

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Scuola di Ingegneria

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

TESI DI LAUREA

**ANALISI DELLE TRASMISSIONI
MECCANICHE NEI SISTEMI EOLICI**

Relatore:
Ch.mo Prof. Giovanni Boschetti

Laureando:
Francesco Maria Di Noia
Matricola: 1027873

ANNO ACCADEMICO 2016/2017

INDICE

Introduzione	3
1 Le fonti rinnovabili	4
2 L'energia eolica	6
2.1 L'energia eolica nella storia	6
3 Caratteristiche di un aerogeneratore	8
3.1 Principali componenti di un aerogeneratore	9
3.1.1 Il rotore	9
3.1.2 La navicella	10
3.1.3 La torre	11
3.1.4 Il moltiplicatore di giri	11
3.1.5 I freni	12
3.1.6 Il generatore elettrico	12
3.1.7 Il trasformatore	12
3.2 La potenza prodotta da un aerogeneratore	12
4 La trasmissione meccanica	14
4.1 La scatola degli ingranaggi	17
4.1.1 Funzione	17
4.1.2 Tipologie	17
4.1.3 Considerazioni sulla progettazione della scatola degli ingranaggi	20
4.2 Il sistema di imbardata	22
4.2.1 Funzione	22
4.2.2 Tipologie	22
4.2.3 Descrizione di funzionamento	22
5 Tipologie e capacità degli impianti eolici	24
5.1 I parchi eolici	24
5.2 La capacità eolica	24
5.2.1 La capacità eolica nel mondo	24
5.2.2 La capacità eolica in Europa	30
5.2.3 La capacità eolica in Italia	31
5.3 L'energia eolica offshore	31
5.3.1 L'offshore in Europa	33
5.3.2 L'offshore in Italia	33
5.4 L'energia eolica nel 2020	34
Bibliografia	37

INTRODUZIONE

La tesi di laurea in esame tratta dello sviluppo delle fonti rinnovabili con una focalizzazione sulla trasmissione meccanica di potenza nei sistemi eolici. Una classificazione dei diversi tipi di pale eoliche riguardo forma, dimensione, livelli applicativi ed un'analisi sui costi e benefici derivanti dall'utilizzo di sistemi eolici.

1. LE FONTI RINNOVABILI

Le energie rinnovabili sono fonti di energia il cui utilizzo non intacca, né pregiudica le risorse naturali a disposizione dell'uomo. Queste fonti di energia si rigenerano dopo ogni ciclo di utilizzo e, quindi, sono inesauribili. Alcune fonti rinnovabili sono disponibili in grande quantità e non risentono dello sfruttamento da parte dell'uomo. Esempi tipici di energia rinnovabile sono l'energia solare e l'energia eolica.

Altre fonti rinnovabili, invece, possono diventare esauribili quando l'uomo esagera l'utilizzo. Queste fonti sono dette energie rinnovabili esauribili. Ad esempio, il legno è una risorsa rinnovabile poiché alcuni alberi sono tagliati mentre altri nascono. Tuttavia, se il numero di alberi tagliati è superiore a quelli che nascono, l'eccesso di utilizzo causerà la riduzione progressiva della foresta nel corso del tempo, fino a farla scomparire del tutto. In questo secondo caso l'eccessivo sfruttamento ha trasformato una risorsa rinnovabile in una risorsa esauribile.

Le principali fonti di energia rinnovabili utilizzate dall'uomo sono:

- L'energia solare

È la fonte rinnovabile più conosciuta ed è utilizzata per produrre calore e, grazie alla tecnologia fotovoltaica, per produrre elettricità.

- L'energia eolica

È la fonte di energia generata dal vento, dallo spostamento continuo delle masse d'aria. Può essere trasformata direttamente in energia meccanica (es. mulini a vento) e indirettamente in elettricità (es. pale eoliche). L'energia dal vento è una delle fonti di energia rinnovabile più antiche. Per millenni è stata l'unica fonte di energia per la navigazione marittima su grandi distanze.

- Le biomasse

Sono risorse organiche (biologiche) che possono essere utilizzate come combustibili e/o carburanti. Ad esempio, gli scarti della lavorazione agroalimentare possono essere impiegati come materia prima per produrre energia termica (calore) tramite la combustione. Alcune sostanze organiche (es. zucchero, cereali, oli, ecc.) possono essere trasformati in biocarburanti.

- La geotermia

È l'energia della Terra e il calore proveniente dal sottosuolo. La temperatura aumenta nelle profondità terrestri. In alcune zone la differenza termica tra gli strati superficiali e quelli sotterranei è maggiore e può essere sfruttata per riscaldare e creare un moto di circolazione naturale dei liquidi.

- L'energia idraulica

È lo spostamento delle masse d'acqua. Le principali fonti di energia idraulica sono generate dal ciclo naturale dell'acqua, dalle onde e dalle maree.

Le fonti di energia fossile (petrolio, carbone, gas naturale) e le fonti nucleari (uranio, plutonio) sono, invece, da considerarsi delle risorse limitate e non rinnovabili. Possono essere utilizzate soltanto una volta e non si riproducono naturalmente nel breve periodo di tempo.

Le fonti di energia rinnovabile si rigenerano dopo l'utilizzo. Questo potrebbe apparentemente violare il primo postulato della termodinamica, in base al quale nulla si crea e nulla si distrugge, ma tutto si trasforma. Le fonti rinnovabili non nascono dal nulla, sono frutto di un processo naturale che le origina. Ad esempio, l'energia solare è generata dal Sole continuamente e i raggi solari la veicolano nello spazio verso ogni direzione. L'uomo può utilizzare o meno l'energia solare, quest'ultima viene continuamente prodotta. Una risorsa rinnovabile esauribile (es. boschi, pesci, ecc.) si riproduce nel tempo a un determinato tasso di rigenerazione che deve essere necessariamente superiore al tasso di sfruttamento (o tasso d'uso) da parte dell'uomo.

Occorre specificare che l'aggettivo "rinnovabile" ha significato soltanto in un orizzonte temporale molto breve, dal punto di vista dell'uomo. Una risorsa esauribile potrebbe diventare rinnovabile nel lungo periodo, in una scala temporale più ampia. Ad esempio, il petrolio è considerato una risorsa esauribile (non rinnovabile). Quando utilizziamo il petrolio in una combustione, questo si trasforma in modo irreversibile in calore, scorie e gas. Una volta utilizzato non è possibile riprodurre il petrolio.

Tuttavia, in una scala temporale più grande, in tempi geologici, anche il petrolio è una risorsa rinnovabile poiché viene generata da un processo di formazione naturale, a partire dalle sostanze organiche vegetali poste per milioni di anni in particolari condizioni ambientali. Quando parliamo di energie rinnovabili, ci riferiamo essenzialmente alla capacità delle risorse e delle fonti di energia di rigenerarsi nel breve periodo.

