

Nicola Graniglia

# Impianti eolici

**PROGETTAZIONE, CRITERI DI INSERIMENTO AMBIENTALE  
E VALUTAZIONE ECONOMICA**

**AGGIORNATO ALLE LINEE GUIDA PER L'AUTORIZZAZIONE  
DEGLI IMPIANTI ALIMENTATI DA FONTI RINNOVABILI**

Decreto Ministeriale 10 settembre 2010

**CD-ROM ALLEGATO**



**GRAFILL**

Nicola Graniglia  
**IMPIANTI EOLICI**

ISBN 13 978-88-8207-405-0  
EAN 9 788882 074050

Formulari e Guide, 23  
Prima edizione, novembre 2010

Graniglia, Nicola <1970->

Impianti eolici : progettazione, criteri di inserimento ambientale  
e valutazione economica / Nicola Graniglia. – Palermo : Grafill, 2010.  
(Formulari e Guide ; 23)

ISBN 978-88-8207-405-0

1. Energia eolica – Utilizzazione.

621.312136 CDD-22

SBN Pal0230193

*CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"*

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

Finito di stampare nel mese di novembre 2010

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge.

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

*Alla mia famiglia*

*“Se io fossi il vento,  
non soffierei più su un mondo tanto malvagio e miserabile ...  
eppure, lo ripeto e lo giuro,  
c'è qualcosa di glorioso e di benigno nel vento”*

Herman Melville, *Moby Dick o la balena* (1851)

*“Nella tua vita avrai molti motivi per essere felice,  
uno di questi si chiama acqua, un altro ancora si chiama vento,  
un altro ancora si chiama sole  
e arriva sempre come una ricompensa dopo la pioggia”*

Luis Sepulveda, *Storia di una gabbianella e del gatto che le insegnò a volare* (1996)



## RINGRAZIAMENTI

*Non ho idea dove mi porterà la scrittura di questo libro, ma conosco la strada percorsa e che mi ha portato sin qui e devo ringraziare chi ha contribuito alla mia crescita come uomo e come professionista.*

*I miei genitori, perché non mi fanno mai mancare il loro sostegno, per avermi insegnato sin da piccolo l'amore per la lettura e la passione per il lavoro.*

*Cristina perché crede in me più di quanto non faccia io ed è sempre al mio fianco a spingermi a migliorare.*

*Leonardo perché è la "mia energia".*

*Pierluigi perché, sempre prodigo di consigli, mi ha accompagnato nei primi anni della mia carriera.*

*Riccardo perché mi considera un "AA" e Domizio mio compagno di "avventure eoliche".*

*Senza anche uno solo di voi questo libro non sarebbe stato possibile.*

*Grazie.*

*Un ringraziamento va al mio editore, nella persona dell'Arch. Paola Oreto, che mi ha dato questa straordinaria occasione e per la gentilezza, la pazienza e la disponibilità che mi ha dimostrato in questi mesi.*

*All'Ing. Andrea Mazzetti ("Maz") ed all'Avv. Cristina Baglivo ("l'Avvocata") che hanno contribuito direttamente ad alcune parti con la loro esperienza e conoscenza del settore.*

*Ringrazio anche l'Ing. Rocco Ingianni, la Geo Tecnologie S.r.l. e la R.E.Wind S.r.l., con i quali ho l'onore e, soprattutto, il piacere di collaborare, per il materiale concesso.*

*Ringrazio infine anche tutti coloro i quali inconsciamente, attraverso discussioni, confronti o dibattiti, hanno apportato qualcosa alla stesura del libro.*

*Hanno collaborato:*

**Andrea Mazzetti**

Si laurea a Firenze, dove svolge la professione di Ingegnere. È specializzato nei settori della Geotecnica della Geofisica e della Sismica.

È Direttore Tecnico e Socio della ENKI S.r.l. di Firenze, che si occupa anche di Valutazione di Impatto Ambientale e Progettazione di impianti eolici.

**Cristina Baglivo**

Si laurea a Firenze, dove svolge la professione di Avvocato (Foro di Firenze). È specializzata anche nel settore del Diritto Ambientale ed Energetico.

