:

- minore perché l'impianto è realizzato distante dalla costa;

- maggiore perché l'impianto può modificare la vista di zone di elevato interesse paesaggistico.

Gli elementi di un impianto *offshore* che possono influenzare l'impatto visivo prodotto sono:

- l'ubicazione e le dimensioni dell'area dell'impianto;
- taglia, materiali e colori delle turbine utilizzate;
- il layout dell'impianto;
- ubicazione, dimensioni e forma degli altri componenti dell'impianto;
- opere necessarie alla sicurezza della navigazione;
- presenza delle imbarcazioni per le attività di costruzione e di manutenzione dell'impianto;
- nuove opere a terra necessarie per le imbarcazioni;
- nuove strade o piste di accesso.

L'impatto acustico provoca disturbo specialmente agli animali marini ed è dovuto alla propagazione sotto il livello del mare del rumore generato durante le fasi di costruzione e di esercizio. Gli effetti sulla fauna marina dipendono dalla capacità di adattamento della specie. Le procedure per calcolare le emissioni acustiche sottomarine dovrebbero considerare:

- le caratteristiche della turbina;
- il tipo di fondazione, i materiali utilizzati e la profondità delle acque e delle fondazioni sul fondo.

In fase di costruzione o di dismissione dell'impianto, il rumore può essere prodotto dai macchinari per l'installazione, dalle navi per il trasporto, dalla realizzazione delle fondazioni o da esplosioni e i livelli acustici possono essere anche elevati.

E' necessaria una collaborazione fra ingegneri e biologi per ottenere importanti informazioni riguardo le specie marine e la loro tolleranza di Decibel.

Di seguito è riportata una tabella che riporta le distanze minime a cui si sono mantenute le specie durante la sua realizzazione.

Specie	Distanza minima [m]
Salmoni	1400
Merluzzi	5500
Pleuronectidi	100
Delfini	4600
Focene	1400
Foche	2000

**Tabella 5.1.** Distanze minime dall'impianto per alcune specie marine

Per ridurre al minimo l'impatto acustico è necessario l'uso di materiali fonoassorbenti, eseguire lavori progressivi e recintare la zona di lavoro. E' stato registrato, infatti, che specie come i merluzzi dell'Atlantico possono avvertire il rumore delle turbine, funzionanti e con venti a 8 – 13 m/s, sino a 25 Km di distanza. Inoltre, imbarcazioni di medie dimensioni (usate per la costruzione/dismissione) possono emettere suoni ad una frequenza tra 20Hz e 10kHz e livelli di pressione sonora tra 130 e 160 dB ad 1 metro di distanza.

L'elettricità prodotta dalle turbine e trasmessa, anche a lunghe distanze, attraverso i cavidotti sottomarini genera campi elettromagnetici che potrebbero influenzare il comportamento di pesci, mammiferi marini, molluschi e crostacei.

Le specie che potrebbero subire effettivamente degli impatti per la presenza di campi elettromagnetici sono ad esempio quelle che usano il campo magnetico terrestre per orientarsi durante gli spostamenti o quelle che sono sensibili all'elettricità.

Ci possono essere impatti anche sugli uccelli marini, dovuti a:

- rischio di collisioni;
- perdita di habitat a breve termine durante la fase di cantiere;
- perdita di habitat a lungo termine dovuta al disturbo provocato dalle turbine e dal traffico marino ed aereo durante le fasi di manutenzione;
- effetto barriera lungo le rotte di migrazione.

Infine, un ulteriore rischio può essere quello di collisione delle navi con le turbine.

Il rischio potenziale per l'ambiente è quello dello sversamento di carburanti o di prodotti chimici in mare.

Le soluzioni di mitigazione del rischio prevedono:

- l'utilizzo massiccio di sistemi di controllo della navigazione sulle imbarcazioni;
- il divieto alla navigazione nell'area dell'impianto, soprattutto per alcuni tipi di imbarcazioni;
- l'introduzione di sistemi di gestione del traffico marittimo;

- la presenza di rimorchiatori nelle vicinanze dell'impianto;
- l'addestramento degli equipaggi.

# CONCLUSIONI

Oggi si avverte l'importanza e la necessità di una rivoluzione tecnologica che sviluppi e affermi definitivamente le fonti di energia rinnovabili. L'eolico è, tra queste ultime, quella che mostra assieme alle biomasse un tasso di sviluppo maggiore e delle caratteristiche economiche migliori rispetto alle altre. Un passaggio alle energie rinnovabili presuppone un cambiamento strutturale economico profondo e di ampia portata che ovviamente non è realizzabile senza contrasti e soprattutto con la volontà concorde dell'industria energetica tradizionale: il complesso economico-energetico è infatti il settore più grande e più potente dell'economia mondiale.

La crescita delle fonti rinnovabili è ostacolata, inoltre, dalla difficoltà di valutare correttamente le esternalità associate alla produzione di energia, che fanno apparire costose queste opzioni tecnologiche laddove ci si limiti a considerare i soli costi privati e non anche i costi sociali: si ritiene che una corretta valutazione dei costi ambientali, infatti, possa ridimensionare il divario di costo con le fonti fossili, fino addirittura ad annullarlo in molti casi, soprattutto con gli attuali costi dei combustibili.

È importante sottolineare che i costi di investimento nelle energie rinnovabili sono alti e una buona redditività degli impianti si ottiene solo a condizione che si accettino tempi di ritorno del capitale investito abbastanza lunghi (solitamente superiori ai 15 anni).

Si tratta in definitiva di un vero e proprio cambiamento culturale che, con una precisa e diffusa informazione, potrebbe gettare le basi per un vero cambiamento paradigmatico di natura epocale. Evidentemente la questione non riguarda la scelta tra una risorsa rinnovabile e un'altra: la soluzione potrebbe essere coerentemente ravvisata nell'utilizzo di un *mix* di fonti rinnovabili, a seconda delle peculiarità morfologiche e climatiche del sito prescelto.

Accanto alle problematiche di sviluppo legate alla tecnologia e agli investimenti, un altro ostacolo allo sviluppo di queste fonti è costituito dalle scelte dei decisori pubblici e privati. Sarebbe auspicabile un intervento pubblico più convinto per cercare di indirizzare le politiche energetiche nazionali e internazionali verso scelte ottime sul piano sociale, in maniera tale da rendere concrete nuove opportunità; e questo ancor prima di badare alla necessità di fornire una prospettiva sostenibile al sistema energetico. Come sostenuto da Scheer, insistere sulla strada tradizionale, pur con una maggiore prudenza, è altamente pericoloso.

# BIBLIOGRAFIA

Andreolli Fabio, 2011, Impianti mini e micro eolici, Guida alla progettazione e realizzazione, Dario Flaccovio Editore.

Cfr. AA.VV., 20% Wind Energy by 2030 – *Increasing wind energy's contribution to U.S. electricity supply*, U.S. Department of Energy, 2008.

Cfr. AA.VV., *Wind Energy – The facts*, European Wind Energy Association – WWEA, 2010.

Cfr. AA.VV., Wind Turbine Acoustic Noise, 2002-2006, Renewable Energy Research Laboratory Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Massachusetts at Amherst.

Graniglia Nicola, 2010, Impianti eolici, Progettazione, criteri di inserimento ambientale e valutazione economica, Grafill.



# SITOGRAFIA

ECO AGE (<http://www.ecoage.it>)

ENEA (<http://www.enea.it>)

WIND POWER (<http://www.thewindpower.net>)

ENEL GREEN POWER (<http://www.enelgreenpower.com/it-IT/>)

GREEN STYLE (<http://www.greenstyle.it>)