

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA E MECCATRONICA

TESI DI LAUREA TRIENNALE

# TECNOLOGIE E COMPONENTI DEGLI AEROGENERATORI

*Relatori:* Prof. Mirto Mozzon Dott.ssa Alessandra Bartolozzi

> *Laureando:* Alessio Trevisan 1027302-IMC

ANNO ACCADEMICO: 2014-15

In questo elaborato verranno trattate tutte le principali componenti che vanno a comporre lo schema classico di un aerogeneratore, analizzandone il principio di funzionamento, le tecnologie attuali applicate così come le possibili migliorie ed innovazioni future che potranno interessare il settore eolico nei prossimi decenni.

Il contenuto dell'elaborato è frutto di un attento lavoro di ricerca ed elaborazione di informazioni tratte dai principali documenti cartacei e non (internet) reperibili nel contesto accademico ed industriale.

Tutti i vari riferimenti sono reperibili alla voce Bibliografia alla fine dell'elaborato.

# RINGRAZIAMENTI

Ringrazio tutta la mia famiglia ed i miei amici per avermi sempre sostenuto ed aiutato negli studi.

# INDICE

1	INTRODUZIONE 1			
2	CENNI DI AERODINAMICA 3			
	2.1	Le forze aerodinamiche 3		
	2.2	La pala dell'aerogeneratore 4		
	2.3	La legge di Betz 5		
3	TEC	NOLOGIA DEGLI AEROGENERATORI 7		
	3.1	Introduzione 7		
	3.2	3.2 Tecnologia e componenti 7		
		3.2.1 Configurazione generale di un aerogeneratore	7	
		3.2.2 Il rotore 9		
		3.2.3 Il sistema di generazione 13		
		3.2.4 Sistema di controllo dell'imbardata 18		
		3.2.5 La torre di sostegno 19		
		3.2.6 I sistemi di controllo 20		
		3.2.7 I sistemi di protezione 21		
		3.2.8 Dispositivi ausiliari 21		
4	SVI	LUPPI TECNOLOGICI FUTURI 23		
	4.1	Introduzione 23		
	4.2	Il rotore e le pale 24		
	4.3	La torre di sostegno 24		
	4.4	4.4 Il sistema di generazione 24		
	4.5	I sistemi di controllo 27		
	4.6	Innovazioni future 27		
Cc	nclu	sioni 31		
		1.		
Aŗ	openo	dice 33		
Α	APF	PENDICE 35		

BIBLIOGRAFIA 37

# ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1	Potenza eolica installata in Europa nel 2010. 1
Figura 2	Effetto delle forze nei casi di incidenza positiva
0	e negativa. 3
Figura 3	Rappresentazione delle grandezze vettoriali di
	pala al vento. 5
Figura 4	Portata del vento attraverso le pale dell'aero-
	generatore. 6
Figura 5	Schema generale dei principali componenti di
	un aerogeneratore. 8
Figura 6	Andamento della potenza in funzione della ve-
	locità. 9
Figura 7	Tipologie di mozzo. 10
Figura 8	Andamento delle dimensioni del diametro del
	rotore. 11
Figura 9	Proiezione sezioni della pala. 12
Figura 10	Rotore a tre pale. 12
Figura 11	Rotore a due pale. 12
Figura 12	Rotore ad una pala. 12
Figura 13	Riduttore epicicloidale. 14
Figura 14	Esempio di freno a disco a doppia pinza. 15
Figura 15	Esempio generatore asincrono. 17
Figura 16	Esempio generatore sincrono. 17
Figura 17	Schema controllo d'imbardata ( <i>yaw system</i> ). 18
Figura 18	Esempi di torre a traliccio e tubolare. 19
Figura 19	Esempio di torre a tiranti. 20
Figura 20	Esempio di anemometro per l'orientamento mon-
	tato su turbina eolica. 22
Figura 21	Settori di ricerca e sviluppo. 23
Figura 22	Particolare della navicella della Enercon E53. 25
Figura 23	Particolari della navicella WWD-1. 26
Figura 24	Navicella della turbina 2.5 MW CLipper Liber-
	ty. 26
Figura 25	Prototipo Ewicon. 27
Figura 26	Principio di funzionamento di una Airborne
	Wind Turbine. 28
Figura 27	Esempio di Kite Gen wind farm. 29
Figura 28	Prototipo del MARS (Magenn Air Rotor Sy-
	stem). 29

#### INTRODUZIONE

Secondo le ultime indagini, vi sono oltre 4500 aerogeneratori installati sul suolo italiano per una potenza complessiva superione ai 5000MW in continua crescita per potenza installata e per numero di addetti, con previsioni di 16200 MW installati entro l'anno 2020, pari a circa il 7% del consumo interno previsto per quell'epoca in Italia [14].



Figura 1: Potenza eolica installata in Europa nel 2010. (Fonte: Wikipedia [21])

Il successo di questa forma di sfruttamento e generazione di energia è fondamentalmente dovuto alla larga disponibilità di tecnologie e prodotti affidabili, alla convenienza economica, inclusa la possibilità di poter produrre indipendentemente da crisi economiche e politiche e dal senso etico che suscitano tutte le fonti rinnovabili per il rispetto ambientale [14].

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. Non ultimi vi sono piccoli impianti di produzione denominati mini e micro eolici, nel passato relegati a funzioni di alimentazione di soccorso per abitazioni isolate, che oggi presentano taglie fino a 200 kW e possono soddisfare molte utenze domestiche e piccole industriali, godendo di tutti gli incentivi vigenti [14].

#### 2 INTRODUZIONE

Come per tutti gli investimenti basati sullo sfruttamento di fonti rinnovabili, la produzione di energia è dipendente dalla disponibilità della fonte energetica, il vento; pertanto le caratteristiche e l'ubicazione geografica dell'impianto determinano la continuità della produzione [14]. Poichè le centrali eoliche costituiscono dei veri e propri impianti industriali, la loro collocazione in aree pregevoli dal punto di vista ambientale risulta del tutto inconciliabile con la vocazione spiccatamente naturalistica di questi territori. Inoltre venendo, nella maggior parte dei casi, realizzate in aree isolate, è spesso necessario costruire anche le infrastrutture di servizio che ne aumentano ulteriormente l'impatto sull'ambiente [14].