2. L'ENERGIA EOLICA

Tra le tecnologie innovative che utilizzano fonti rinnovabili, quella eolica è la più sviluppata e disponibile sul mercato: ad oggi è installata nel mondo una potenza globale superiore a 486.7 GW.

L'eolico è una delle tecnologie più mature e sicure tra le rinnovabili e anche tra le più promettenti per il nostro futuro energetico perché sfrutta una risorsa costante, disponibile ed inesauribile come il vento.

Alla luce degli accordi tra i grandi Paesi del mondo, finalizzati a contenere entro almeno i 2°C il surriscaldamento globale, come deciso nella conferenza internazionale COP21 di Parigi, le energie rinnovabili stanno assumendo un ruolo sempre più importante nel quadro internazionale. L'Europa in questa fase non ha mostrato una ambizione all'altezza del suo ruolo, sia in vista degli obiettivi del 2030 sia in vista degli obiettivi più lontani nel tempo in cui la produzione di energia da fonte rinnovabile tenderà al 100%. Quella eolica è vera energia rinnovabile, pulita, che si ottiene grazie alla forza del vento, una risorsa sempre presente in natura.

2.1 L'energia eolica nella storia

Le macchine a vento fanno la loro prima comparsa nella storia oltre 1300 anni fa in Persia. Non erano molto efficienti ed erano particolarmente suscettibili a danni in caso di forti venti. L'energia eolica ha trovato spazio in Europa durante il Medioevo, i mulini a vento erano basati su degli assi orizzontali a differenza dei primi modelli del 900 d.C. che erano ad asse verticale e diffusi in tutto l'Oriente, soprattutto in Cina. I mulini a vento, insieme all'acqua e alla forza animale, rappresentavano una delle fonti primarie di energia e servivano per macinare cereali, spremere le olive e sollevare l'acqua. Tali mulini erano costruiti su montanti in modo da poter essere indirizzati verso il vento e presentavano una configurazione a 4 pale in modo da dare stabilità alla struttura e per seguire esigenze costruttive. Tali macchine eoliche subirono una crisi nel '500 quando gli artigiani olandesi si trovarono a fronteggiare l'avanzata nel mercato del motore a vapore. Fino a quel momento la struttura dei mulini era tale da garantire una maggiore efficienza, non ruotava più tutta la struttura ma solo il rotore. Inoltre la configurazione delle pale si era modificata in modo da avere una struttura portante e molteplici flaps regolabili tali da controllare la velocità di rotazione e di conseguenza la potenza generata. Negli anni '50 del XVIII secolo, l'ingegnere inglese John Smeaton, definì tre regole basilari, valide ancora al giorno d'oggi: la velocità della punta delle pale è proporzionale alla velocità del vento; la coppia di forza massima è proporzionale al quadrato della velocità del vento; la potenza massima è proporzionale al cubo della velocità del vento.

Ma il vento cambiò la sua rotta nel luglio 1887 quando il professor James Blyth, un accademico scozzese, costruì una turbina eolica nel giardino della sua casa vacanze a Marykirk e utilizzò l'energia elettrica prodotta per ricaricare gli accumulatori che alimentavano le luci nel suo cottage. La turbina eolica di Blyth era caratterizzata da un paletto di 17 metri di diametro e una grande coda per muovere il rotore, così è denominato l'insieme di pale, mozzo, albero lento e meccanismo pitch-control. Questo sistema, al riparo

del vento, era in grado di produrre 12 kW di energia elettrica. L'accademico scozzese riuscì quindi a trasformare l'energia eolica in energia elettrica.

Nel 1891 i suoi esperimenti portarono alla formalizzazione di un brevetto e, nello stesso anno, il danese Poul La Cour, spinto dalla volontà di portare l'elettricità anche nelle campagne della Danimarca, riuscì a risolvere uno dei principali problemi presentati dall'eolico: come immagazzinare l'energia prodotta. Ad inizio anni Settanta il vento ritornò a soffiare sullo sviluppo industriale in seguito alla prima crisi petrolifera. La carenza e l'elevato costo dei combustibili, a partire dalla prima metà degli anni Ottanta, contribuì a portare sul mercato nuovi impianti eolici sempre più moderni e competitivi, in grado di garantire vantaggi sociali ed economici.

Fattori fondamentali nello sviluppo dell'energia eolica sono stati di carattere ambientale, economico e politico, tali da generare nel giro di pochi anni una tecnologia potenzialmente significativa per la produzione di elettricità, in un'ottica di aumento della domanda di energia elettrica, della necessità di contenimento dei costi, della salvaguardia dell'ambiente e del territorio, garantendo un elevato livello di autonomia per i produttori e i consumatori.

La soluzione ad ogni problema di approvvigionamento energetico deve scontrarsi tra i tanti e diversi interessi: quelli di chi produce e quelli di chi consuma. Tale situazione impone nuovi modi di pensare e progettare il futuro, soffermandosi sulle energie rinnovabili fondate sull'antico principio di sfruttamento delle fonti naturali come il sole, l'acqua e ovviamente il vento.

3. CARATTERISTICHE DI UN AEROGENERATORE

Come già anticipato in precedenza parlando della storia dell'energia eolica, il generatore eolico, detto anche aerogeneratore, può essere considerato l'evoluzione dei tradizionali mulini a vento, anche se con molte differenze costruttive.

I generatori eolici possono essere ad asse verticale o ad asse orizzontale.

I generatori eolici ad asse verticale sono disponibili quasi esclusivamente per le taglie più piccole, presentano caratteristiche tecniche molto interessanti: funzionamento indipendentemente dalla direzione del vento; basso impatto visivo; funzionamento silenzioso; avvio con basse velocità del vento (2 m/s); resistenza a raffiche e a vento forte.

Sono quindi particolarmente indicati sia in ambito urbano, grazie alla bassa rumorosità in fase di esercizio, sia in siti caratterizzati da condizioni meteorologiche e anemologiche estreme, grazie alle particolari doti di robustezza e alle scarse necessità di manutenzione.

I generatori eolici ad asse orizzontale, rappresentano la stragrande maggioranza dei generatori eolici installati al giorno d'oggi.

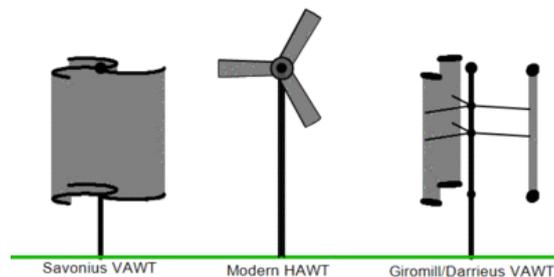


FIG.1 Tre tipi di turbine eoliche, due ad asse verticale e una ad asse orizzontale

Il continuo sviluppo del settore eolico ha portato, nel corso degli ultimi anni, alla produzione di generatori eolici caratterizzati da elevata affidabilità e da costi contenuti.

