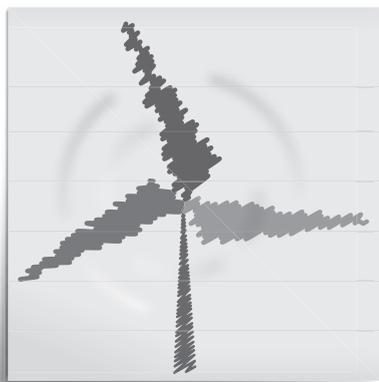


Nicola Graniglia

MINIEOLICO

**LE TURBINE EOLICHE
DI PICCOLA E PICCOLISSIMA TAGLIA**



SOFTWARE INCLUSO

NORMATIVA DI RIFERIMENTO, ARCHIVIO DELLE IMMAGINI CONTENUTE NEL VOLUME
E REPERTORIO FOTOGRAFICO DELLE FASI DI MONTAGGIO DI AEROGENERATORI

Glossario (principali termini tecnico-normativi), **F.A.Q.** (domande e risposte sui principali argomenti),
Test iniziale (verifica della formazione di base), **Test finale** (verifica dei concetti analizzati)




GRAFILL

Nicola Graniglia

MINIEOLICO

ISBN 13 978-88-8207-503-3

EAN 9 788882 075033

Manuali, 136

Prima edizione, maggio 2013

Graniglia, Nicola <1970->

Minieolico / Nicola Graniglia. – Palermo : Grafill, 2013.

(Manuali ; 136)

ISBN 978-88-8207-503-3

1. Impianti eolici.

621.312136 CDD-22

SBN Pal0254824

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

Finito di stampare nel mese di maggio 2013

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

[...]

*Laudato si', mi' Signore, per frate Vento
et per aere et nubilo et sereno et onne tempo,
per lo quale, a le Tue creature dàì sustentamento.*

[...]

Dal *Cantico delle Creature* (Canticus o Laudes Creaturarum)
San Francesco d'Assisi (XIII secolo)

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento va in primis all'Arch. Paola Oreto, Direttore Editoriale della Grafill, sia per avermi concesso l'opportunità di affrontare insieme questa mia seconda "fatica letteraria" che, ancora una volta, per la fiducia e la pazienza dimostrate in questi mesi; ma, soprattutto, per credere ancora nella necessità di diffusione delle fonti energetiche rinnovabili, e dell'eolico in particolare, in un momento in cui nel nostro Paese, oltre alla carenza di formazione ed informazione, c'è una evidente diffidenza nei confronti di questo settore strategico.

Devo poi ringraziare per il materiale ed il supporto tecnico utilizzati nel Capitolo 9, Lorenzo Partesotti di Aria S.r.l., il Prof. Liguri e l'Ing. Graziani di En-Eco S.p.A. e l'Ing. Lecce e l'Ing. Miduri di Jonica Impianti S.r.l..

Un ringraziamento ancora all'Avv. Cristina Baglivo, per avermi aiutato a districarmi nella normativa di settore con la sua esperienza.

INDICE

PREFAZIONE	p.	7
1. GLI IMPIANTI EOLICI DI PICCOLA E PICCOLISSIMA TAGLIA	"	11
1.1. Introduzione.....	"	11
1.2. Cenni storici.....	"	13
1.3. Definizioni, tipologia e classificazione degli aerogeneratori di piccola taglia.....	"	16
1.4. La diffusione del minieolico nel mondo	"	18
2. TECNOLOGIA DEGLI AEROGENERATORI DI PICCOLA E PICCOLISSIMA TAGLIA	"	25
2.1. Introduzione.....	"	25
2.2. La configurazione degli aerogeneratori di piccola taglia.....	"	25
2.3. Tecnologia e componenti	"	28
2.4. Applicazioni impiantistiche	"	41
2.5. Stato delle tecnologie e costi	"	43
2.6. Sviluppi tecnologici futuri	"	50
3. LA RISORSA VENTO: ORIGINE, ENERGIA E PARAMETRI CARATTERISTICI	"	51
3.1. Introduzione.....	"	51
3.2. Il vento: generazione e caratteristiche	"	51
3.3. L'energia del vento e sua conversione	"	57
3.4. I parametri caratteristici del vento	"	66
4. INDIVIDUAZIONE DI SITI A "VOCAZIONE" EOLICA E CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA	"	79
4.1. Individuazione di siti idonei	"	79
4.2. Caratterizzazione anemologica di un sito	"	82
5. I POTENZIALI IMPATTI AMBIENTALI E LE BARRIERE ALLO SVILUPPO	"	95
5.1. Impatto ambientale: analisi e mitigazione	"	95
5.2. Ulteriori barriere alla diffusione	"	109
6. LE APPLICAZIONI IN AMBIENTE URBANO O SEMIURBANO	"	111
6.1. Introduzione.....	"	111
6.2. Il campo di vento	"	111