Tuttavia è bene sottolineare che l'utilizzo dell'energia eolica consente d'altro canto di evitare l'immissione nell'atmosfera delle sostanze inquinanti e dei gas serra prodotti dalle centrali di generazione convenzionali. L'eolico rappresenta inoltre una fonte di energia rinnovabile ad emissioni zero (in operazione) ed impiega un combustibile gratuito [14].

Da ciò consegue che, per poter estrarre efficacemente l'energia dal vento, bisogna aver a disposizione delle macchine adatte allo scopo e generalmente conosciute con il nome di aerogeneratori. Con questo lavoro si vuole dare una visione completa dell'aerogeneratore nelle sue parti principali e nel loro funzionamento, esplicitando le tecnologie applicate ed i possibili sviluppi futuri che potranno portare migliorie nel settore, conseguenza di una riduzione dei costi ed un miglioramento dell'efficienza delle turbine eoliche.

Di seguito verrà elencato, in breve, il contenuto dei vari capitoli di codesta trattazione.

- **Cenni di Aerodinamica** : basi di aerodinamica legate al principio di funzionamento di una pala eolica.
- **Tecnologia degli Aerogeneratori** : analisi delle componenti di un aerogeneratore, del loro funzionamento e delle tecnologie applicate.
- **Sviluppi Tecnologici Futuri** : possibili migliorie future applicate alle varie componenti dell'aerogeneratore e sistemi innovativi per la produzione di energia eolica.

# 2

#### CENNI DI AERODINAMICA

#### 2.1 LE FORZE AERODINAMICHE

Un aerogeneratore 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 che scorrono percorrendo una traiettoria che viene definita *linea di corrente;* la velocità della particella è sempre tangente a tale linea.

Il corpo investito dalle particelle oppone una forza contraria, detta *resistenza*. In funzione della posizione assunta nei confrontii della vena fluida delle particelle di vento, il corpo può divenire *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 diventa portante) oppure negativa (il corpo diviene deportante) [14].



Figura 2: Effetto delle forze nei casi di incidenza positiva e negativa. (Fonte: Autore)

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 il 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 [14].

Se si determina un aumento dell'angolo di incidenza, si nota un'esaltazione della capacità di sostentamento, fino a una condizione oltre la quale queste improvvisamente crollano. Tale fenomeno prende il nome di *stallo* [14].

In funzione delle applicazione si sviluppa il profilo idoneo più efficiente che sarà dato comunque dal rapporto tra portanza e resistenza [14].

#### 2.2 LA PALA DELL'AEROGENERATORE

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 [14].

Poichè 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 [14].

La caratteristica principale di una pala per aerogeneratore è quella di avere angolo di calettamento variabile lungo la sua lunghezza (*sver-golamento*), che le consente di mantenere un angolo di attacco ottimale con il vento e di lavorare nell'aria con incidenza costante. Un'altra peculiarità è costituita dal fatto che la velocità dell'aria cambia nelle varie sezioni della pala, aumentando dal mozzo verso l'estremità: questo fatto 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. In figura 2 si noti come il vento incida sulla faccia ventrale della pala, con la risultante che porta alla velocità della pala, mentre la portanza è la depressione che si genera sull'altra faccia (dorso) [14].

Conseguentemente, la pala produce lavoro grazie ad un salto di energia cinetica del flusso del vento e ad 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:

- il rendimento massimo si ottiene con un angolo di incidenza di riferimento pari a 45°
- le dimensioni delle pale non devono eccedere nel rapporto con il peso, altrimenti, per effetto giroscopico, il palo potrebbe essere divelto dalla sua base
- 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



Figura 3: Rappresentazione delle grandezze vettoriali di pala al vento.

che causerebbero una forza in contrapposizione che andrebbe a sommarsi alla resistenza aerodinamica [14]

#### 2.3 LA LEGGE DI BETZ

Il fisico tedesco Albert Betz, riprendendo i modelli di simulazione fluidodinamici di tre scienziati britannici (Greenhill, Rankine e Froude), sviluppò 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 ( $S_1$  e  $S_2$ ) occupata dalla massa d'aria, corrispondente alla quantità di energia cinetica che muove il rotore.

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

Attraverso una dimostrazione matematica e considerando la densità dell'aria standard, si arriva all'espressione della formula di Betz, in cui:

$$P_{max} = 0,363 \cdot S \cdot V^3$$

dove

 $P_{max}$  = potenza massima S = diametro delle pale



Figura 4: Portata del vento attraverso le pale dell'aerogeneratore.

V = velocità del vento a monte

La potenza è espressa in W, S in m, V in m/s.

Le conclusioni sono confermate anche impostando i calcoli mediante applicazione dei teoremi sviluppati nello studio dei fluidi dallo scienziato francese Bernoulli. Comunque, Betz dimostra che la conversione dell'energia cinetica contenuta nel vento per mezzo di un aerogeneratore cresce all'aumentare dell'area spazzata dalle pale e quindi all'aumentare della loro lunghezza, della velocità del vento e della densità dell'aria fino al limite fisico del coefficiente di prestazione (*Cp*) di 59,3% (0,593) [14].

#### 3.1 INTRODUZIONE

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.

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 perchè 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)[17];
- lavorare in remoto, con basse emissioni acustiche ed elevato rendimento aerodinamico [17];
- fare fronte ad una elevata variabilità delle caratteristiche del vento [17];
- competere economicamente con le altre fonti di energia [17];
- richiedere interventi limitati di manutenzione [17].

#### 3.2 TECNOLOGIA E COMPONENTI

## 3.2.1 Configurazione generale di un aerogeneratore

Fermo restando che sono possibili, e talora disponibili sul mercato, configurazioni diverse, quella descritta nel seguito è la configurazione più generale di un aerogeneratore. Le pale (*blades*) della macchina sono fissate su un mozzo (*hub*) e nell'insieme costituiscono il rotore (*rotor*), il mozzo a sua volta è collegato ad un primo albero (*low speed* o *main shaft*), o albero lento, che ruota alla stessa velocità angolare del rotore. L'albero lento è collegato ad un moltiplicatore di giri (*gearbox*), da cui si diparte un albero veloce (*high speed* o *drive shaft*) che ruota con velocità angolare data da quella dell'albero lento per il rapporto di moltiplicazione della gearbox. Sull'albero veloce è posto un freno (*brake*) a valle del quale c'è il generatore elettrico (*generator*) da cui si dipartono i cavi elettrici di potenza [17].