È consulente legale di alcune società attive nel settore dell'energia ed è docente in corsi di formazione professionale in materia di Procedimenti autorizzativi e di Tutela dell'ambiente

## INDICE

<b>1. GLI IMPIANTI EOLICI</b> .....	p.	15
1.1. Introduzione .....	"	15
1.2. Cenni storici.....	"	16
1.3. Caratteristiche generali, tipologia e classificazione degli aerogeneratori .....	"	20
1.4. Barriere allo sviluppo .....	"	24
1.5. Scenario attuale e prospettive future a livello internazionale e nazionale .....	"	27
 <b>2. TECNOLOGIA DEGLI AEROGENERATORI</b> .....	"	37
2.1. Introduzione .....	"	37
2.2. Tecnologia e componenti.....	"	37
2.3. Sviluppi tecnologici futuri .....	"	45
2.4. Gli impianti <i>offshore</i> .....	"	50
2.5. Gli impianti minieolici .....	"	60
2.6. Integrazione dell'energia eolica nelle reti di distribuzione .....	"	73
 <b>3. LA RISORSA VENTO:</b> <b>ORIGINE, ENERGIA E PARAMETRI CARATTERISTICI</b> .....	"	83
3.1. Introduzione .....	"	83
3.2. Il vento: generazione e caratteristiche .....	"	83
3.3. L'energia del vento e sua conversione.....	"	88
3.4. I parametri caratteristici del vento .....	"	95
 <b>4. LO SVILUPPO DI UN PROGETTO EOLICO</b> .....	"	107
4.1. Introduzione .....	"	107
4.2. Fasi di sviluppo di un impianto eolico .....	"	107
4.2.1. Reperimento di siti idonei ed analisi preliminare .....	"	108
4.2.2. Studi di prefattibilità tecnica ed economica e di inserimento ambientale.....	"	110
4.2.3. Rapporti con le amministrazioni locali e con le comunità coinvolte .....	"	110
4.2.4. Studio ed analisi delle caratteristiche anemologiche.....	"	111

4.2.5.	Analisi di micrositing .....	p.	119
4.2.6.	Gli impianti <i>offshore</i> .....	"	123
4.2.7.	Gli impianti minieolici.....	"	124
4.3.	Progettazione tecnica preliminare .....	"	124
4.4.	Analisi di impatto ambientale ed interventi di mitigazione .....	"	126
4.5.	La progettazione definitiva ed esecutiva del parco eolico .....	"	126
4.5.1.	Quadro di riferimento della normativa tecnica .....	"	126
4.5.2.	Fondazioni .....	"	127
4.5.3.	Analisi di stabilità dei pendii.....	"	143
4.5.4.	Valutazione dell'azione sismica.....	"	146
4.5.5.	Piazzole .....	"	152
4.5.6.	Viabilità esterna ed interna .....	"	156
4.5.7.	Componenti elettriche ed opere di connessione alla rete.....	"	160
4.6.	Costruzione .....	"	171
4.7.	Collaudo, gestione e manutenzione .....	"	177
4.8.	Gli aspetti ambientali dell'energia eolica .....	"	180
4.8.1.	I benefici ambientali .....	"	181
4.8.2.	Impatto visivo e paesaggistico.....	"	191
4.8.3.	Impatti sull'ambiente naturale .....	"	200
4.8.4.	Impatto acustico .....	"	216
4.8.5.	Impatto sui segnali elettromagnetici.....	"	225
4.8.6.	Impatti dovuti al trasporto dei componenti .....	"	228
4.8.7.	Impatti su aria, acqua e suolo .....	"	232
4.8.8.	Impatti dovuti a produzione di rifiuti solidi o pericolosi ...	"	239
4.8.9.	Impatto su risorse archeologiche, storiche ed architettoniche.....	"	241
4.8.10.	Impatti socioeconomici.....	"	242
4.8.11.	Impatti su sicurezza e salute .....	"	243
4.8.12.	Gli impatti degli impianti eolici <i>offshore</i> .....	"	251
<b>5.</b>	<b>L'EOLICO FRA LEGGI, REGOLE, AUTORIZZAZIONI ED IMPATTO AMBIENTALE .....</b>	<b>"</b>	<b>258</b>
5.1.	Introduzione .....	"	258
5.2.	Il contesto normativo .....	"	258
5.2.1.	Il quadro normativo internazionale .....	"	258
5.2.2.	Il quadro normativo comunitario.....	"	259
5.2.3.	Il quadro normativo nazionale – I principali strumenti normativi nazionali .....	"	270
5.3.	La Valutazione di Impatto Ambientale .....	"	287
5.3.1.	Premessa .....	"	287
5.3.2.	Definizioni e finalità dell'istituto .....	"	288
5.3.3.	Gli attori ed i loro ruoli nella procedura di VIA .....	"	289