La tendenza attuale del mercato vede la realizzazione di aerogeneratori sempre più grandi e potenti; i generatori eolici possono differenziarsi su diverse taglie di potenza: le macchine commerciali più diffuse sono quelle di taglia maggiore che hanno una potenza di 5-6 MW e un rotore del diametro di oltre 120 metri e uno sviluppo della torre in altezza che raggiunge anche i 150 metri; uno solo di questi aerogeneratori, in condizioni di vento ottimale, può soddisfare il fabbisogno di elettricità di quasi 5.000 famiglie.

Una taglia inferiore è quella degli aerogeneratori che hanno una potenza tra i 20-200 kW, con un diametro del rotore che va da 1 metro fino a 20 metri ed un'altezza della torre di circa 30 metri. Questi aerogeneratori trovano un utilizzo per l'alimentazione di utenze industriali, commerciali ed agricole.

La dimensione più piccola è quella caratteristica del micro eolico con una potenza che arriva fino ai 5 kW, un diametro del rotore che non supera gli 8 metri ed un'altezza della torre che varia tra i 6 e i 10 metri. Generalmente questi ultimi vengono impiegati singolarmente per alimentare le singole utenze isolate dalla rete elettrica. Inoltre possono trovare un campo applicativo anche per coprire le esigenze di camper e di piccole imbarcazioni.

L'abbattimento dei costi di produzione delle turbine di grande taglia, grazie all'economia di scala, ha portato molti benefici anche per il settore dei mini e micro generatori eolici, tanto da portare numerosi operatori del settore, nonché imprese emergenti, ad investire ingenti risorse sulle macchine eoliche di piccola e piccolissima taglia.

3.1 Principali componenti di un aerogeneratore

Tutti i generatori eolici ad asse orizzontale, al di là delle taglie (micro, mini o grande) e dei modelli, presentano alcuni componenti fondamentali:

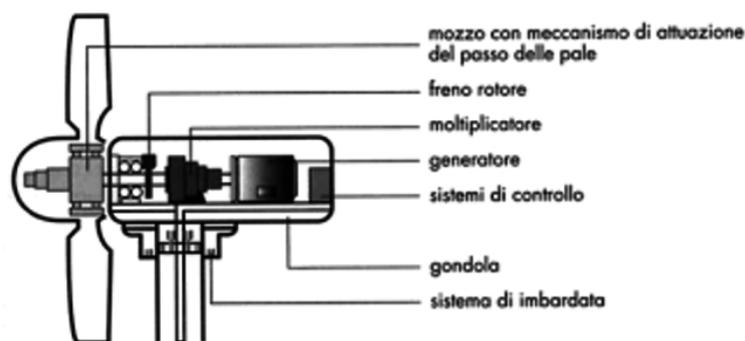


FIG.2 Componenti principali di un generatore eolico

3.1.1 Il rotore

Le pale della macchina collegate a un mozzo, formano il rotore, l'elemento fondamentale di un aerogeneratore. Le pale sono realizzate solitamente in fibra di vetro, di alluminio o di carbonio, in modo da garantire allo stesso tempo solidità, resistenza e leggerezza. Per aerogeneratori di grandi dimensioni vengono tipicamente utilizzate pale realizzate in fibra di carbonio nelle parti sottoposte a carichi più critici. Il diametro del rotore può andare da un minimo di circa 1 metro, per i generatori di taglia inferiore a 1 kW, fino a oltre 120 metri nel caso di turbine da molti megawatt di potenza.

Esistono modelli monopala, bipala o multipala, che tuttavia non sempre offrono un'efficienza complessiva paragonabile a quella dei generatori a tre pale.

Negli aerogeneratori moderni prevalgono tre tipi di configurazioni:

- Monopala

Con una sola pala e munito di apposito contrappeso, è la soluzione meno costosa e quella più indicata nel caso di siti poco accessibili. Deve sempre essere provvisto di mozzo oscillante ed ha una efficienza generalmente minore dei multipala.

- Bipala

Con due pale montate a 180° l'una rispetto all'altra e con numero di giri caratteristico di circa 40 giri/min. Ha un costo minore del tripala ma ha anche un peggiore impatto visivo e una efficienza minore risentendo maggiormente della presenza della torre e della variazione di velocità all'aumentare dell'altezza della torre stessa.

- Tripala

Con tre pale montate a 120° l'una rispetto all'altra e con un numero di giri caratteristico tra 30 e 60 giri/min, è la soluzione più utilizzata perché, seppur a fronte di costi di trasporto e di costruzione maggiori, è quella con il miglior rapporto costo-potenza sviluppata.

I generatori tripala hanno inoltre una conformazione estetica più equilibrata e armoniosa e in fase di funzionamento risultano più "riposanti" per l'occhio umano, rispetto ai modelli mono e bipala.

Nei sistemi multipala, il numero di pale può variare fino a 20 e più, determinando diverse prestazioni della macchina. Difatti, all'aumentare del numero di pale, diminuisce il numero di giri del rotore ed aumenta la coppia di spunto. Esistono dei rotori nei quali l'angolo di inclinazione delle pale è regolabile in modo da controllare la potenza in uscita. La potenza della macchina eolica è infatti proporzionale al diametro del rotore. All'aumentare della potenza, aumentano le dimensioni della macchina eolica e quindi si identificano gli aerogeneratori di taglia piccola, media o grande.

3.1.2 La navicella

Si tratta della cabina posta sulla sommità della torre. La navicella sostiene il mozzo del rotore e contiene al proprio interno, tra gli altri, l'albero di trasmissione, il moltiplicatore di giri, il generatore elettrico e i sistemi di controllo.

Il moltiplicatore di giri, posizionato tra il rotore e il generatore, riceve il moto dall'albero del rotore e lo trasferisce al generatore con un certo numero di giri. Il generatore ruotando produce energia elettrica. I sistemi di controllo presenti all'interno della navicella hanno il compito di gestire automaticamente l'aerogeneratore in diverse situazioni come proteggere tutto l'apparato elettrico da casi di malfunzionamento o di vento elevato, così come ridurre la rumorosità in fase di esercizio. La navicella è posta sulla torre e di norma è progettata per ruotare orizzontalmente di 180° o anche di 360°, consentendo al rotore di allinearsi con la direzione del vento.

La direzione ottimale della navicella rispetto alla direzione del vento avviene, nei generatori di grande taglia, grazie a un complesso "sistema di imbardata" di tipo elettro-meccanico, mentre i micro e mini generatori sono normalmente dotati di un semplice timone direzionale.

L'insieme costituito da rotore e navicella forma quella che propriamente si definisce "turbina".

3.1.2 La torre

La torre ha il compito di sostenere il peso di navicella e rotore e di resistere a tutte le sollecitazioni. È fissata al suolo con il cemento, assicurando sicurezza e stabilità a tutta la struttura. Soltanto per alcuni tipi di generatori eolici di taglia piccola si può fare a meno delle fondazioni in cemento.