Nella maggior parte delle macchine odierne, tutti i componenti menzionati sono ubicati in una cabina detta navicella (*nacelle*) la quale, a sua volta, è posizionata su un supporto cuscinetto (*yaw ring*) 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 (*power regulation*) che può essere eseguito comandando meccanicamente, elettronicamente ed idraulicamente la rotazione delle pale intorno al loro asse principale (sistema di regolazione del passo, *pitch regulation*), 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 tale da creare turbolenza aerodinamica quando la velocità del vento supera il limite massimo (*stall regulation*); il controllo dell'orientamento della navicella, detto controllo dell'imbardata (*yaw control*), che serve a mantenere la macchina orientata nella direzione del vento, può anche essere utilizzato, in linea di principio, per il controllo della potenza. L'intera navicella è posizionata su una torre (*tower*) che può essere a traliccio o conica tubolare [17].



Figura 5: Schema generale dei principali componenti di un aerogeneratore. (Fonte: Wikipedia [20])

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 power*) ad una prefissata velocità del vento. La velocità del vento a cui viene raggiunta è detta appunto velocità nominale (*rated wind speed*) [17].

#### 3.2.2 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 tale da mandare il stallo il rotore 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, 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 [17].





Il moderno sistema di controllo del passo degli aerogeneratori di media e grande taglia permette di ruotare singolarmente le pale intorno al loro asse principale; questo sistema, in combinazione con i generatori a velocità variabile, ha portato ad un significativo miglioramento del funzionamento e del rendimento degli aerogeneratori. Inoltre, il controllo del passo è il sistema di sicurezza principale poiché uno qualsiasi dei tre attuatori è capace indipendentemente di stoppare la macchina in caso di emergenza.

Il Rotore (*rotor*), quindi, può essere suddiviso in due parti principali:

- il mozzo (*hub*)
- le pale (blades)

**IL MOZZO** Il mozzo è il componente che trasmette la potenza estratta dal vento all'albero principale connettendo le pale a quest'ultimo; inoltre include il sistema di controllo del passo.

I mozzi sono generalmente fabbricati di acciaio o ghisa e protetti esternamente da un guscio esterno. Vi sono tre tipologie principali di mozzo:

- rigido (*rigid*)
- oscillante (teetering)
- per pale incernierate (*hinged*)



Figura 7: Tipologie di mozzo. (Fonte: Gammaenergy [9])

Il mozzo rigido è progettato in maniera tale da mantenere tutte le maggiori parti del rotore in posizione fissa rispetto all'albero principale. Il passo delle pale può essere variato, ma non sono permessi altri tipi di movimenti alle pale [15].

I mozzi oscillanti sono utilizzati per tutte le turbine eoliche con rotori a due pale. Il loro scopo è quello di ridurre lo sbilanciamento aerodinamico trasmesso all'albero e tipico dei rotori a due pale; così il rotore è libero di oscillare di qualche grado rispetto alla direzione perpendicolare di rotazione dell'asse principale [15].

Inoltre, i mozzi oscillanti sono solitamente accoppiati alle turbine con angolo di passo fisso, ma non possono essere montati in quelle con sistema a passo variabile. Infatti progettare un sistema a passo variabile per questa tipologia di mozzo risulterebbe troppo complessa ed indubbiamente meno affidabile rispetto a delle soluzioni con mozzo rigido [15].

Infine, i mozzi per pale incernierate possono essere visti come una sorta di mezza via tra i mozzi rigidi e quelli oscillanti e, in poche parole, sono mozzi rigidi con delle cerniere per le pale. Sono usati soprattutto nelle turbine funzionanti sottovento per cercare di ridurre i carichi eccessivi in occasione di forti venti [15].

**LE PALE** La figura 8 mostra l'andamento del diametro delle turbine negli ultimi trenta anni: dai circa 15 m del 1985 fino ai 126 m del 2005 e agli ipotizzabili 180 m e oltre per turbine utilizzate in futuri impianti off-shore [17].



Figura 8: Andamento delle dimensioni del diametro del rotore. (Fonte: Gammaenergy [9])

Naturalmente, le pale sono componenti che interagiscono con il vento e sono progettate con un profilo alare tale da massimizzare l'efficienza aerodinamica.

La figura 9 mostra la forma tipica di una pala e le sue sezioni trasversali; alla fine del profilo alare l'angolo tra la radice e la punta della pala è di circa  $25^{\circ}$  [15].

La sezione trasversale della pala è piuttosto larga per garantire un'elevata rigidezza, necessaria a sostenere i carichi meccanici variabili durante il normale funzionamento, il cui contributo va a determinare la frattura e lo stiramento della pala. Infatti, il vento esercita una forza non costante dovuta sia alle fluttuazioni per via della turbolenza sia per il fatto che la velocità del vento varia con l'altitudine [15].

Inoltre, durante la rotazione, quando la pala si trova alla massima altezza è sottoposta ad un vento più forte rispetto all'intensità del vento nella posizione più bassa, motivo per cui nascono ulteriori fluttuazioni del carico ad ogni rotazione della pala [15].



Figura 9: Proiezione sezioni della pala. (Fonte: Gammaenergy [9])

Infine, la forza centrifuga generata dalla rotazione esercita trazione nelle differenti sezioni della pala e la sua massa crea un momento flettente alla radice della pala che si alterna ad ogni rotazione [15].



 Figura 10: Rotore a tre Figura 11: Rotore a due Figura 12: Rotore ad pale.
 Figura 12: Rotore ad una pala.

 (Fonte: Tecnologiaericerca.com [5])
 (Fonte: Enersolar S.r.l. [2])
 (Fonte: Elettrosmog.com [1])

Le pale sono costruite con materiali leggeri, come fibre plastiche rinforzate, le quali hanno buone proprietà di resistenza alla frattura e allo strappo. Generalmente si utilizza la fibra di vetro o alluminio per le pale di piccole o medie dimensioni; invece, per le pale più grandi si utilizza anche la fibra di carbonio nelle parti soggette ai carichi maggiori. A questo proposito, sebbene le fibre di carbonio siano dieci volte più costose delle fibre di vetro, l'utilizzo di pale più leggere, ma allo stesso modo più resistenti, riduce i carichi ai quali è sottoposta l'intera struttura di un aerogeneratore e, quindi, i costi totali di produzione [15].