5.3.4.	La procedura di VIA per i progetti di rilevanza regionale .....	p.	289
5.3.5.	Impianti eolici ed autorizzazione ambientale .....	"	299
5.4.	Autorizzazione unica per la costruzione di centrali elettriche alimentate da fonti rinnovabili e impianti eolici .....	"	299
5.4.1.	La definizione tradizionale di autorizzazione amministrativa .....	"	301
5.4.2.	Procedimento unico: la semplificazione mal riuscita .....	"	302
5.4.3.	La Conferenza dei Servizi .....	"	303
5.4.4.	Regione che vai legge che trovi (anzi, che trovavi!) .....	"	304
5.4.5.	Mancando la "guida nazionale", lo Stato impugnava .....	"	307
5.5.	Linee guida regionali per la realizzazione di impianti eolici e l'inserimento nel paesaggio .....	"	308
5.5.1.	Introduzione .....	"	308
5.5.2.	Analisi ed aspetti significativi .....	"	309
5.6.	... e, finalmente, le "Linee guida nazionali per il procedimento di cui all'articolo 12 del decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387 per l'autorizzazione alla costruzione e all'esercizio di impianti di produzione di elettricità da fonti rinnovabili nonché linee guida tecniche per gli impianti stessi" .....	"	312
5.7.	Elementi per il corretto inserimento nel paesaggio e sul territorio degli impianti eolici .....	"	320
<b>6.</b>	<b>ANALISI ECONOMICA E FINANZIARIA .....</b>	"	331
6.1.	Introduzione .....	"	331
6.2.	Analisi economica .....	"	331
6.3.	Strumenti di ingegneria finanziaria .....	"	342
6.4.	I meccanismi di supporto ed incentivazione .....	"	350
6.5.	Regimi italiani di sostegno finalizzati alla promozione dell'uso dell'energia eolica .....	"	357
6.6.	La remunerazione dell'energia immessa in rete .....	"	375
6.7.	Il dispacciamento dell'energia da fonti non programmabili: premi e penalità .....	"	378
<b>7.</b>	<b>ESEMPI PROGETTUALI .....</b>	"	380
7.1.	Progettazione di un impianto micro-eolico .....	"	380
7.2.	Progettazione di un impianto eolico di media taglia .....	"	380
7.3.	Progettazione di un parco eolico .....	"	381
<b>8.</b>	<b>GUIDA ALL'INSTALLAZIONE E ALL'USO DEL SOFTWARE ....</b>	"	382
8.1.	I contenuti del CD-ROM allegato .....	"	382
8.2.	Requisiti minimi hardware e software .....	"	382

8.3. Richiesta della password utente .....	p.	382
8.4. Installazione per utenti Microsoft Windows .....	~	382
8.5. Installazione per utenti Macintosh .....	~	383
8.6. Procedura per la registrazione del software .....	~	383
8.7. Utilizzo del software in ambiente Microsoft Windows.....	~	384
8.8. Utilizzo del software in ambiente Macintosh.....	~	385
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	~	386
Siti web .....	~	387

## PREFAZIONE

L'eolico è una fonte rinnovabile pulita, disponibile ed efficiente che negli ultimi cinque anni ha immesso in rete energia elettrica pari a tre volte quella derivata dalla fonte nucleare che oggi viene proposta, da qualche sprovveduto, come la soluzione energetica del futuro. 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 quindi che, nel mondo, la crescita cumulativa dell'eolico abbia raggiunto nel 2010 la soglia dei 200.000 MW di potenza installata. Nella sola Italia 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 7 milioni di cittadini. In questa crescita tumultuosa, non tutto è stato fatto 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 ed agli errori commessi talvolta nell'uso del territorio. La disinformazione e la malafede si nutrono di ignoranza. Ecco perché questo volume di Nicola Graniglia esce nel momento giusto per assolvere egregiamente il compito di fornire con linguaggio chiaro e dovizia di figure esplicative le informazioni tecniche indispensabili per affrontare tematiche complesse.