6.3.	La modellazione del flusso di vento	p.	114
6.4.	Valutazione della producibilità energetica	"	121
6.5.	Il corretto posizionamento di un aerogeneratore	"	122
6.6.	Conclusioni	"	124
7.	LE PROCEDURE AUTORIZZATIVE		
	E LA NORMATIVA DI RIFERIMENTO	"	126
7.1.	Introduzione	"	126
7.2.	I principali strumenti normativi nazionali	"	126
7.3.	I procedimenti autorizzativi	"	139
7.4.	Il quadro autorizzativo regionale	"	144
7.5.	Gli adempimenti per la connessione alla rete	"	150
8.	ANALISI ECONOMICA E FINANZIARIA	"	157
8.1.	Introduzione	"	157
8.2.	I costi del mini e micro eolico	"	157
8.3.	I meccanismi di supporto ed incentivazione	"	159
8.4.	Regimi italiani di sostegno finalizzati alla promozione dell'uso dell'energia eolica	"	160
8.5.	Il decreto ministeriale 6 luglio 2012	"	172
8.6.	La remunerazione dell'energia immessa in rete	"	179
8.7.	Analisi economica	"	182
9.	ESEMPI APPLICATIVI	"	200
9.1.	Premessa	"	200
9.2.	Impianto micro eolico ad asse verticale da 1 kW di potenza	"	200
9.3.	Impianto mini eolico ad asse orizzontale da 30 kW di potenza	"	211
9.4.	Impianto mini eolico ad asse orizzontale da 55 kW di potenza	"	227
10.	INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE ALLEGATO	"	255
10.1.	Introduzione	"	255
10.2.	Requisiti minimi hardware e software	"	255
10.3.	Download del software e richiesta della password di attivazione	"	255
10.4.	Installazione e attivazione del software	"	256
	BIBLIOGRAFIA	"	258
	Publicazioni on line/Riviste	"	259
	Interventi a convegni/conferenze	"	259
	Siti web	"	260
	Produttori di turbine/componenti	"	260
	Aziende del settore elettrico	"	260
	Istituzioni	"	261
	Vari	"	261

PREFAZIONE

In un momento storico di grande difficoltà economica, l'eolico ha superato nel corso del 2012 la soglia dei 250 GW di potenza installata: gli impianti eolici sono presenti in 75 Paesi e, in 24 di questi, la potenza installata supera 1 GW.

Sempre nel 2012, l'Europa ha raggiunto lo storico traguardo dei 100 GW di potenza eolica installata.

In Italia, nonostante una politica non esente da contraddizioni sulle fonti di energia rinnovabili, nel 2012 sono stati installati ulteriori 1.272 MW di potenza eolica, arrivando a superare gli 8.000 MW di potenza complessiva installata, e la generazione di elettricità nei soli primi sei mesi dell'anno, è stata pari a 6.710 GWh, con un aumento del 43,5% rispetto allo stesso periodo del 2011.

Andando ad analizzare nel dettaglio il settore degli impianti eolici di piccola e piccolissima taglia, la potenza complessiva installata a livello mondiale è di circa 500 MW, per una generazione di energia elettrica di poco superiore ai 400 GWh all'anno.

Nel nostro Paese, al 30 giugno 2012, complessivamente sono oltre 250 i comuni in cui questi impianti sono presenti, con una distribuzione della potenza installata prevalente nelle regioni meridionali.

Le turbine installate risultano essere oltre 370 per circa 21 MW di potenza complessiva. Se da una parte il valore di mercato può sembrare trascurabile se confrontato con la potenza installata riferibile agli impianti di grande taglia, dall'altra, la crescita degli ultimi anni, a volte sostenuta da meccanismi incentivanti, è comunque indicativa delle enormi potenzialità di sviluppo del settore.

Per non parlare dello straordinario bacino di utenza, e di "vocazione eolica", costituito dai Paesi in Via di Sviluppo, in particolare per le applicazioni *off grid*.

Purtroppo, il settore deve molto spesso fare i conti con la stessa diffidenza e disinformazione subita dagli impianti di grande taglia.

Premesso che il mini e il micro eolico sono, solo apparentemente, simili agli impianti di grande taglia, è doveroso citare gli innumerevoli benefici legati a queste applicazioni, riconducibili principalmente ai danni evitati rispetto al ricorso ad altre fonti di energia o a soluzioni di connessione alla rete difficilmente attuabili e comunque con costi, ambientali ed economici, ben più elevati.