Solitamente le fibre sono incorporate in una matrice di poliestere, resina epossidica o vinilestere che vanno a costituire due gusci tenuti insieme e rinforzati da una matrice interna [15]. La superficie esterna della pala è coperta con uno strato di colore che previene l'invecchiamento dei materiali compositi dovuto alle radiazioni ultraviolette [15].

Inoltre, tenendo conto della tecnologia utilizzata dal costruttore, le pale possono essere equipaggiate con elementi addizionali, come controllori di stallo per la stabilizzazione del flusso d'aria, generatori di vortice per aumentare la portanza o dispositivi per le estremità delle pale capaci di ridurre il rumore e, in parte, le perdite di portanza [15].

Poiché la maggior causa di guasto è rappresentata dai fulmini, di solito vengono installati dei conduttori, sia sulla superficie come all'interno della pala, che portano le eventuali scariche a terra senza danneggiare la pala [15].

Comunque, nonostante gli importanti risultati raggiunti nella progettazione e realizzazione delle pale, vi sono ancora diversi miglioramenti possibili soprattutto per quanto riguarda il controllo dinamico dei carichi, l'aerodinamica e la riduzione dei costi di produzione delle pale [15].

#### 3.2.3 Il sistema di generazione

La generazione di energia elettrica da fonte eolica richiede un funzionamento dei sistemi elettrici differente 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 [17].

Il funzionamento del sistema di generazione a velocità variabile, 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. Vi sono molte possibili configurazioni basate sia sull'utilizzo di generatori sincroni o ad induzione [17].

Un sistema alternativo che, sebbene presenti alcuni inconvenienti,

si adatta meglio a lavorare a velocità variabili, è quello della trasmissione diretta, già utilizzato su alcune turbine in produzione [17].

L'inconveniente principale mostrato in passato dai sistemi di generazione tradizionale è quello di una relativa facilità di malfunzionamento. Attualmente è pratica standard quella di sottoporre i nuovi modelli dei moltiplicatori di giri ad una serie di test di funzionamento ed affidabilità prima della messa in produzione di serie. Allo stato attuale, però, essendo questi sistemi di recente installazione, la loro affidabilità a lungo termine non è ancora completamente provata e molto vi sarà da lavorare in questa direzione. Vie è anche un vasto consenso sul fatto che la tecnologia dei sistemi i generazione dovrebbe migliorare in maniera significativa nei prossimi anni in maniera da ridurre pesi e costi [17].

Quindi, riepilogando, il sistema di generazione può essere suddiviso in:

- gruppo di trasmissione (albero, cambio, freni)
- generatore elettrico
- trasformatore

**IL CAMBIO** La maggior parte delle trasmissioni include un cambio ad uno o più rapporti tra il rotore, il quale estrae l'energia cinetica dal vento e la converte in energia meccanica di rotazione, e il generatore elettrico, che converte l'energia meccanica disponibile in energia elettrica.



Figura 13: Riduttore epicicloidale. (Fonte: Gammaenergy [9])

Il cambio ha lo scopo di aumentare la velocità del rotore per adattarla ai valori richiesti dai generatori convenzionali ( in alcune turbine il rapporto di riduzione del cambio può superare valori come 1:100 ) e consiste in uno o più stadi di riduttori epicicloidali o paralleli.

Negli ultimi anni, lo sviluppo di alternatori con convertitori di migliore qualità ha permesso lo sviluppo e la realizzazione di alcuni tipi di turbine senza il cambio. Infatti, la gearbox è fonte di rumore ed è anche uno degli elementi della turbina che richiedono molta manutenzione; oltre a ciò può anche causare perdite ed inefficienza alla turbina stessa [15].

Il vantaggio principale nel suo utilizzo è la semplificazione delle parti meccaniche che compongono la turbina e la conseguente diminuzione complessiva del peso della carlinga [15].

**I FRENI** Quasi tutte le turbine eoliche impiegano dei freni montati sulla trasmissione, in aiuto al freno aerodinamico. In molti casi, i freni meccanici possono fermare il rotore in condizioni di meteo avverso ed, inoltre, possono essere utilizzati come freni di stazionamento per tenere fermo il rotore quando la turbina non è operativa [15].

Vi sono due tipologie di freno meccanico di uso comune:

- freni a disco
- freni a frizione

I **freni a disco** operano in maniera similare a quelli montati sulle autovetture: un disco metallico è fissato all'albero da frenare. Durante la frenata viene attivata idraulicamente una pinza (*caliper*) che spinge le pastiglie frenanti contro il disco così da creare una coppia che si oppone al moto dell'albero [15].



Figura 14: Esempio di freno a disco a doppia pinza. (Fonte: Gammaenergy [9])

I freni a frizione sono formati da almeno un disco di pressione ed un disco di frizione. L'attivazione di questo tipo di freno avviene tramite delle molle che applicano un'adeguata pressione; sono poi rilasciate tramite aria compressa o fluido idraulico [15]. I freni meccanici possono essere posizionati o sull'asse lento o su quello veloce dopo il cambio. Comunque, è importante notare che i freni montati sull'asse lento devono esercitare una coppia molto elevata mentre i freni sull'asse veloce vanno ad agire indirettamente sul cambio contribuendo alla sua usura. Oltre a ciò, nel caso vi fosse una rottura nel cambio, i freni montati sull'albero veloce non sarebbero in grado di frenare il rotore [15].

La qualità del materiale dei dischi freno per alberi veloci deve essere molto performante per via delle criticità che insorgono a causa delle elevate forze centrifughe generate dalla rotazione [15].

I freni che vengono progettati per fermare un rotore devono poter esercitare una coppia frenante maggiore di quella che verrebbe ipoteticamente originata in condizioni di vento estremo, con un tempo di frenata minore di 5 secondi; inoltre devono funzionare anche in caso di blackout esterni e devono essere in grado di tenere il rotore completamente fermo (in condizioni di meteo ben definite) per almeno un'ora dopo l'attivazione del freno (CEI EN 61400-1) [15].

**IL GENERATORE ELETTRICO** Allo stato dell'arte attuale, vi sono essenzialmente due tipologie di generatori comunemente utilizzate:

- generatori elettrici asincroni;
- generatori elettrici sincroni.