Tre, sono i principali tipi di torri utilizzate per le turbine ad asse orizzontale: a traliccio, a tubolari e a tiranti. Le torri più comuni sono quelle tubolari, realizzate in acciaio o in calcestruzzo e cave all'interno. Le torri tubolari sono preferite soprattutto per il migliore impatto visivo rispetto alle torri a tiranti e a quelle a traliccio. Inoltre non necessitano di numerose connessioni tramite bulloni che sono oggetto di una manutenzione periodica.

L'altezza della torre è variabile e dipende anche dalle caratteristiche di ventosità del sito. Se per i micro generatori eolici possono bastare torri di qualche metro, nel caso di aerogeneratori da molti megawatt l'altezza al mozzo può superare anche i 100 metri.

3.1.3 Il moltiplicatore di giri

Il moltiplicatore di giri serve per trasformare la rotazione lenta delle pale eoliche in una rotazione più veloce in grado di far funzionare il generatore di elettricità. In altri termini, collega l'albero di trasmissione lento all'albero di trasmissione veloce. La sua funzione è quella di aumentare il numero di giri. In alcune turbine il rapporto del moltiplicatore può superare 1:100. Il moltiplicatore o riduttore è usualmente un treno epicicloidale a tre stadi, con ruote cilindriche a denti elicoidali. Esso viene progettato e costruito appositamente per una data macchina eolica. Il suo peso può variare ed arrivare fino a 20 tonnellate in una macchina di grossa taglia (2 MW) ed esso non influisce solo sul costo diretto ma anche su quello indiretto, poiché il peso si scarica sulla torre che deve essere progettata per sostenerlo. Per questa ragione si va affermando la tendenza verso l'abolizione di questo componente, sostituendo la funzione di moltiplicazione meccanica con quella elettrica.

3.1.4 I freni

Quasi tutte le turbine montano dei freni meccanici lungo l'albero di trasmissione. I freni meccanici sono in grado di arrestare il rotore in condizioni meteorologiche avverse.

3.1.5 Il generatore elettrico

Il generatore converte l'energia meccanica, per mezzo del rotore, in energia elettrica.

La maggior parte dei generatori collegati alla rete girano a velocità costante o quasi costante, questo è derivante dal fatto che la maggior parte dei rotori dei generatori eolici girano a velocità costante o quasi costante. La potenza del generatore viene indicata in chilowatt.

3.1.6 Il trasformatore

La potenza elettrica in uscita dal generatore è generalmente in bassa tensione e deve essere convertita in media tensione attraverso un trasformatore per ridurre le perdite di trasmissione mediante l'allacciamento alla rete di distribuzione in media tensione. Il trasformatore è installato nella navicella o alla base della torre.

3.2 La potenza prodotta da un aerogeneratore

La produzione di energia elettrica dipende dalla velocità del vento. Al variare della velocità del vento, misurata in metri al secondo, l'aerogeneratore produrrà una diversa potenza di energia elettrica. Il legame tra la velocità del vento e la potenza elettrica erogata si rappresenta mediante il grafico della curva di potenza. Tale grafico, per avere un significato ingegneristico, deve essere corredato dalle condizioni di prova che ne definiscono l'ambito di validità.

Esistono due soglie, una minima e una massima, affinché l'aerogeneratore eolico produca energia elettrica:

- Al di sotto di una determinata velocità minima del vento, detta "cut in" o anche velocità di taglio inferiore, l'aerogeneratore non eroga energia elettrica e il rotore resta fermo. Questa soglia minima è generalmente posta ad una velocità del vento di 3 metri al secondo. Ad ogni modo la soglia minima di "cut in" dipende dalle caratteristiche dell'aerogeneratore, dalle sue dimensioni e dalla tecnologia utilizzata.

- Esiste anche una soglia massima, detta “cut out” o anche velocità di taglio superiore, oltre la quale il rotore dell'aerogeneratore smette di girare per evitare danni alla turbina. La potenza del vento superiore a 25 metri al secondo è tipicamente un buon confine di “cut out”. Oltre queste velocità l'aerogeneratore non produce energia elettrica.

La velocità nominale è la velocità ottima di funzionamento della turbina. In corrispondenza di tale valore della velocità del vento, l'aerogeneratore sviluppa per la prima volta la potenza nominale di targa.

Dal Rapporto Energie Alternative di Legambiente 2004 un aerogeneratore, ad esempio, di 1300 kW eroga la piena potenza elettrica per velocità del vento comprese tra 12 e 24 metri al secondo. Per calcolare la produzione teorica di energia elettrica dell'aerogeneratore andrà rilevata la velocità media del vento della zona in cui sarà costruito l'aerogeneratore. Per velocità medie del vento di 4,5 metri al secondo l'aerogeneratore produrrà circa 1,2 GWh. Per velocità di 9 metri al secondo l'aerogeneratore produrrà più del doppio, circa 5,3 GWh.

4. TRASMISSIONE MECCANICA

Le ruote sono elementi utilizzati nel trasferimento di coppia da un albero all'altro e sono ampiamente utilizzati nelle turbine eoliche. Le condizioni in cui operano differiscono in modo significativo tra le diverse applicazioni, ed è necessario studiare in dettaglio queste condizioni e la risposta delle ruote in modo che esse svolgano l'uso desiderato. Ci sono numerose applicazioni delle ruote nelle turbine eoliche, il più importante di questi è probabilmente la scatola degli ingranaggi. Altri esempi di applicazioni riguardano le unità di rollio, di beccheggio e di imbardata.

Le ruote possono essere fatte da una varietà di materiali, ma il materiale più comune di cui sono costituite le ruote delle turbine eoliche è l'acciaio che garantisce elevata resistenza e durezza superficiale. Le ruote vengono spesso ottenute per carburazione o altre forme di trattamento termico.

Le ruote possono essere raggruppate in ingranaggi, il più importante dal punto di vista applicativo, e anche il più comune, è il pignone.

La trasmissione del moto può avvenire mediante ruote o mediante organi flessibili come funi, cinghie e catene. Per quanto riguarda la trasmissione mediante ruote, esse possono essere di due tipi: lisce, dette anche di frizione, oppure dentate.

Tra le ruote dentate, quelle più diffuse sono:

- Cilindriche

Utilizzate soprattutto nel caso di assi cinematici paralleli, possono essere a denti dritti o a denti elicoidali, mentre nel primo caso il contatto è uniforme su tutti i punti di contatto, nel caso delle ruote con denti elicoidali, i denti di toccano prima nella parte alta degli stessi denti per poi spostare il contatto verso il basso man mano che la ruota gira. Le ruote con denti elicoidali hanno un miglior rapporto di trasmissione, tali ruote generano una componente di forza laterale ed ortogonale al dente stesso, si genera così una spinta assiale lungo l'asse di rotazione che può provocare un disallineamento dei denti. Tale problema si può risolvere utilizzando una coppia di ruote cilindriche con denti elicoidali sullo stesso asse in modo che le due forze assiali possano trovare l'equilibrio;

- Coniche

Utilizzate tipicamente per assi incidenti, possono essere a denti dritti o a denti curvi;

Le ruote coniche con una inclinazione particolarmente accentuata, sono denominate ipoidi e vengono solitamente utilizzate in abbinamento ad una ruota conica, in modo tale da poter avere assi sghembi, cioè incidenti e non paralleli. Tali configurazioni determinano quelli che vengono definiti come ingranaggi iperboloideici. In alternativa all'utilizzo di due ruote cilindriche a denti elicoidali, si può utilizzare una vite senza fine, cioè una vite che non trasla ma ruota solamente su una ruota cilindrica a denti elicoidali.