Per citare solo i principali benefici: il servizio a zone altrimenti isolate o raggiungibili mediante opere di maggior impatto; l'attuazione di una politica di generazione distribuita dell'energia elettrica; il contributo alla diversificazione delle fonti; le emissioni evitate di climalteranti.

Se la disinformazione si nutre di ignoranza, benvenuto sia il volume di Nicola Graniglia che si propone, raggiungendolo, l'obiettivo di fornire con linguaggio accessibile a molti e dovizia di

figure esplicative delle nozioni introdotte le informazioni indispensabili per affrontare tematiche complesse di tipo tecnico, ambientale, economico e normativo riguardanti il mini e micro eolico.

L'obiettivo esplicito del volume è quello di accompagnare il Lettore nell'apprendimento delle nozioni di base sull'energia eolica e sugli impianti di piccola e piccolissima taglia sino alle fasi di sviluppo di un impianto ed alla sua analisi economica. I contenuti sono impostati in maniera da essere utili per chi opera nella valutazione delle potenzialità, nella progettazione e nell'analisi della redditività di un impianto mini e micro eolico ma, anche, per chi da neofita volesse avvicinarsi al settore.

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 di piccola e piccolissima taglia in termini di caratteristiche costruttive e potenza e gli scenari attuali in Italia e nel Mondo e le prospettive future del settore.

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.

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

Centrale nell'economia del testo è, poi, il Capitolo 4 dove vengono esplicitate tutte le fasi di individuazione dei siti a "vocazione eolica" e di caratterizzazione anemologica, sottolineandone l'importanza anche per la valutazione di un impianto mini e micro eolico e le soluzioni tecnologiche specifiche per questi impianti.

I potenziali impatti sull'ambiente e le relative opere di mitigazione e le ulteriori barriere allo sviluppo sono affrontati nel successivo Capitolo 5.

Argomento del Capitolo 6 sono le applicazioni in ambiente urbano o semiurbano, tipiche delle tecnologie di piccola e piccolissima taglia e che impongono nuove sfide in termini di ricerca e sviluppo sia sulle tecnologie che sull'analisi del flusso di vento e sulle interferenze dovute alla presenza di ostacoli.

Argomento del Capitolo 7 sono le procedure autorizzative necessarie alla costruzione di un impianto e la normativa di settore vigente in Italia; mentre nel Capitolo 8 vengono affrontati gli aspetti economici e finanziari ed i regimi di incentivazione o di tariffazione applicabili. Nei due capitoli è dato particolare risalto al decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28 "Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE" ed al decreto ministeriale 6 luglio 2012 "Attuazione dell'articolo 24 del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28, recante incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti a fonti rinnovabili diversi dai fotovoltaici".

Nel conclusivo Capitolo 9 vengono posti all'attenzione del Lettore tre esempi di progettazione di impianti, due ad asse orizzontale ed uno ad asse verticale, con l'illustrazione operativa delle fasi evidenziate nei capitoli precedenti.

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

Riccardo Basosi

RICCARDO BASOSI

Il Prof. Riccardo Basosi è professore ordinario di Chimica Fisica e di Termodinamica applicata all'uso razionale ed efficiente dell'energia presso il Dipartimento di Biotecnologie, Chimica e Farmacia dell'Università degli Studi di Siena e Pro Rettore all'Energia. È inoltre Direttore della Scuola di Dottorato in Scienze Chimiche.

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 molti piani energetici ambientali provinciali e comunali. È "Grandparent" del SECEM (Sistema Europeo Certificazione Energy Management).

È autore di oltre 200 pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali nel campo della Chimica Fisica, della Chimica Ambientale, dell'Energetica e di vari libri in materia di Energia.

<http://www.chim.unisi.it/basosi/didattica/intro.html>

GLI IMPIANTI EOLICI DI PICCOLA E PICCOLISSIMA TAGLIA

1.1. Introduzione

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, da alcuni, viene proposta come la soluzione energetica del futuro. Tra tutte le rinnovabili, è quella che mostra importanti livelli di maturazione tecnologica e di rendimento dei sistemi ed un'enorme capacità in termini di commercializzazione e diffusione. 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 a livello mondiale, nel 2012, la crescita cumulativa dell'eolico abbia raggiunto e superato i 250 GW di potenza installata con una capacità di generazione pari al 3% della produzione mondiale di energia elettrica. In questa crescita tumultuosa non tutto è stato fatto a regola d'arte, anche se va precisato che *la diffidenza manifestata da molteplici direzioni verso la fonte eolica è spesso ingiustificata e priva di fondamento*, 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 (connessi principalmente all'impatto visivo ed agli errori commessi talvolta nell'uso del territorio limitatamente agli impianti di grande taglia e dimensioni).