Il generatore elettrico asincrono è essenzialmente un motore ad induzione trifase caratterizzato da una velocità di sincronismo che dipende dal numero di poli e dalla frequenza di rete [15].

Se la coppia meccanica che agisce sull'albero del rotore porta l'albero del generatore ad una velocità di rotazione maggiore rispetto a quella di sincronismo allora la macchina asincrona non lavorerà come motore ma come generatore, immettendo energia elettrica nella rete [15].

La differenza relativa tra la velocità sincrona del motore e l'effettiva velocità dei rotazione del rotore è chiamata scorrimento (*slip*), che diventa negativa quando la macchina opera come generatore. Nei generatori asincroni tradizionali lo scorrimento è all'incirca prossimo all' 1% quindi si considerano questi generatori come aventi velocità pressoché costante. Per quanto riguarda la corrente di magnetizzazione di statore, che genera il campo magnetico rotante al traferro, essa viene fornita direttamente dalla rete. Inoltre, il generatore consuma una certa quantità di potenza reattiva che dovrebbe essere fornita da un sistema di compensazione, come dei condensatori [15].

Quando una raffica di vento investe una turbina eolica equipaggiata con un generatore asincrono in cortocircuito, mentre la velocità di rotazione rimane costante, vi è un'improvvisa variazione della coppia ed una conseguente rapida variazione della potenza in uscita. Se la potenza di cortocircuito della rete alla quale è connesso il generatore è bassa, possono verificarsi delle fluttuazioni di tensione nei dispositivi elettrici connessi nelle vicinanze e queste fluttuazioni possono causare anche malfunzionamenti nei suddetti dispositivi. Infatti in tali occasioni è possibile notare una veloce variazione di luminosità delle lampade elettriche che testimoniano questo tipo di disturbo noto come "flicker" [15].

Anche per questa ragione, la ricerca è andata verso lo sviluppo dei sistemi variabili della velocità che danno la possibilità al rotore di ridurre la sua "coppia di spunto" e di lavorare nel punto di massima efficienza aerodinamica con un ampio range di velocità del vento. Sistemi di questo tipo realizzati con generatori ad induzione sono ottenute interponendo un convertitore di frequenza tra lo statore del generatore con rotore a gabbia di scoiattolo e la rete, oppure usando un generatore asincrono con rotore avvolto dove il rotore è alimentato da una corrente alternata indipendente fornita da un convertitore di frequenza: così, la velocità di sincronismo risulta essere in funzione della differenza tra la frequenza di rete e la frequenza della corrente di rotore e diventa possibile raggiungere una variazione di velocità anche del 30% [15].



(Fonte: Progettazione-Impianti-Elettrici.it [4])



Nel generatore elettrico sincrono, anche chiamato alternatore, il rotore è formato da un elettromagnete alimentato in corrente continua oppure da magneti permanenti [15].

La frequenza della tensione indotta nello statore (e, di conseguenza, delle correnti generate) è direttamente proporzionale alla velocità di rotazione del rotore [15].

Per permettere il funzionamento a velocità variabili, viene interposto un convertitore di frequenza tra il generatore e la rete; all'inizio trasforma la corrente a frequenza variabile (la quale è funzione della velocità di rotore e quindi del vento) che esce dal generatore in una corrente continua attraverso un raddrizzatore elettronico, per poi riconvertirla in alternata alla frequenza della rete grazie ad un inverter. Così facendo si svincola la frequenza della corrente generata dal valore della frequenza di rete, con la possibilità di far a meno della gearbox [15].

Grazie al generatore sincrono e al convertitore di frequenza, quando l'intensità del vento aumenta improvvisamente, il rotore è libero di accelerare per alcuni secondi: l'aumento di velocità fa si che venga accumulata energia cinetica nel rotore stesso permettendo, in ogni caso, di fornire in uscita potenza costante. Viceversa, quando il vento diminuisce, l'energia immagazzinata viene rilasciata nel rallentamento del rotore stesso [15].

#### 3.2.4 Sistema di controllo dell'imbardata

La carlinga è costruita in maniera tale da poter ruotare sulla cima della torre di sostegno grazie ad un controllo attivo d'imbardata che consiste in una serie di attuatori elettrici ed ingranaggi di riduzione (Fig. 17); così facendo il rotore viene sempre mantenuto in direzione trasversale rispetto al vento [15].

La direzione e la velocità del vento sono continuamente controllate da dei sensori posizionati sul tetto della carlinga.

Per la precisione, il rotore è generalmente posizionato in accordo con la direzione media del vento, calcolata su un periodo di 10 minuti dal sistema di controllo della turbina [15].



Figura 17: Schema controllo d'imbardata (*yaw system*). (Fonte: Gammaenergy [9])

Per le turbine ad asse orizzontale con rotore montato sottovento, non è necessario l'utilizzo di un sistema di controllo di rotta, poiché la turbina si orienta da sola seguendo autonomamente la direzione del vento [15].

Invece, per le turbine con rotore montato controvento possono avere una coda posteriore di orientamento (per turbine di piccola o media taglia) oppure un sistema di controllo attivo della rotta, come precedentemente descritto. Di conseguenza, la torre di supporto deve essere adeguatamente dimensionata anche per poter sopportare i carichi torsionali derivanti dall'uso del sistema di controllo della rotta [15].

#### 3.2.5 La torre di sostegno

Le tipologie di torre di sostegno sono le seguenti:

- torri tubolari in acciaio, solitamente divise in 2, 3 o 4 moduli;
- torri tubolari in calcestruzzo in opera, facilitano il trasporto e la costruzione in sito ma possono avere problemi per altezze elevate e per temperature rigide;
- torri tubolari in calcestruzzo prefabbricato;
- torri a traliccio in acciaio;
- torri ibride, realizzate unendo le precedenti tipologie;

Le configurazioni più diffuse per le turbine ad asse orizzontale sono quelle a traliccio (*truss tower*) e quelle tubolari (*tubolar tower*) in acciaio su fondazione in cemento armato [17].