Per quanto riguarda la famiglia di ruote cilindriche o coniche il rapporto di trasmissione massimo che si può avere varia tra 1:6 e 6:1. Tale rapporto di trasmissione è proporzionale al rapporto tra i raggi, quindi si può dedurre che è possibile far ingranare tra loro ruote che hanno dimensioni non troppo differenti, fino a sei volte tra la più piccola e la più grande.

Per ottenere rapporti di trasmissione di valore maggiore è necessario connettere tra loro più ruote.

Un caso particolare è quello della connessione tra la ruota cilindrica a denti elicoidali e la vite senza fine, in cui il rapporto di trasmissione può essere più elevato, ma comunque esclusivamente un rapporto di riduzione.

Per studiare il trasferimento di moto è necessario analizzare la forma del dente. La dimensione delle ruote viene definita tramite un criterio di proporzionamento: due ruote con dimensioni molto diverse tra loro non ingraneranno mai.

PROFILO AD EVOLVENTE

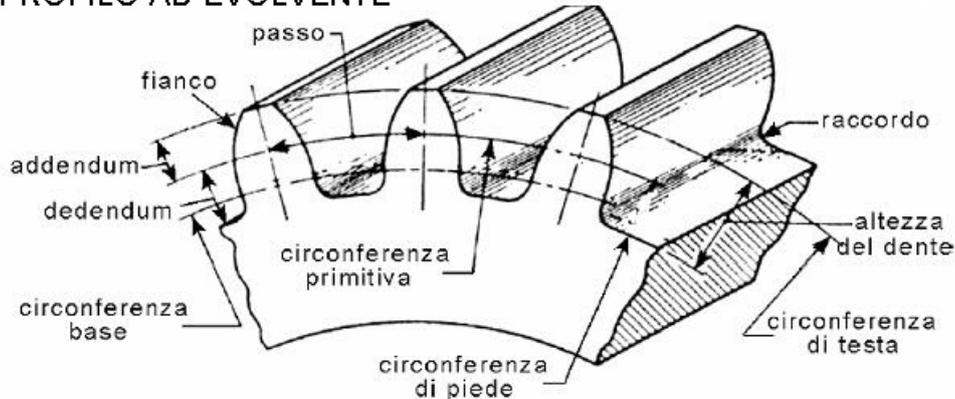


FIG. 3 Grandezze geometriche per il proporzionamento di ruote dentate cilindriche a denti dritti

Il profilo primitivo di una ruota dentata è un profilo che corrisponde al raggio della ruota liscia impiegata per la stessa funzione.

La dentatura viene realizzata a partire dal profilo di una ruota liscia. Alla circonferenza del profilo primitivo vengono aggiunte altre due circonferenze, una di testa e una di piede.

È possibile ricavare due grandezze: modulo e passo.

Il passo è una distanza misurata sulla circonferenza primitiva tra gli stessi punti misurati su due denti consecutivi, passo e modulo sono strettamente correlati tra loro. Avere uno stesso passo equivale ad avere uno stesso modulo a meno di una costante pigreco.

In altri termini, il passo non è altro che la lunghezza della circonferenza primitiva sul numero di denti, mentre il modulo è la lunghezza del diametro primitivo sul numero di denti.

Il criterio di proporzionamento prevede la creazione di ruote che siano legate tra loro dallo stesso modulo. Addendum e dedendum vengono dimensionati in relazione al modulo della ruota, il quale viene espresso in metri essendo una lunghezza ed è uguale all'addendum, mentre il dedendum è tipicamente più grande di 1,25 volte.

L'altezza del dente è data dalla somma dei due termini e vale 2,25 volte il modulo.

Facendo un proporzionamento basato sul modulo, si può considerare che il prodotto del modulo per il numero di denti è pari a due volte il raggio.

Pertanto il rapporto di trasmissione è pari a:

$$\tau = \frac{\omega_2}{\omega_1} = - \frac{r_1}{r_2} = - \frac{z_1}{z_2}$$

dove con ω si indica la velocità angolare della ruota, con r il raggio della stessa e z il numero di denti.

La proporzionalità basata sul modulo comunque non è in grado di garantire che due ruote dentate ingranino perfettamente, a questo scopo è necessario analizzare congiuntamente i due profili primitivi delle ruote che si vogliono far ingranare.

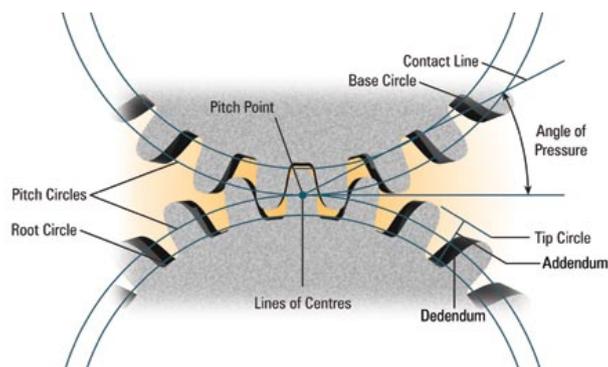


FIG. 4 Dimensionamento degli ingranaggi

Le circonferenze di base hanno rispettivamente lo stesso centro delle altre circonferenze e hanno una dimensione tale che la retta d'azione faccia da tangente per entrambe. Il punto di contatto si trova sulla retta d'azione e ciò garantisce che la forza venga trasmessa da un dente all'altro in direzione tangente alle superfici nel punto di contatto.

Nonostante la forza viene scambiata lungo la direzione della retta d'azione, di solito, i denti strisciano l'uno sull'altro nella trasmissione del moto, motivo per il quale si preferisce lubrificare le ruote.

Uno degli obiettivi nella realizzazione delle ruote dentate, come per le camme, è di contenere l'angolo di pressione, in maniera tale da averlo attorno ai 20 gradi. Riducendo di molto l'angolo di pressione, la circonferenza di base raggiungerebbe il profilo primitivo e quindi un dente sempre più piccolo, fino al caso limite in cui l'epiciclo coincide con la retta d'azione e quindi si tornerebbe al caso di ruote lisce.