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 però 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.

L'obiettivo esplicito del volume è quello di accompagnare il Lettore nell'apprendimento delle nozioni di base sull'energia eolica sino alle fasi del processo di sviluppo tecnico di un impianto eolico ed alla sua analisi economica. I contenuti sono impostati in maniera da essere utili per tutti i professionisti che operano nella progettazione, nella valutazione e minimizzazione dell'impatto ambientale e nell'analisi della redditività di un impianto eolico. Un mio saggio professore mi ammoniva a non cercare la Scienza con la S maiuscola nei manuali, perché, diceva, nei manuali troverai spesso

molte risposte, ma raramente le domande che meritano di essere poste. I manuali sono quindi spesso intrinsecamente incompleti. Il miglior pregio riconoscibile in questo volume è quello di essere un tentativo riuscito di dare una veste di completezza ad una materia per sua natura frammentata e in fase di evoluzione.

L'oggetto del capitolo 1 sono i temi di interesse generale sull'energia eolica: dopo alcuni cenni storici relativi all'utilizzo dell'energia del vento, dai mulini a vento ai moderni aerogeneratori per la produzione di energia elettrica, sono definite tipologie e classificazioni degli aerogeneratori in termini di caratteristiche costruttive e potenza, e vengono evidenziati gli aspetti positivi dell'energia eolica e le barriere al suo sviluppo e, infine, gli scenari attuali in Italia e nel Mondo e le prospettive future del settore eolico.

Il capitolo 2 vede come argomento principale l'aerogeneratore o turbina eolica: vengono ivi trattati il principio di funzionamento, che permette di trasformare l'energia del vento in energia meccanica prima ed elettrica poi, e la tecnologia dei moderni aerogeneratori con la descrizione delle componenti costruttive e dei possibili sviluppi nell'ottica di un aumento del rendimento energetico. Infine si analizzano nello specifico gli aspetti realizzativi ed ambientali degli impianti *off-shore* e le soluzioni nel campo del mini-eolico (turbine ad asse orizzontale o verticale di piccola taglia).

Nel capitolo 3 si discute sia della "risorsa eolica", in termini di processi che danno origine al vento, di conversione dell'energia e di fenomeni che possono direttamente influenzare il rendimento di uno o più aerogeneratori, dai quali non si può prescindere in punto di progettazione di un impianto, sia dei fenomeni aerodinamici che si possono instaurare sulle componenti degli aerogeneratori e tra aerogeneratori.

Centrale nell'economia del testo è, poi, il capitolo 4 dove vengono esplicate tutte le fasi dello sviluppo di un impianto eolico: dalle attività preliminari (individuazione del sito a "vocazione eolica", prefattibilità tecnica ed economica dell'impianto e rapporti con le Amministrazioni locali e con le popolazioni coinvolte nel processo), passando per la caratterizzazione anemologica e per la definizione del potenziale energetico (analisi di *micrositing*), fino alle attività relative alla progettazione di un impianto eolico (dal posizionamento delle turbine al dimensionamento delle fondazioni, dagli interventi sulla viabilità per permettere l'accesso al sito ed il trasporto delle componenti degli aerogeneratori alla progettazione delle opere elettriche e di connessione alla rete di trasporto dell'energia elettrica) ed alla definizione degli impatti potenziali sull'ambiente e delle opere di mitigazione degli stessi.

Argomento del capitolo 5 sono le procedure autorizzative necessarie alla costruzione di un impianto eolico e la normativa di settore, con particolare riferimento alle Linee guida nazionali e regionali per la valutazione ambientale di un impianto eolico e per l'autorizzazione unica.

Nel capitolo 6 vengono affrontati gli aspetti economici e finanziari ed i regimi di incentivazione o di tariffazione applicabili agli impianti eolici (dalla piccola alla grande taglia di potenza).

Nel conclusivo capitolo 7 vengono posti all'attenzione del Lettore, in maniera sintetica, tre esempi di progettazione di impianti di piccola, media e grande taglia per i quali, nel CD-ROM allegato, è riportata l'illustrazione in maniera operativa delle fasi evidenziate nei capitoli precedenti.