Figura 18: Esempi di torre a traliccio e tubolare. (Fonte: Gammaenergy [9])

I sostegni per le turbine odierne sono per lo più di tipo tubolare poiché offrono molti vantaggi rispetto ai corrispettivi a traliccio. In particolare, le torri di tipo tubolare non necessitano di molte connessioni che devono essere periodicamente controllate; forniscono un'area protetta per l'accesso alla turbina e rendono la salita sulla navicella più sicura e semplice grazie ad una scala interna o ad un ascensore per turbine di grossa taglia [15].

Vi è poi un terzo tipo di torre, ovvero quella a tiranti (*guyed lattice tower*), ma è poco usata per impianti di media e grossa taglia.

L'altezza della torre dipende dall'intensità di vento e dal sito di installazione.

Negli impianti su terra (*onshore*) la navicella solitamente è posizionata ad un'altezza pari ad 1 o 1.2 volte il diametro del rotore mentre per gli impianti su mare (*offshore*) l'altezza è pari a circa 0.8 volte [15].

La maggior parte delle torri tubolari odierne sono costruite in acciaio laminato, anche se alcune sono ancora costruite in cemento; hanno



Figura 19: Esempio di torre a tiranti. (Fonte: Gammaenergy [9])

forma conica, con il diametro alla base maggiore di quello alla sommità su cui è posta la navicella. Le differenti sezioni della torre, poi, sono collegate e vincolate tra loro da flange imbullonate [15].

Tali tipi di torri generano una notevole scia sottovento ed è per questo che nella maggior parte delle turbine il rotore è posto sopravento. Inoltre sono strutture molto visibili e pertanto non devono mostrare segni di corrosione per diversi anni: a tal fine deve esser scelto un rivestimento adeguato. Infine le torri sono infisse nel terreno mediante fondazioni costituite in genere da plinti di cemento armato collocati ad una certa profondità [15].

#### 3.2.6 I sistemi di controllo

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. In base alle acquisizioni, la turbina viene mantenuta in condizioni di funzionamento ottimali attivando o disattivando, ad esempio, i controlli sull'orientamento della navicella, sulla regolazione dell'angolo delle pale, sull'attivazione del sistema frenante, sulla limitazione della potenza o sulle interruzioni di funzionamento in caso di sovraccarichi elettrici o problemi sulla rete di connessione [17].

Questi sistemi sono anche responsabili di una serie di decisioni critiche per la sicurezza, quale l'interruzione del funzionamento dell'aerogeneratore in presenza 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, riducendo i carichi sul sistema di generazione.

#### 3.2.7 I sistemi di protezione

I sistemi di protezione possono essere di tipo meccanico, elettrico o aerodinamico e si attivano in occasione di malfunzionamenti del sistema di controllo o di altri guasti, riportando la turbina in sicurezza attraverso il blocco del rotore in qualsiasi condizione di funzionamento (come previsto nella IEC 61400-1). Sono costituiti da un'unità di acquisizione, un'unità di attivazione ed un'unità di blocco [17].

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 [17].

Il sistema di protezione deve inoltre avere la precedenza sui sistemi di controllo, funzionare anche in caso di interruzione dell'alimentazione elettrica, essere costituito da componenti progettati in alta classe di sicurezza [17].

L'unità più importante di un sistema di protezione è quella di blocco che può avere freni di tipo meccanico, aerodinamico o al generatore. Un'unità di blocco aerodinamica può funzionare ruotando la punta della pala o l'intera pala di 90° intorno all'asse orizzontale generando così delle forze aerodinamiche che si oppongono alla coppia del rotore. Altre tipologie di freni aerodinamici possono essere dei paracadute o degli spoiler [17].

#### 3.2.8 Dispositivi ausiliari

Il circuito ausiliario principale montato dentro la navicella comprende un dispositivo idraulico che permette la costante lubrificazione della scatola del cambio e di tutte le altre parti meccaniche principali ed anche lo scambiatore di calore, necessario per il raffreddamento del liquido idraulico e del generatore, oltre alle varie ventole e pompe idrauliche installate nella navicella [15].



Figura 20: Esempio di anemometro per l'orientamento montato su turbina eolica.

(Fonte: Monteualla.it [3])

Sopra la navicella sono solitamente montati anemometri per il controllo della velocità e direzione del vento oltre a varie luci di segnalazione per aerei e, nel caso di turbine offshore, una possibile piattaforma di atterraggio per elicotteri. Oltre a questi dispositivi vi sono altri sensori sparsi su tutta la turbina eolica che permettono di monitorare lo stato dei vari componenti e segnalare eventuali malfunzionamenti che richiedono manutenzione, con lo scopo di migliorare l'affidabilità della turbina (questo è vero soprattutto per gli impianti eolici offshore dove l'accesso non è sempre così semplice) [15].

#### 4.1 INTRODUZIONE

L'evoluzione delle tecnologie applicate alle turbine eoliche ha raggiunto negli ultimi anni livelli di eccellenza.

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 devono essere tenuti fortemente in considerazione nello sviluppo di nuove soluzioni realizzative. Il primo vincolo che limita l'incremento di taglia delle turbine è che la producibilità energetica aumenta con il quadrato del diametro del rotore mentre il volume, e quindi la massa, aumentano con il cubo del diametro. Ciò significa 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. Il secondo vincolo è rappresentato dalla trasportabilità di questi componenti [17].

Da ciò consegue una sfida continua per progettisti e produttori per portare avanti lo sviluppo tecnologico del settore che richiede lo studio di nuovi materiali, più leggeri e resistenti, di sistemi di controllo e di potenza innovativi, di approcci progettuali differenti e di processi produttivi, di trasporto e di montaggio più efficienti.



Figura 21: Settori di ricerca e sviluppo. (Fonte: U.S. Department of Energy [13])

Nei seguenti paragrafi verranno esaminati alcuni possibili sviluppi tecnologici il cui contributo sarà determinante per ottenere una maggiore producibilità attraverso una migliore efficienza ed affidabilità dei componenti delle turbine eoliche.

#### 4.2 IL ROTORE E LE PALE

Per quanto riguarda il rotore e le pale, il principale intervento atto a migliorare la producibilità energetica di una turbina eolica è l'incremento delle dimensioni del rotore aumentando, quindi, la cosiddetta "area spazzata". Le attività di ricerca e sviluppo sono dedicate alla progettazione di pale sempre più lunghe e che utilizzino nuovi materiali più resistenti e di minor peso, sistemi di controllo innovativi e soluzioni progettuali aerodinamiche più efficaci [17].