4.1 La scatola degli ingranaggi

4.1.1 Funzione

La maggior parte delle catene cinematiche delle turbine eoliche includono una scatola degli ingranaggi per aumentare la velocità dall'albero al generatore. Un aumento di velocità è necessaria perché i rotori delle turbine eoliche, e quindi gli alberi principali, girano ad una velocità molto inferiore a quella richiesta dalla maggior parte dei generatori elettrici. I rotori di piccole dimensioni delle turbine eoliche girano a velocità dell'ordine di qualche centinaio di giri al minuto, mentre per turbine eoliche più grandi girano più lentamente. La maggior parte dei generatori convenzionali girano a 1800 giri al minuto (60 Hz) o 1500 giri al minuto (60 Hz).

Alcune scatole degli ingranaggi svolgono anche funzioni diverse tali da aumentare la velocità, come ad esempio sostenere i cuscinetti dell'albero principale. Queste, tuttavia, sono funzioni secondarie allo scopo di base dell'insieme degli ingranaggi.

La scatola degli ingranaggi è uno dei componenti più pesanti e più costosi di una turbina eolica. Essa è normalmente progettata e fornita da un produttore diverso da quello che effettivamente costruisce il generatore eolico. Poiché le condizioni operative incontrate da una gearbox in un generatore eolico sono significativamente diverse da quelle nella maggior parte delle applicazioni, è imperativo che il progettista della turbina comprenda le gearbox e che il progettista delle gearbox conosca le turbine eoliche. L'esperienza ha dimostrato che scatole degli ingranaggi sottodimensionate sono la fonte principale di problemi operativi nei generatori eolici.

4.1.2 Tipologie

Tutte le scatole degli ingranaggi hanno alcune similitudini: sono costituite essenzialmente da una scatola, alberi, ruote, cuscinetti e guarnizioni. Due sono i tipi fondamentali di gearbox utilizzate nelle applicazioni delle turbine eoliche: gearbox ad albero parallelo e gearbox epicicloidali.

In scatole del cambio ad albero parallelo, le ruote vengono montate su due o più alberi paralleli. Questi alberi sono supportati da cuscinetti montati nella scatola. In una scatola monostadio ci sono due alberi, un

albero lento ed un albero ad alta velocità. Entrambi questi alberi, che sono paralleli, passano attraverso la scatola. Uno di loro viene collegato all'albero principale o al rotore e l'altro viene collegato al generatore. Ci sono anche due ruote di dimensioni diverse, ciascuna su un albero, con quella più grande montata sull'albero lento. Il rapporto tra il diametro primitivo delle ruote è inversamente proporzionale al rapporto tra le velocità di rotazione.

Vi è un limite pratico alla dimensione del rapporto delle due ruote che possono essere utilizzate in un singolo stadio per una scatola del cambio ad albero parallelo. Per questo motivo, riduttori con grandi rapporti di velocità utilizzano più ruote e più alberi. Questi ingranaggi poi costituiscono un treno di ingranaggi.

Una scatola del cambio a due stadi, per esempio, presenta tre alberi: un albero di ingresso (a bassa velocità), un albero di uscita (ad alta velocità) e un albero intermedio. Sono presenti ruote sull'albero intermedio, quella più piccola è azionata dall'albero a bassa velocità. La più grande invece di queste ruote trasmette il moto all'albero ad alta velocità.

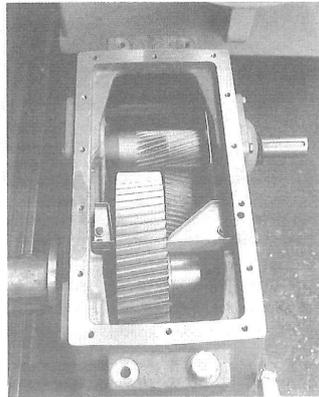


FIG. 5 Scatola degli ingranaggi ad alberi paralleli

I riduttori epicicloidali hanno un numero significativo di differenze rispetto ai riduttori ad albero parallelo. Tra le più evidenti, gli alberi di ingresso e di uscita sono coassiali. In più, ci sono più coppie di ruote dentate ingrananti nello stesso momento, così i carichi di ciascun ingranaggio sono ridotti. Questo rende i riduttori epicicloidali relativamente leggeri e compatti. Un tipico riduttore epicicloidale è illustrato nella figura:

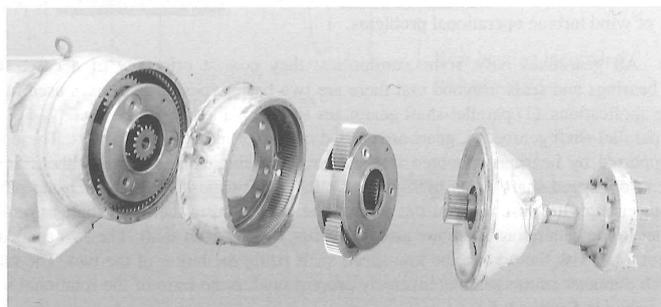


FIG. 6 Vista esplosa di un riduttore epicicloidale a due stadi

Nei riduttori epicicloidali, l'albero lento, supportato da cuscinetti presenti nella scatola, è connesso rigidamente ad un portasatellite, che collega tre piccole ruote identiche, note come pianeti. Queste ruote sono montate sull'albero corto e i cuscinetti sono liberi di girare. Questi pianeti ingranano con una ruota che presenta un diametro maggiore e dentata internamente e con una ruota di diametro minore. Quando l'albero a bassa velocità e il portasatellite ruotano, l'ingranamento dei pianeti con la corona dentata porta i pianeti a ruotare ad una velocità maggiore rispetto a quella del portasatellite. L'ingranamento dei pianeti con la ruota principale porta alla sua messa in rotazione. La ruota principale guida l'albero ad alta velocità, con il quale è strettamente connesso. L'albero principale è supportato da cuscinetti montati nella scatola. Prima della rotazione, come è possibile vedere nella figura 7, la ruota principale e i pianeti satelliti ingranano al punto B, mentre i pianeti satelliti ingranano al punto A con la ruota ad anello. Dopo la rotazione i corrispondenti punti di ingranamento diventano A1 e B1. I centri di rotazione della ruota principale e dei pianeti sono in O e in OP rispettivamente. Il rapporto di velocità per la configurazione mostrata in figura è:

$$\frac{\omega_{HSS}}{\omega_{LSS}} = 1 + \frac{D_{ring}}{D_{sun}}$$

dove ω_{HSS} è la velocità dell'albero di trasmissione veloce, ω_{LSS} è la velocità dell'albero di trasmissione lento, D_{ring} è il diametro della ruota satellite e D_{sun} il diametro della ruota principale.