La diffusione industriale del settore eolico per la produzione di energia elettrica avviene a partire dagli anni '80, le tecnologie si sono sviluppate in maniera esponenziale raggiungendo 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.).

Negli ultimi anni, grazie anche al forte impulso fornito dal settore degli impianti eolici *offshore*, le turbine eoliche sono diventate più grandi e più alte: i generatori sono cento volte più grandi di quelli utilizzati all'inizio dello sviluppo del settore. Nello stesso periodo, il diametro del rotore è cresciuto di otto 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.

Nel corso della sua evoluzione tecnologica, l'energia eolica si è prestata ad essere utilizzata anche da aerogeneratori di potenze e dimensioni molto ridotte rispetto alle attuali. Queste applicazioni sono divenute obsolete ed antieconomiche con lo sviluppo delle reti di distribuzione dell'energia elettrica e, per questo, sono state abbandonate intorno agli anni '50 (attualmente, negli Stati Uniti si contano ancora circa 30mila sistemi per il pompaggio dell'acqua tuttora funzionanti e risalenti alla prima metà del secolo scorso).

Aerogeneratori di questa taglia vengono definiti mini o micro eolici (a questa categoria, come si vedrà più avanti, si possono applicare differenti classificazioni) e, negli ultimi anni, hanno acquisito nuovamente un notevole interesse, sia da parte dei costruttori che dei potenziali fruitori.

La crescita del mercato eolico “domestico”, relativo cioè alle applicazioni per usi residenziali o per piccole aziende, è iniziata a partire dalla fine degli anni '90, grazie al forte impulso del settore degli impianti di media e grande taglia.

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 centinaia di milioni di persone vivono senza avere accesso all'energia elettrica e dove questa tecnologia può svolgere un ruolo chiave nel risolvere questo problema.

Le macchine micro e mini eoliche sono oggetto di studi e ricerche, in particolare all'estero, già da diversi anni e la loro tecnologia ha oggi raggiunto un livello di maturità tale da consentire la loro produzione e commercializzazione in serie, soprattutto nei paesi del Nord Europa e negli USA. Negli ultimi anni le tecnologie adottate per le turbine di piccola e piccolissima taglia hanno raggiunto ottimi livelli proprio grazie all'esperienza maturata nel settore delle turbine con potenze superiori. Il risultato principale dello sviluppo tecnologico è stato il notevole abbassamento del limite minimo di funzionamento degli aerogeneratori che possono iniziare a produrre energia anche con velocità del vento inferiori a 2 m/s.

Sono state sviluppate turbine sia ad asse orizzontale che verticale, 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 (si possono anche superare le 6.000 ore di funzionamento).

Queste macchine sono ormai tecnologicamente mature ed economicamente competitive per l'alimentazione di servizi in utenze isolate, con e senza accumulo. I generatori a bassissima potenza possono essere validamente impiegati per la ricarica di accumulatori che alimentano boe, segnali luminosi, impianti di telecomunicazione i quali, per la loro ubicazione, sono difficilmente alimentabili dalla rete.

Gli aerogeneratori sono particolarmente adatti all'alimentazione di piccole reti elettriche, sia da soli che ad integrazione dell'energia prodotta con altri sistemi, e possono interessare, quindi, comunità montane, piccole isole, aziende agricole medie e grandi, aree industriali o essere utilizzate, con le opportune tecnologie, anche per l'illuminazione stradale, sistemi di trasmissione di segnali radio o telecomunicazioni, impianti di dissalazione o altre applicazioni.

Le attività di ricerca e sviluppo sono attualmente concentrate sulla maggiore affidabilità e producibilità e sulla riduzione dei costi di costruzione e gestione per rendere queste macchine maggiormente competitive in sistemi connessi alla rete nei confronti delle altre tecnologie di produzione.

Seguendo lo spostamento del settore energetico da un sistema a rete centralizzata ad uno distribuito, i sistemi di piccola taglia (e le loro applicazioni ibride) possono giocare un ruolo sempre più importante, contribuendo anche, con il supporto delle tecnologie *smart grids*, alla stabilizzazione della rete elettrica.

In Italia l'industria è partita con un certo ritardo e lo stato dell'arte di questi impianti non ha ancora raggiunto la completa maturità tecnologica (in particolare per le macchine ad asse verticale) e molto può essere ancora fatto per produrre macchine sempre più efficienti ed affidabili. Inoltre, per permettere di conseguire in tempi brevi risultati non inferiori a quelli

raggiunti all'estero, si è reso e si rende tuttora necessario l'intervento pubblico con meccanismi di supporto.