Alcune soluzioni attualmente allo studio sono:

- la sostituzione delle fibre di vetro con le fibre di carbonio;
- l'utilizzo di sistemi di controllo attivo che, a seconda del carico sul rotore, intervengano per ridurre i carichi trasmessi da questo al resto della struttura;
- la realizzazione di rotori a diametro variabile e che si adattino alle condizioni del vento;
- la realizzazione di nuovi profili aerodinamici che permettano una maggiore efficienza ed una migliore distribuzione dei carichi;
- la segmentazione delle pale per una migliore trasportabilità.

#### 4.3 LA TORRE DI SOSTEGNO

Le tecnologie ingegneristiche impiegate in questo campo hanno già raggiunto livelli molto elevati. La necessità però di incrementare l'altezza delle torri di sostegno pone una serie di questioni sia tecniche che economiche, strettamente correlate tra loro.

La principale questione economica è quella del continuo aumento del prezzo dell'acciaio, materiale principale per la costruzione delle torri. Attualmente sono allo studio soluzioni alternative che impieghino fibre di carbonio e cemento armato.

La questione tecnica, invece, riguarda le lunghezze sempre più elevate delle torri di sostegno che implica maggiori carichi da sostenere, maggiori vibrazioni sull'intera turbina eolica e un numero maggiore di trami da trasportare e collegare tra loro (con conseguente aumento dei costi di trasporto ed assemblaggio, e possibili problemi di affidabilità) [17].

#### 4.4 IL SISTEMA DI GENERAZIONE

Le perdite che avvengono nelle apparecchiature elettroniche e, generalmente, all'interno del sistema di generazione sono di modesta entità; ma, se sommate tra loro, possono raggiungere valori significativi e non accettabili.

I miglioramenti tecnologici atti a ridurre queste perdite includono, ad esempio, sistemi elettronici innovativi e l'utilizzo di generatori a magneti permanenti che garantiscono prestazioni ed efficienza migliori.

Attualmente però, una delle questioni più spinosa da risolvere resta l'affidabilità del moltiplicatore di giri che resta una delle componenti che più di tutte va a diminuire l'efficienza della turbina. Uno degli accorgimenti è quello dell'utilizzo di sistemi di trasmissione diretta (*direct drive*) che, attraverso l'eliminazione dei moltiplicatori di giri, permette di semplificare le apparecchiature presenti nella navicella e, appunto, di migliorare l'affidabilità e l'efficienza. Il primo produttore che, a partire dagli anni '90, ha sperimentato questa tecnologia, accoppiata al generatore sincrono senza magneti permanenti, e che la utilizza su tutte le turbine attualmente in produzione è la tedesca Enercon [17].



Figura 22: Particolare della navicella della Enercon E53. (Fonte: Enercon [8])

Poiché l'utilizzo della trasmissione diretta richiede, a parità di potenza della turbina, rotori più grandi, è stata sviluppata una tecnologia intermedia tra la trasmissione diretta e quella a tre stadi, ovvero quella dei sistemi ibridi, che attraverso l'utilizzo di sistemi di trasmissione a più stadi permette di ottenere sistemi più affidabili e di dimensioni compatte. Nella figura 23 è riportato l'esempio di una turbina da 1 MW dell'azienda WinWinD basata sul concetto denominato *Multibrid*<sup>®</sup> [17].

Altro interessante esempio di applicazione di sitema ibrido è il *Quantum Drive*<sup>™</sup>*Distributed Powertrain* dell'azienda americana Clipper (Figura 24) che utilizza una trasmissione a due stadi e quattro alberi che distribuiscono la potenza su quattro generatori a magneti permanenti. Con questa tecnologia si riescono ad ottenere dimensioni della navicella contenute, alta efficienza e affidabilità ed operazioni di installazione e manutenzione più semplici [17].

Oltre a ciò un'altra alternativa allo studio nei settori di ricerca è quella di applicare alle tecnologie tradizionali nuovi materiali che po-





trebbero permettere il funzionamento del sistema a temperature, frequenze e tensioni superiori, migliorando l'affidabilità ed il controllo e riducendo i costi.



Figura 24: Navicella della turbina 2.5 MW CLipper Liberty. (Fonte: Clipper Windpower [7])

#### 4.5 I SISTEMI DI CONTROLLO

Sono in sperimentazione e, in parte, anche già in fase di utilizzo alcune innovazioni tecnologiche relative ai sistemi di controllo dei componenti elettromeccanici delle turbine eoliche che ne permettono un più efficiente funzionamento. Una prima modifica possibile è la sostituzione dei tradizionali sistemi di controllo del passo delle pale, idraulici o elettrici, con meccanismi a catene dentate che hanno il vantaggio di non essere sensibili a shock elettrici e non richiedere l'utilizzo di lubrificanti. Altri progressi sono attesi sui sistemi di misurazione dei carichi meccanici sulle pale: l'utilizzo di fibre ottiche sulle pale per la misurazione delle tensioni mostra interessanti prospettive di sviluppo [17].

#### 4.6 INNOVAZIONI FUTURE

Oltre ai tradizionali sistemi eolici per la produzione di energia, vi sono una serie di sistemi e prototipi, anche molto creativi, che nascono dal forte stimolo dato dall'industria eolica al settore della ricerca. Ad esempio sono di sicuro interesse i generatori elettrostatici.

Questo nuovo dispositivo (denominato Ewicon (Electrostatic WInd Energy CONverter)) è stato pensato per ovviare ad alcuni dei principali inconvenienti delle turbine eoliche classiche. Da un punto di vista ambientale ed economico, il sistema dei generatori rotanti attualmente in uso ha come principali inconvenienti quello costituito dal rumore prodotto dall'avanzamento delle pale e dell'usura meccanica. L'eliminazione delle parti in movimento implicherebbe l'annullamento dell'inquinamento acustico e una grossa riduzione dei costi degli interventi manutentivi, che spesso sono effettuati in zone difficili da raggiungere.