Il volume scritto con linguaggio comprensibile anche ai non addetti ai lavori, fornisce agli operatori del settore e agli interessati le ricette tecniche praticabili per la soluzione dei problemi e probabilmente la migliore sintesi ad oggi disponibile per affrontare con possibilità di successo le decisioni in materia di utilizzo del vento dal punto di vista tecnico, ambientale ed economico.

*Riccardo Basosi*

Il Prof. Riccardo Basosi è professore ordinario di Chimica Fisica e di Termodinamica applicata all'uso razionale ed efficiente dell'energia presso la Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali dell'Università degli Studi di Siena e Pro-Rettore all'Energia e le Alte Tecnologie. Ha diretto l'equipe delle università toscane e dell'ENEA che ha elaborato il Piano Energetico Regionale della Toscana approvato nel 2000 e ha coordinato piani energetici ambientali a livello provinciale e comunale. È autore di innumerevoli pubblicazioni scientifiche nel campo della Chimica Fisica, della Chimica Ambientale e di vari libri in materia di Energia.



## GLI IMPIANTI EOLICI

### ▼ 1.1. Introduzione

A partire dagli anni '80, quando è iniziata la diffusione industriale del settore eolico per la produzione di energia elettrica, le tecnologie si sono sviluppate in maniera esponenziale raggiungendo, al giorno d'oggi, livelli elevatissimi in termini di potenza unitaria delle turbine eoliche, di potenza installata complessiva, di efficienza energetica e di riduzione degli impatti ambientali (visivo, acustico, elettromagnetico, ecc.).

Sebbene siano state esplorate diverse soluzioni per arrivare alla progettazione della turbina eolica ideale, negli ultimi dieci anni la tecnologia si è ormai consolidata in maniera significativa. La grande maggioranza delle turbine commerciali sono ad asse orizzontale e con tre pale uniformemente distanziate tra loro. Queste sono collegate ad un rotore mediante il quale l'energia è trasferita ad un generatore attraverso un moltiplicatore di giri. In alcune turbine il moltiplicatore di giri è sostituito da un sistema a trasmissione diretta.

La maggior parte delle moderne turbine eoliche è dotata di sistemi di controllo e può funzionare a velocità di rotazione variabile in maniera da adattarsi alle modifiche del vento (velocità e direzione); questo permette alle turbine anche di incrementare la capacità di operare in maniera armonica con il funzionamento della rete elettrica alla quale sono connesse.

Negli ultimi anni, grazie anche al forte impulso dato dalla nascita e dall'esplosione del settore degli impianti eolici *offshore*, le turbine eoliche sono diventate più grandi e più alte: i generatori sono 100 volte più grandi di quelli utilizzati negli anni '80 all'inizio dello sviluppo del settore eolico.

Nello stesso periodo, il diametro del rotore è cresciuto di 8 volte. Inoltre, le turbine utilizzano materiali resistenti ma leggeri per avere pesi e volumi sempre più ridotti, sono snelle, aerodinamiche ed eleganti.

I moderni impianti eolici possono essere installati e sono efficienti in una vasta gamma di siti caratterizzati da venti modesti o elevati e dalle più varie condizioni meteorologiche e sono generalmente ben integrati con l'ambiente ed accettati dalla popolazione.

Le nazioni europee che si sono maggiormente distinte nel favorire la crescita del settore eolico sono Danimarca, Germania e Spagna. In Danimarca, oltre il 20% dei consumi energetici sono coperti dalla produzione eolica; sia in Germania che in Spagna questo valore supera il 5%. Nella regione settentrionale dello Schleswig-Holstein in Germania sono installati oltre 1800 MW di potenza eolica che, con la loro produzione, contribuiscono ad oltre il 30% della domanda di energia elettrica dell'area; mentre nella regione della Navarra in Spagna, il 50% dei consumi è soddisfatto dall'energia eolica. Fuori dall'Europa, questo ruolo spetta agli Stati Uniti, all'India e, più di recente, alla Cina.

Il diverso sviluppo del mercato ed il grado di apporto dell'energia eolica ai consumi energetici nei vari paesi sono fortemente influenzati dalle politiche statali di supporto quali tariffe incentivanti o crediti di imposta.

Gli obiettivi futuri principali della progettazione in campo eolico sono:

- maggiore affidabilità;
- maggiore compatibilità con la rete;
- riduzione delle emissioni acustiche;
- massima efficienza ed aerodinamicità;
- alta produzione a basse velocità del vento.