Anche dal punto di vista economico, i sistemi minieolici devono ancora raggiungere la piena competitività: i costi per kW installato variano da 2.000 a 6.000 euro per le turbine ad asse orizzontale e ad oltre 15.000 euro per quelle ad asse verticale contro, ad esempio, i 1.500 euro per kW installato delle turbine di grande taglia.

Nel nostro Paese, la legge 24 dicembre 2007, n. 244 (Finanziaria 2008) ed il successivo decreto ministeriale del 18 dicembre 2008 hanno introdotto incentivazioni specifiche per le fonti rinnovabili di bassa potenza (tranne la fonte solare che è oggetto di un regime d'incentivazione denominato "Conto Energia"). A seguito di queste nuove misure, i titolari degli impianti eolici di potenza fra 1 kW e 200 kW potevano scegliere, in alternativa al tradizionale meccanismo basato sui Certificati Verdi, la tariffa omnicomprensiva di 300 €/MWh per tutta, e soltanto, l'energia immessa in rete e per un periodo di quindici anni oppure la stipula di contratti di scambio sul posto tra energia prodotta e consumata (in questo caso si poteva anche beneficiare di Certificati Verdi per l'energia prodotta). Inoltre, per impianti eolici al di sotto dei 60 kW sono state introdotte anche agevolazioni e semplificazioni nell'iter autorizzativo. Queste politiche hanno di fatto suscitato un immediato interesse sul settore, in particolare dal lato dell'offerta.

Di recente, con il decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28 e con il decreto ministeriale 6 luglio 2012, che verranno esaminati più nel dettaglio nei Capitoli 7 ed 8, sono state introdotte alcune significative modifiche sia alle procedure autorizzative che al sistema incentivante a favore degli impianti a fonti rinnovabili.

Nel presente volume, per motivi di uniformità con il sistema italiano, verranno trattati gli impianti con potenza nominale non superiore ai 200 kW.

1.2. Cenni storici

I mulini a vento sono utilizzati da almeno 3.000 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 1.100-1.200°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. (*vedi figura 1.1.*).

Uno dei primi impianti eolici conosciuti è la macchina del matematico greco Erone 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 ciò, 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.

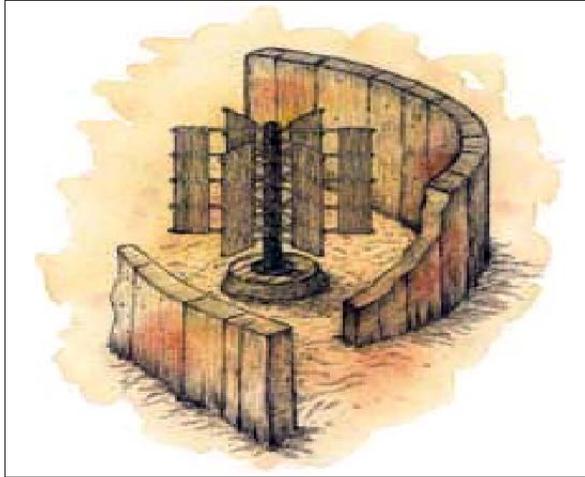


Figura 1.1. *Uno dei primi riferimenti ad un mulino a vento ad asse verticale* (fonte: Wikipedia)

Sebbene vi siano diverse fonti che parlano di mulini a vento, bisogna aspettare il XII secolo 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 nel 1185 a Weedley nello Yorkshire.

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 idraulici a causa del possibile congelamento dell'acqua.

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).

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 con un rotore in legno da 17 m di diametro e dove, nel 1908, risultano installati 72 generatori eolici di potenza variabile da 5 a 25 kW. 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.



Figura 1.2. *Isola di Muthia (Marsala): Mulino a vento*
(fonte: Autore)

In Danimarca, nei primi anni del 1900 sono installate circa trentamila 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 pari a circa il 3% dell'energia elettrica prodotta nel paese.

Nel periodo di picco tra il 1930 ed il 1940 si contano oltre sei 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).

Negli anni '50 e '60, a parte alcune eccezioni presenti sia negli Stati Uniti che in Europa, lo sviluppo delle reti di distribuzione dell'energia elettrica sposta progressivamente l'interesse verso aerogeneratori di taglia sempre maggiore, che ricevono ulteriore 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 sino all'affermazione dell'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 1.700 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 Geronio, Tehachapi ed Altamont 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.

1.3. Definizioni, tipologia e classificazione degli aerogeneratori di piccola taglia

Cosa è il piccolo eolico e qual è il confine tra le turbine di piccola taglia e quelle di taglia superiore?