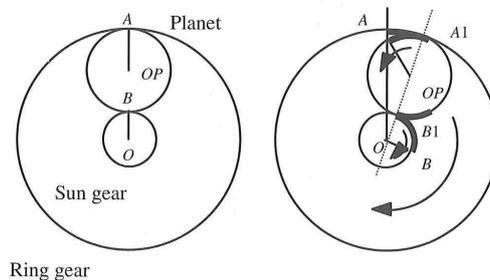


FIG. 7 Relazione tra le ruote nel rotismo epicicloidale

Analogamente alle gearbox ad albero parallelo c'è un limite nel rapporto di velocità che può essere raggiunto da una singola fase di un sistema epicicloidale. Per raggiungere un maggior rapporto di velocità, più stadi sono posti in serie. Quando ci sono più stadi in serie, in generale la velocità è il prodotto delle singole velocità di ogni stadio. Le ruote in molte scatole degli ingranaggi dei generatori eolici sono di tipo cilindrico, ma è possibile trovare anche ruote elicoidali. I cuscinetti possono essere a sfere, a rulli o a rulli conici, e la tipologia varia a seconda dei carichi applicati.

Considerazioni sulla progettazione della scatola degli ingranaggi

Ci sono molti fattori da considerare nella progettazione e nella scelta di una scatola degli ingranaggi e questi includono: tipo base (ad albero parallelo o epicicloidale); scatola degli ingranaggi separata e cuscinetti sull'albero principale oppure una scatola del cambio integrata; rapporto di velocità; numero di stadi; peso e costi della scatola del cambio; carichi applicati alla scatola del cambio; lubrificazione; effetti di funzionamento intermittente; rumore.

Le gearbox dei generatori eolici in entrambi i casi hanno i componenti separati, o combinati con altri componenti. In quest'ultimo caso sono note come scatole del cambio integrate o parzialmente integrate. Per esempio, in un certo numero di generatori con la scatola del cambio parzialmente integrata, l'albero principale e i cuscinetti dell'albero principale sono integrati con il resto della gearbox. Una scatola del cambio totalmente integrata è quella in cui la scatola rappresenta il telaio principale della turbina eolica. Il rotore è collegato al suo albero a bassa velocità. Il generatore è accoppiato all'albero ad alta velocità ed è anche imbullonato direttamente alla scatola. Parte del sistema di imbardata è integrata nella parte bassa della scatola.

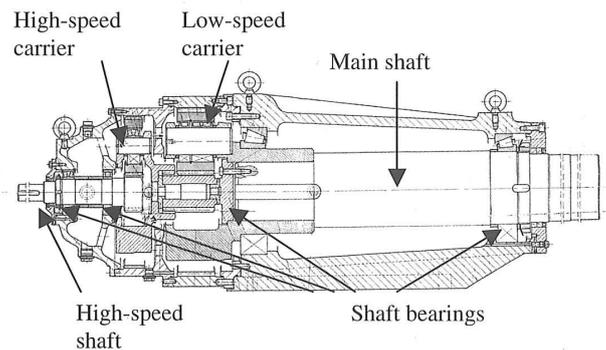


FIG. 8 Scatola degli ingranaggi epicicloidali parzialmente integrata

Il rapporto di velocità della scatola della scatola degli ingranaggi è direttamente correlato alla velocità di rotazione desiderata del rotore e alla velocità del generatore. Come indicato precedentemente la velocità del rotore è determinata principalmente da considerazioni aerodinamiche. La velocità del generatore è nella maggior parte dei casi di 1800 giri al minuto in reti da 60 Hz o di 1500 giri al minuto in reti da 50 Hz, sebbene altri valori di velocità sono possibili. Per esempio, una turbina eolica con un rotore progettato per operare a 60 giri al minuto e un generatore a 1800 giri al minuto necessiterebbe di una scatola del cambio con un rapporto di velocità di 30:1.

Il numero di fasi in una scatola degli ingranaggi è generalmente di secondaria importanza per la progettazione di una turbina eolica, risulta invece di primaria importanza in quanto influisce nella complessità, nella dimensione, nel peso e nei costi della scatola stessa.

Il maggior numero di fasi che possono trovarsi all'interno riguardano i componenti interni, quali ruote, cuscinetti ed alberi. Generalmente, ogni fase presente non fornirà un rapporto di velocità maggiore di 6:1. I rapporti di velocità di fasi multiple disposte in serie comportano un rapporto di velocità totale dato dal prodotto dei singoli rapporti di ogni fase. Per esempio, un rapporto di velocità di 30:1 può essere ottenuto dal prodotto di due rapporti di velocità, 6:1 e 5:1, di due fasi poste in serie.

Il peso di una scatola del cambio aumenta drasticamente con l'aumentare della potenza della turbina. Infatti, il peso della gearbox scalerà approssimativamente con il cubo del raggio, così come il peso del rotore. Poiché i rotismi epicicloidali sono più leggeri che quelli ad albero parallelo, è più vantaggioso utilizzare i primi in termini di peso, sebbene a causa della loro maggiore complessità costino di più.

I carichi che la scatola degli ingranaggi deve sostenere sono dovuti fondamentalmente a quelli imposti dal rotore. Questo comprenderà almeno la coppia dell'albero principale e potrebbe includere anche il peso del rotore e di altri vari carichi dinamici, a seconda del livello di integrazione della scatola del cambio con l'albero principale e dei cuscinetti. I carichi sono allo stesso tempo imposti dal generatore, sia durante il funzionamento normale che all'avvio, e anche da qualsiasi freno meccanico posto dalla parte ad alta velocità della scatola del cambio. Per un periodo prolungato di tempo la scatola, così come il rotore, sperimenterà alcuni carichi che sono relativamente stabili, altri carichi che variano periodicamente o in modo casuale, e altri ancora che sono transitori. Questi contribuiranno a determinare danni a fatica e ad usura sui denti delle ruote, sui cuscinetti e sui sigilli.

La lubrificazione costituisce un aspetto significativo nell'operatività della gearbox.

Gli oli devono essere selezionati in maniera tale da minimizzare l'usura sui denti delle ruote e sui cuscinetti, e funzionare adeguatamente nelle condizioni ambientali esterne in cui opererà la turbina. In alcuni casi potrebbe essere necessario provvedere al filtraggio o al raffreddamento attivo dell'olio. In qualsiasi evento, dovranno essere prelevati periodicamente campioni di olio per valutarne lo stato e controllare la presenza di segni di consumo interno.

Attività intermittenti, situazione comune per tutti i generatori eolici, possono avere un impatto significativo sulla vita della gearbox. Quando la turbina non è in movimento, l'olio potrebbe asciugarsi dalle ruote e dai cuscinetti, determinando una lubrificazione insufficiente quando la turbina si mette in funzione. Con temperature fredde potrebbe presentare una alta viscosità fino a quando la gearbox non si riscalda. In tali condizioni le turbine potrebbero trarre vantaggio ad avere dei riscaldatori di olio. La condensazione dell'umidità potrebbe accelerare la corrosione. Quando il rotore è fermo, a seconda della natura e della posizione del freno dell'albero, i denti degli ingranaggi potrebbero muoversi leggermente avanti e indietro. Ovviamente il movimento è limitato dal contraccolpo, ma questo potrebbe essere abbastanza da risultare dannoso ai denti per l'impatto e l'eccessiva usura.