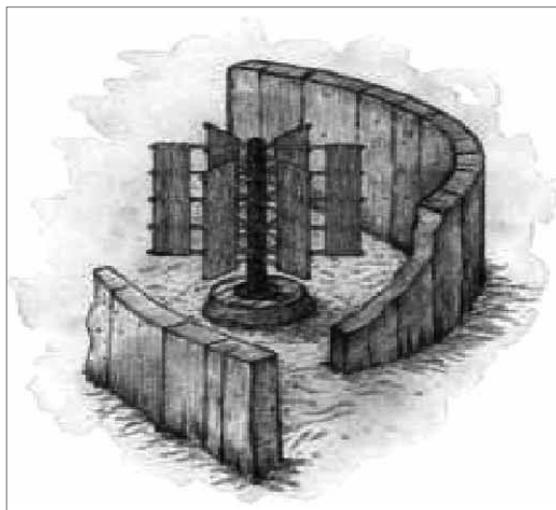
In questo capitolo, dopo un breve *excursus* storico del settore, dai primi e primordiali utilizzi in agricoltura e sino agli sviluppi tecnologici per la produzione energetica, saranno discusse alcune definizioni fondamentali e, quindi, le barriere alla diffusione dell'energia eolica e gli scenari attuale e futuro di questa risorsa energetica.

## ▼ 1.2. Cenni storici

I mulini a vento sono utilizzati da almeno 3000 anni, principalmente per la macinatura del grano e per il pompaggio dell'acqua.

Sebbene alcuni documenti storici riferiscano dell'ambizioso programma dell'Imperatore di Babilonia Hammurabi che avrebbe utilizzato l'energia del vento per un enorme programma di irrigazione già nel XVII secolo A.C., 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.

Altri riferimenti storici documentano la presenza di veri e propri mulini a vento ad asse verticale in Persia anteriormente al 200 a.C.



**Figura 1.1.** Uno dei primi riferimenti ad un mulino a vento ad asse verticale (fonte: Wikipedia)

Uno dei primi impianti eolici conosciuti è la macchina del matematico greco Eronne di Alessandria (10-70 d.C.).

Comunque, il primo esempio di mulini a vento utilizzati a scala industriale per la macinatura dei cereali e la produzione dello zucchero sono le macchine ad asse verticale costruite nel VII secolo d.C. a Sistan (nell'attuale Iran).

La diffusione della tecnologia eolica in Europa è attribuita da alcuni storici alla sua scoperta durante il periodo delle crociate. Altri studiosi invece ritengono che l'invenzione europea sia indipendente dalla tecnologia già utilizzata in Medio-Oriente. A dimostrazione di questa affermazione, gli storici usano sia le differenze tecnologiche tra i mulini europei, ad asse orizzontale, e quelli Medio-Orientali, ad asse verticale, che 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.

Sebbene vi siano diverse fonti che parlano di mulini a vento, bisogna aspettare il secolo successivo per avere il primo mulino a vento ad asse orizzontale per la macinatura del grano nel nostro continente: la prima notizia certa riferisce di un esemplare costruito a Weedley nello Yorkshire nel 1185.

A partire dal XII secolo, i mulini a vento ad asse orizzontale divengono parte integrante dell'economia rurale. Nell'Inghilterra medievale i diritti di utilizzare l'acqua quale fonte di energia erano riservati alla sola classe nobile ed al clero; pertanto l'energia eolica assume un ruolo importante per le altre classi sociali. 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).



**Figura 1.2.** *Isola di Mothia (Marsala): mulino a vento* (fonte: Autore)

Nel continente americano la comparsa dei mulini a vento risale al 1600 grazie alla colonizzazione degli europei.

I primi esempi di turbine eoliche per la generazione di elettricità risalgono al 1887 in Scozia ed al 1888 a Cleveland negli Stati Uniti, dove Brush realizzò una macchina da 12 kW di potenza e con un rotore in legno da 17 m di diametro e dove, nel 1908, risultano installati 72 generatori eolici da 5 a 25 kW di potenza. A partire dal 1891 si registrano i primi importanti studi europei (Olanda e Danimarca) sulla generazione di energia elettrica dal vento.