La definizione di piccolo eolico è certamente una delle principali questioni da dirimere per provare a giungere ad una soluzione condivisa. Questo perché la parola piccolo nell'industria eolica ha un significato vago ed in continua evoluzione. La mancanza di una definizione univoca ha portato a definire piccole sia le turbine con capacità di pochi watt che quelle sino a 300 chilowatt di potenza.

In principio, il termine piccolo eolico indicava tutti quei sistemi eolici in grado di produrre piccole quantità di energia elettrica per applicazioni tipicamente domestiche.

Considerato, ad esempio, che un televisore LED da 40 pollici attualmente sul mercato consuma istantaneamente 200 W, è allora possibile alimentare questo apparecchio, con il supporto di una batteria e per almeno 4 ore al giorno, con una turbina da 180 W che, pertanto, si può definire di piccola taglia.

Se però, al contempo, si considera che una tipica famiglia statunitense consuma in media 11.000 kWh all'anno, sotto le stesse ipotesi, per coprire la domanda di energia elettrica sarebbe necessario installare una turbina di 10 kW di potenza, anch'essa, quindi, piccola. Considerando i valori di consumo medio di una famiglia europea e di una cinese, la potenza richiesta scenderebbe rispettivamente a 4 e 1 kW.

Ipotizzando allora che si possa definire come eolico di piccola taglia un sistema capace di fornire la richiesta di energia elettrica di una abitazione monofamiliare, è necessario determinare se anche turbine di potenza superiore possano avere identica definizione.

In generale, esistono diverse classificazioni delle turbine eoliche in base, ad esempio, alle loro caratteristiche costruttive, alla potenza, alla taglia o per soluzione impiantistica.

La norma IEC 61400-2 (2006) "*Wind Turbines – Part 2: Design Requirements of Small Wind Turbines*" classifica le turbine in base alla potenza nominale ed all'area spazzata dal rotore (vedi tabella 1.1.).

Secondo quanto indicato, si definisce quale aerogeneratore di piccola taglia o mini eolico quello con potenza nominale inferiore a 50 kW ed area spazzata dal rotore non superiore a 200 m². Questa definizione non è però applicata uniformemente. Ad esempio, anche per l'interesse delle varie parti, in Danimarca sono classificati come mini eolici gli aerogeneratori di potenza inferiore a 25 kW, in Spagna e Germania questo valore è pari a 100 kW, in Gran Bretagna è pari a 50 kW, negli Stati Uniti i diversi Stati hanno fissato valori variabili da 50 a 200 kW. Infine in Canada la potenza massima perché un aerogeneratore sia mini eolico è pari a 300 kW.

Potenza nominale [kW]	Area spazzata dal rotore [m ²]	Sottocategoria
$P < 1 \text{ kW}$	$A < 4.9 \text{ m}^2$	Pico eolico
$1 \text{ kW} < P < 7 \text{ kW}$	$A < 40 \text{ m}^2$	Micro eolico
$7 \text{ kW} < P < 50 \text{ kW}$	$A < 200 \text{ m}^2$	Piccolo (o Mini) eolico
$50 \text{ kW} < P < 100 \text{ kW}$	$A < 300 \text{ m}^2$	Non definita

Tabella 1.1. *Classificazione dei sistemi minieolici secondo le IEC 61400-2 (2006)*

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



Figura 1.3. *Esempi di turbine di piccola taglia ad asse orizzontale (fonte: varie)*



Figura 1.4. *Esempi di turbine di piccola taglia ad asse verticale (fonte: varie)*

Sulla base delle soluzioni impiantistiche vi sono due classificazioni principali.

La prima distingue i sistemi eolici in:

- sistemi *on grid* o *grid connected*, sono tutti gli impianti eolici connessi ad una rete di distribuzione dell'energia elettrica;

- sistemi *off grid* o *stand alone*, sono tutti gli impianti connessi a piccole reti di distribuzione isolate o non connessi ad alcuna rete di distribuzione ed a servizio di utenze isolate.

Nella prima categoria rientrano turbine eoliche di qualunque classe di taglia e/o di potenza; mentre la seconda è caratterizzata dall'impiego di turbine di potenza inferiore al MW e che possono essere inserite in sistemi ibridi (integrazione tra sistemi di generazione di energia elettrica a fonti rinnovabili e non rinnovabili) quando collegate a piccole reti di distribuzione o avere la necessità di sistemi di accumulo (batterie) dell'energia prodotta.