Figura 25: Prototipo Ewicon. (Fonte: The development of an electrostatic wind energy converter (EWICON) [16] )

Il principio di funzionamento dei nuovi generatori eolici è basato sul trasporto di particelle cariche contro la direzione di un campo elettrico: dopo che il flusso d'aria in ingresso ha attraversato una griglia a potenziale negativo, delle gocce d'acqua con carica positiva sono iniettate nel flusso e si muovono verso una griglia positiva, isolata dalla precedente, seguendo la direzione del vento. Il sistema ha in pratica la struttura di un grande condensatore, dove gli elettrodi sono costituiti dalle due griglie. La goccia d'acqua guadagna energia potenziale nel movimento verso l'elettrodo positivo e, complessivamente, il condensatore composto dalle due griglie acquisisce energia a spese del vento.

Gli ingombri inferiori e la minore complessità meccanica potrebbero semplificare l'installazione di generatori eolici di questo nuovo tipo, dando anche la possibilità di inserire questi dispositivi dove attualmente è impossibile, per esempio integrandoli in edifici o in infrastrutture in zone densamente abitate.

Un'altra tipologia di prototipi, anche avveniristici, si basano sul concetto della *Airborne Wind Turbine*, brevettato all'inizio degli anni '90 dall'inglese Colin Jack e che prevede l'utilizzo di turbine eoliche non sostenute da torri e che possono operare sia a basse che ad alte quote [17].



Figura 26: Principio di funzionamento di una Airborne Wind Turbine. (Fonte: Wikipedia [19])

I maggiori inconvenienti associati a questi sistemi sono la difficoltà di controllo (soprattutto nel caso di aquiloni), il mantenimento in volo per lunghi periodi, la trasmissione affidabile dell'energia a terra e le rotture dovute a fulmini o tempeste.

A partire dal prototipo originario, sono stati sviluppati diversi modelli che si differenziano tra loro dalle tecnologie adottate dal meccanismo che ne permette il mantenimento in aria: palloni aerostatici, autogiro incatenati al terreno, aquiloni o soluzioni miste. Tra queste ve sono due principali, Kite Gen e Magenn, sulle quali è in atto un forte sviluppo tecnologico.

Il primo è un progetto italiano per la produzione di energia elettrica che sfrutta i venti di alta quota. Infatti questo tipo di tecnologia permetterebbe di raggiungere quote di 800-1000 metri dal suolo utilizzando un sistema ad aquiloni pilotati da cavi ad alta resistenza, mentre tutti i sistemi di generazione sono posizionati a terra [17].



Figura 27: Esempio di Kite Gen wind farm. (Fonte: Wikipedia [18])

Il secondo permetterebbe di raggiungere quote di 300 metri dal suolo utilizzando, invece, due rotori mantenuti in volo da un pallone ad elio ancorato da sistemi di catene. I generatori sono subito dietro i rotori e la trasmissione dell'energia prodotta avviene attraverso le catene [17].



Figura 28: Prototipo del MARS (Magenn Air Rotor System). (Fonte: www.mechanicalengineeringblog.com [11] [10] )

# CONCLUSIONI

Con questo elaborato si è voluto spiegare come estrarre energia dal vento tramite l'aerogeneratore, studiandone i principi aerodinamici di base applicati, analizzandone tutte le sue parti, le tecnologie applicate ed il loro funzionamento corale per adempiere allo scopo prefissato. Per quanto riguarda le nuove possibili soluzioni tecnologiche che potrebbero prendere piede nei prossimi decenni, a causa del loro continuo sviluppo e della grande quantità di alternative, non sono state approfondite nel dettaglio ma si è preferito, invece, riportare il loro principio di funzionamento e soprattutto i possibili vantaggi che le renderebbero preferibili alle attuali turbine eoliche tradizionali.

# APPENDICE

33

# APPENDICE

- densità dell'aria standard  $\rho=1,225kg/m^3$  a pressione atmosferica di 1 atm, temperatura 15  $^\circ C$ 

- [1] Elettrosmog.com. URL www.elettrosmog.com/alberi/ generatori.jpg.
- [2] Enersolar S.r.l. URL www.enersolar.eu.
- [3] Monteualla.it. URL www.monteualla.it.
- [4] Progettazione-Impianti-Eletttrici.it. URL www. progettazione-impianti-elettrici.it.
- [5] Tecnologiaericerca.com, . URL http://
  www.tecnologiaericerca.com/2011/12/12/
  siemens-presenta-la-nuova-turbina-eolica-direct-drive-da-6-mw/.
- [6] Tecnelab, . URL www.tecnelab.it.
- [7] Clipper Wind Power, 2015. URL www.clipperwind.com.
- [8] Enercon Gmbh, 2015. URL www.enercon.de.
- [9] Gammaenergy, 2015. URL www.gammaenergy.it.
- [10] Magenn Power Inc., 2015. URL www.magenn.com.
- [11] Mechanicalengineeringblog, 2015. URL www. mechanicalengineeringblog.com.
- [12] WinWinD Power Energy, 2015. URL www.winwind.in.
- [13] AA.VV. 20% Wind energy by 2030 Increasing wind energy's contribution to U.S. electricity supply, 2008.
- [14] F. Andreolli. Impianti mini e micro eolici. Guida alla progettazione e realizzazione. Flaccovio Dario, 2011. ISBN 9788857900179. URL https://books.google.it/books?id=0MrzQwAACAAJ.
- [15] ABB Technical application papers no. 13. Wind power plants. Technical report, ABB document 1SDC007112G0201, 10 2011.
- [16] P.H.F. Morshuis J.C.M. Marijnissen J.J. Smit D. Djairam, A.N. Hubacz. The development of an electrostatic wind energy converter (EWICON). IEEE, 11 2005.
- [17] N. Graniglia. Impianti eolici. Con CD-ROM. Grafill, 2010. ISBN 9788882074050. URL https://books.google.it/books? id=I0NXYgEACAAJ.
- [18] Ipno5i. Kitegen. URL http://commons.wikimedia.org/wiki/ File:Kitegen.jpg#/media/File:Kitegen.jpg.

- [19] JamesProvost. Airborne wind generator-en. URL http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airborne\_wind\_ generator-en.svg#/media/File:Airborne\_wind\_generator-en. svg.
- [20] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. EERE illust large turbine, 2006. URL http://wwwl.eere.energy.gov/ windandhydro/images/illust\_large\_turbine.gif.
- [21] S0458241. Wind power installed in Europe in 2010. URL http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind\_ power\_installed\_in\_Europe\_in\_2010.png#/media/File: Wind\_power\_installed\_in\_Europe\_in\_2010.png.