Per la maggior parte del XX secolo l'utilizzo dell'energia eolica è concentrato in particolare su sistemi di carica di batterie per l'alimentazione di utenze isolate solitamente caratterizzati da rotori a due o tre pale e sistemi per il pompaggio delle acque per usi irrigui caratterizzati dal ricorso a rotori con un maggior numero di pale.

In Danimarca, nei primi anni del 1900 sono installate circa 30mila turbine presso aziende agricole ed abitazioni per la produzione di energia elettrica. Nel 1918, centoventi aziende elettriche locali hanno installato almeno una turbina eolica, con potenze intorno ai 20-35 kW, per un totale di 3 MW di potenza complessiva e per una produzione di circa il 3% dell'energia elettrica prodotta nel paese.

Nel periodo di picco tra il 1930 ed il 1940 si contano oltre 6 milioni di mulini a vento in aree rurali.

Di questo periodo è la turbina in servizio nel 1931 a Yalta sul Mar Nero (ex URSS): considerata il precursore dei moderni generatori eolici ad asse orizzontale, era un generatore da 100 kW di potenza, 30 m di diametro e 30 m di torre di sostegno connesso ad una piccola rete locale di distribuzione con una produzione di circa 280mila kWh/anno. A questa si possono aggiungere ad esempio la turbina da 30 kW di potenza, 20 m di diametro (con pale cilindriche) e 33 m di torre di sostegno costruita da Flettner nel 1926 e la turbina da 1250 kW, 53 m di diametro e 38 m di torre di sostegno costruita da Smith-Putnam nel 1941 a Grandpa's Knob in Vermont (USA).

Tali sistemi divennero comunque obsoleti ed antieconomici con lo sviluppo delle reti di distribuzione dell'energia elettrica e vennero sostituiti intorno agli anni '50 (attualmente, negli Stati Uniti si contano ancora circa 30mila sistemi per il pompaggio dell'acqua tuttora funzionanti).

Negli anni '50 e '60 vi sono comunque alcune eccezioni costituite ad esempio dalla turbina da 100 kW, 24 m di diametro e 30 m di torre di sostegno costruita da Enfield nel 1952 negli Stati Uniti su un progetto del francese Andreau (nota pertanto come turbina di Enfield-Andreau) e dalla turbina da 100 kW, 18 m di diametro e 24 m di torre di sostegno costruita da John Brown & Company nel 1954 in Gran Bretagna (la prima eolica connessa ad una rete di distribuzione alimentata a diesel).

Interessanti sono alcuni prototipi sviluppati in Francia nel periodo che va dal 1958 al 1966. A Nogent Le Roy dal 1958 al 1963, ha funzionato una turbina da 800 kW, 31 m di diametro e 32 m di torre di sostegno collegata alla rete di distribuzione nazionale.

Sino al giugno 1964 hanno funzionato a St. Remy des Landes due turbine collegate alla rete di distribuzione installate da Électricité de France l'anno precedente. Una da 130 kW di potenza, 21 m di diametro e 17 m di torre di sostegno e l'altra da 1100 kW e 35 m di diametro.

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 che hanno portato alla realizzazione di alcuni prototipi di tipologie e taglie di potenza differenti, molti dei quali hanno portato a scarsi risultati con il conseguente abbandono del progetto.

Si ricordano ad esempio il Mod-0 da 100 kW e 38 m di diametro costruito nel 1975 negli Stati Uniti e la sua evoluzione Mod-5b da 2,5 MW e 97,5 m di diametro costruito nel 1987, la turbina eolica da 4 MW ad asse verticale di Darreius costruita in Canada ed altri prototipi sviluppati in Gran Bretagna, Stati Uniti e Germania.

Al termine di questa fase di sviluppo ed 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. In particolare in California, come risultato di una combinazione favorevole di leggi federali, di incentivi e dell'introduzione del concetto di costi evitati da parte della *California Energy Commission* (1982), si registra una rapida crescita del mercato: al 1995 risultano installati oltre 1700 MW, più della metà dopo il 1985 quando la tassazione fu ridotta al 15%.

Tale situazione ha avuto come risultato, da una parte, la crescita indiscriminata di impianti eolici in alcune aree della California (ad esempio San Gorgonio, Tehachapi ed Altamon Pass) caratterizzati dall'installazione di turbine mal progettate e dal basso rendimento e, dall'altra, la possibilità per i produttori europei (in particolare danesi) di esportare grandi quantità di macchine e, contemporaneamente, testare nuove e più efficienti soluzioni tecnologiche. Si può affermare che, sebbene la scarsa qualità delle prime turbine installate in California abbia creato una cattiva immagine dalla quale l'eolico si sarebbe risollevato solo molto tempo dopo, la moderna industria eolica è nata in quel Paese.