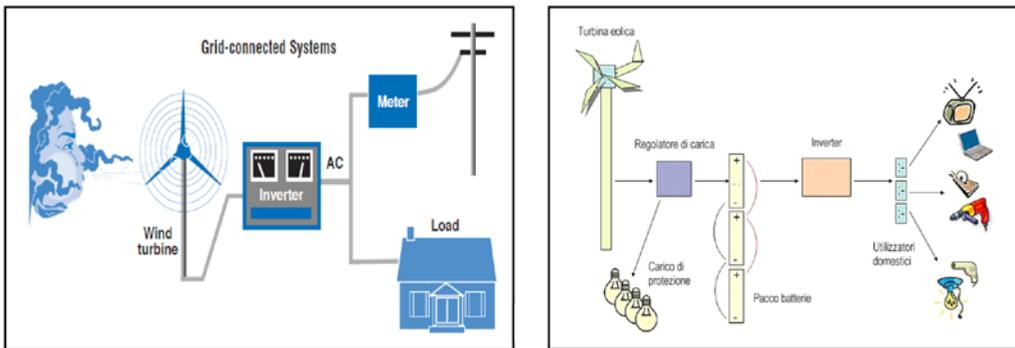


Figura 1.5. Schema tipo di sistemi *grid connected* (a sinistra) e *stand alone* (a destra)
(fonte: varie)

La seconda distingue gli impianti eolici in:

- impianti *on shore*, cioè impianti su terra ferma;
- impianti *offshore*, cioè impianti in mare.

Altre classificazioni possono considerare alcune caratteristiche costruttive dell'impianto eolico, come la presenza di un generatore sincrono od asincrono, o essere definite in base alle soluzioni di sicurezza e controllo adottate sulle componenti della turbina.

1.4. La diffusione del minieolico nel mondo

La situazione attuale

Secondo quanto riportato nello *Small Wind World Report 2012* (a cura della *WWEA – World Wind Energy Association*) gli aerogeneratori mini eolici installati in tutto il mondo hanno raggiunto alla fine del 2010 le 656.084 unità, per un incremento del 26% rispetto alle 521.102 del 2009 (vedi figura 1.6.).

La potenza complessiva installata a livello mondiale, sempre alla fine del 2010, è pari circa 443,3 MW, un valore di mercato trascurabile se confrontato con i circa 250 GW di potenza installata riferibile agli impianti di grande taglia, ma comunque indicativo delle enormi potenzialità di sviluppo del settore minieolico nell'ultimo decennio, per una generazione di energia elettrica di poco superiore a 382 GWh/anno (vedi figura 1.7.).

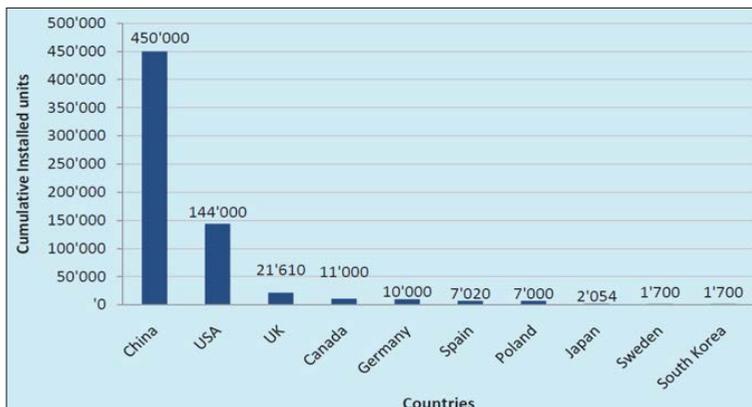


Figura 1.6. Numero totale di turbine installate a livello mondiale al termine del 2010

(fonte: *Small Wind World Report 2012, World Wind Energy Association*)

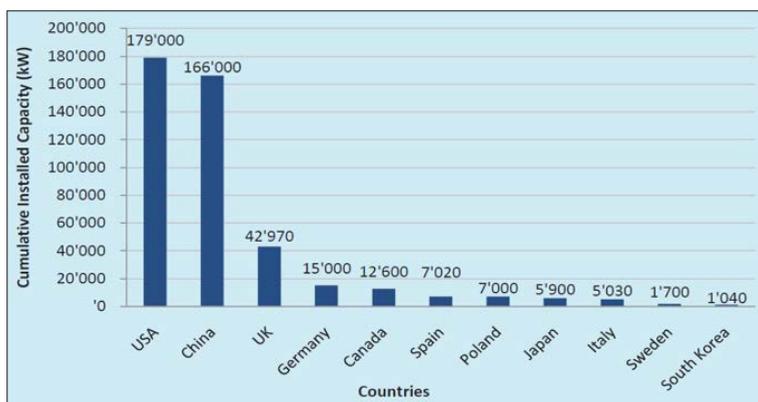


Figura 1.7. Potenza complessiva installata in kW a livello mondiale al termine del 2010

(fonte: *Small Wind World Report 2012, World Wind Energy Association*)

Le nazioni principali sono la Cina, con 450.000 unità (anche se si stima che, di queste, almeno 200.000 siano state rimosse perché risalenti ai primi anni '80) e 166 MW di potenza installata, e gli Stati Uniti, con 144.000 unità e 179 MW di potenza installata, seguite a distanza dagli altri mercati, vale a dire Regno Unito, Canada, Germania, Spagna, Polonia e Giappone. In Cina la potenza unitaria degli aerogeneratori è pari a 0,37 kW, negli Stati Uniti ed in Gran Bretagna questo valore è pari rispettivamente a 1,24 kW e 2,0 kW.

L'Italia, al 2010, non è presente tra le prime dieci nazioni in termini di unità installate mentre è al nono posto per quanto riguarda la potenza installata con 5 MW. Tale situazione è indice di taglie unitarie più elevate rispetto a quelle degli altri paesi e tipiche di applicazioni industriali piuttosto che domestiche e per autoproduzione.

Nel documento di Legambiente “La forza del vento – L’eolico per un sistema energetico italiano sempre più efficiente, pulito e distribuito”, presentato in occasione del *Global Wind Day 2012*, è riportata la situazione nel nostro Paese alla metà del 2012. Complessivamente sono 246 i comuni in cui sono presenti impianti di piccola e piccolissima taglia e 13,3 i MW di potenza complessiva installata. Altro dato interessante (*figura 1.8.*) è una distribuzione praticamente uniforme in tutto il territorio nazionale. La Puglia con 53 comuni e 4,7 MW è la regione più interessata dalle installazioni di questi impianti, seguita dalla Toscana con 19 comuni e una potenza complessiva di 640 kW e dalla Campania con 18 comuni e 3,4 MW. È significativo inoltre sottolineare che grazie ai 13,3 MW censiti viene prodotta energia elettrica pari al fabbisogno di 9.500 famiglie.

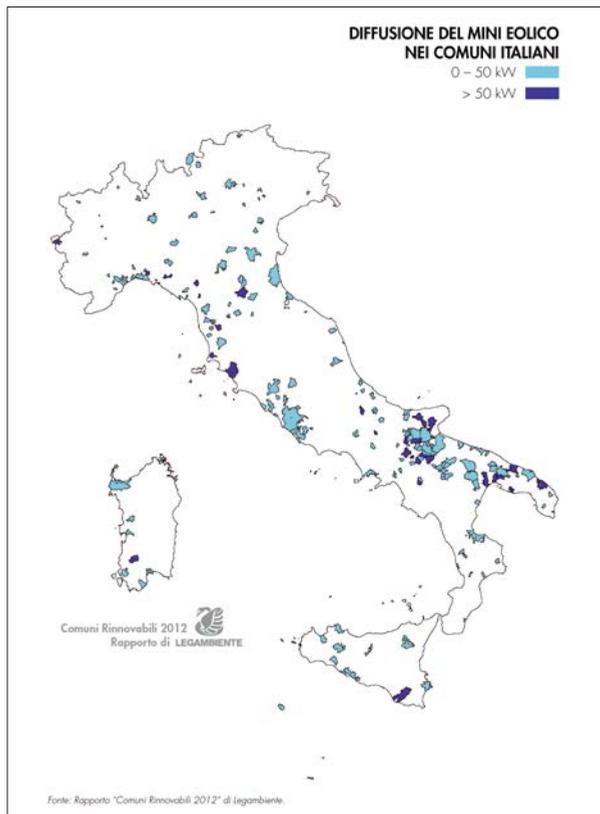


Figura 1.8. *Diffusione del mini e micro eolico nei comuni italiani alla metà del 2012*
(fonte: Legambiente, 2012)

Il mini eolico trova sempre più spazio nei sistemi *on grid*, nell’ultimo decennio gli aerogeneratori con taglia compresa tra 10 kW e 100 kW hanno guidato la domanda del mercato, in particolare nei paesi occidentali. Ad esempio, nel 2009 sono stati installati 34,4 MW di impianti *on grid* rispetto ai 7,6 MW dei sistemi *off grid*, per un valore pari all’86% del mercato complessivo.

Nonostante l’incremento di domanda registrato nei paesi occidentali, il mercato del mini eolico rimane comunque debole e fortemente dipendente dagli incentivi dei pochi singoli governi che sono intervenuti con politiche di supporto o con programmi di aiuti economici e/o fiscali.