A partire dagli anni '90, i maggiori sviluppi si sono verificati in Europa. Dal punto di vista tecnologico, i risultati più significativi sono stati l'ingresso dei produttori tedeschi e l'introduzione di soluzioni tecnologiche all'avanguardia. Tra questi si evidenziano il sistema a trasmissione diretta proposto dalla tedesca Enercon, i nuovi sistemi di controllo a velocità variabile ed i nuovi materiali per la costruzione delle pale. Oltre a queste innovazioni, la più importante innovazione degli ultimi anni è stata senza dubbio lo sviluppo di macchine sempre più grandi che ha portato alle attuali turbine eoliche di grande taglia in commercio.

Attualmente, l'energia eolica, con oltre 150 GW installati al termine del 2009 a livello mondiale, ricopre un ruolo fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi internazionali di sostituzione sempre crescente delle fonti fossili e di riduzione delle emissioni climalteranti.

Le ragioni per cui in alcuni Paesi lo sviluppo dell'energia eolica sia molto forte e, invece, in altri non sia tale da raggiungere le aspettative e le potenzialità sono complesse e non si possono spiegare con la sola disponibilità della risorsa vento.

Altri importanti fattori includono i diversi programmi di supporto e di incentivo economico e finanziario attuati, la tipologia dei procedimenti che portano all'autorizzazione alla realizzazione degli impianti ed alle difficoltà di accettazione da parte della popolazione interessata dalla realizzazione dell'impianto, in particolare rispetto all'impatto visivo.

### ▼ 1.3. Caratteristiche generali, tipologia e classificazione degli aerogeneratori

In generale, 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:

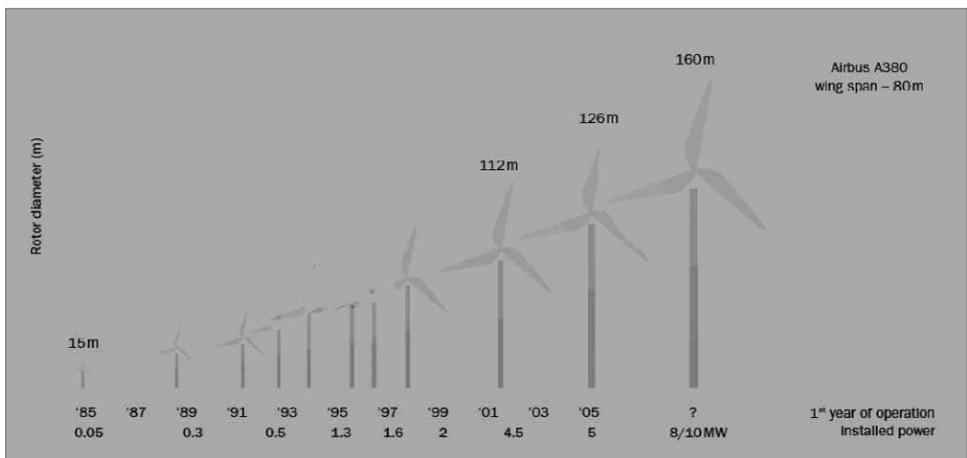
- ad asse orizzontale;
- ad asse verticale.

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 taglia superiore al MW di potenza. I secondi sono tipici della classi di potenza inferiori al MW.

Le macchine eoliche (principalmente ad asse orizzontale) 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.

**Tabella 1.1.** *Classificazione degli aerogeneratori per taglia*

Tipologia	Potenza generatore	Diametro rotore
Piccola taglia	$P < 100 \text{ kW}$	$D < 20 \text{ m}$
Media-taglia	$100 \text{ kW} < P < 1.000 \text{ kW}$	$20 \text{ m} < D < 50 \text{ m}$
Grande taglia	$P > 1.000 \text{ kW}$	$D > 50 \text{ m}$



**Figura 1.3.** *Evoluzione del diametro del rotore*

(fonte: AA.VV., Strategic research agenda – Market deployment strategy from 2008 to 2030)

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