L'insieme degli ingranaggi inoltre può essere una fonte di rumore. La quantità del rumore è in funzione di molte variabili, tra le tante: il tipo di scatola, i materiali con i quali sono state ottenute le ruote e come sono state tagliate. La progettazione di scatole per una produzione a rumore minimo è attualmente un settore di notevole interesse.

Il sistema di imbardata

Funzione

Con molte poche eccezioni, tutti gli aerogeneratori ad asse orizzontale devono essere in grado di ruotare ed allinearsi verso la direzione del vento. Alcune turbine utilizzano un sistema attivo dell'imbardata come mezzo di regolazione della potenza. In ogni caso, deve essere previsto un meccanismo che consenta all'imbardata di prendere posizione, e di farlo a una velocità abbastanza lenta in modo da evitare grandi forze giroscopiche.

Tipologie

Ci sono due tipi di sistemi di imbardata: ad imbardata attiva e ad imbardata libera. Le turbine con imbardata attiva sono macchine che funzionano controvento. Utilizzano un motore per allineare attivamente la turbina. Le turbine che invece presentano una imbardata libera sono macchine che funzionano sottovento e fanno affidamento sull'aerodinamica del rotore per allineare la turbina.

Descrizione di funzionamento

Indipendentemente dal tipo di sistema di imbardata tutti gli aerogeneratori ad asse orizzontale hanno alcuni tipi di cuscinetti di imbardata. Questi cuscinetti devono essere in grado di trasportare il peso della parte principale della turbina, così come trasmettere i carichi assiali alla torre.

In una turbina con un sistema di imbardata attiva, i cuscinetti di imbardata includono ruote con una dentatura attorno la loro circonferenza. Tale dentatura ingrana con il pignone montato sull'unità di imbardata, in modo che possa essere guidata verso qualsiasi direzione. L'unità di imbardata normalmente consiste di un motore elettrico, riduttori di velocità ed un pignone. La velocità deve essere ridotta in modo tale che sia bassa anche la velocità di imbardata, cosicché venga trasferita la giusta coppia da un piccolo motore. Storicamente, alcune unità di imbardata hanno utilizzato piccoli rotor eolici montati perpendicolarmente al rotore principale. Questo aveva il vantaggio di non dover richiedere una fonte di energia o di controllo separato. Tuttavia, data la scarsa aderenza di piccoli rotor eolici, questa soluzione oggi non vien più attuata.

Un problema incontrato con il sistema ad imbardata attiva è stato la rapidità di usura o la rottura dell'unità di imbardata dovuta ai piccoli movimenti continuativi dell'imbardata nel generatore eolico. Questo è possibile a causa del gioco tra il pignone dell'unità di imbardata e la ruota centrale. Il moto risulta dannoso in alcuni cicli di carico per effetto dell'ingranaggio tra le ruote. Per ridurre questi cicli viene utilizzato un freno d'imbardata nei sistemi ad imbardata attiva. Questo freno è utilizzato ogni qualvolta la turbina non sta imbardando e viene rilasciato non appena la turbina inizia ad imbardare.

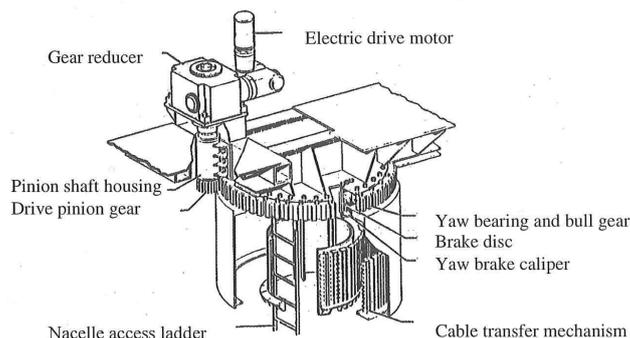


FIG. 9 Tipico sistema di imbardata con freno

Il moto dell'imbardata in un sistema con imbardata attiva è controllato utilizzando come input un errore d'imbardata. Quest'ultimo è monitorato mediante un sensore del vento montato sull'aerogeneratore. Quando l'errore di imbardata è fuori il limite fissato dal range per un periodo più o meno lungo, il sistema di guida è attivato, e la turbina si muove nella giusta direzione.

Nelle turbine con imbardata libera il sistema di imbardata è molto più semplice. Spesso non c'è niente in più che solo un cuscinetto di imbardata. Alcune turbine, tuttavia, montano un ammortizzatore per l'imbardata. Tali ammortizzatori sono utilizzati per rallentare la velocità dell'imbardata. Contribuendo a ridurre i carichi giroscopici. Sono molto utili per macchine che hanno un momento di inerzia polare relativamente piccolo attorno all'asse di imbardata.

5. TIPOLOGIE E CAPACITA' DEGLI IMPIANTI EOLICI

5.1 I parchi eolici

I parchi eolici, in inglese “wind farm” sono un insieme di aerogeneratori, che producono energia elettrica sfruttando l'energia del vento, e sono localizzati in un territorio delimitato e interconnessi tra loro mediante un collegamento a media tensione (generalmente 34,5 kV) e con un sistema di comunicazione. L'energia a media tensione viene poi convertita in alta tensione tramite un trasformatore in una sottostazione elettrica di trasformazione ed immessa nella rete elettrica di trasmissione in corrispondenza di una cabina primaria.

La generazione di energia elettrica varia in funzione del vento e della capacità generativa degli aerogeneratori, oltre che dal loro numero e dal tipo di aerogeneratori installati. Le potenze nominali generate dall'impianto variano da installazione a installazione.

Un parco eolico può essere on-shore (sulla terraferma) oppure off-shore (sul mare). I primi sono posti tipicamente in zone aperte o su rilievi collinari o montuosi, i secondi sul mare vicino a zone costiere.

Ad oggi, i maggiori parchi eolici sono localizzati negli Stati Uniti. Nella classifica dei parchi eolici le prime 18 posizioni, in termini di potenza nominale installata, sono ad appannaggio degli USA, ad eccezione della settima posizione, il Dabancheng Wind Farm, situato in Cina, e con una capacità installata di 500 MW.

Il più grande sito eolico attivo è il Roscoe Wind Farm, in USA, con 781,5 MW di potenza nominale installata. Il Gansu Wind Farm, in Cina, con ben 5.160 MW installati, rappresenta invece il più grande insieme di parchi multipli per dimensione e produzione di energia elettrica e verrà ampliato fino a 20.000 MW installati da qui a qualche anno.

5.2 La capacità eolica

5.2.1 Capacità eolica nel mondo

L'energia eolica è oggi presente in più di 80 paesi. Ad oggi ci sono 24 paesi con più di 1.000 MW installati e 9 paesi con più di 5.000 MW installati.

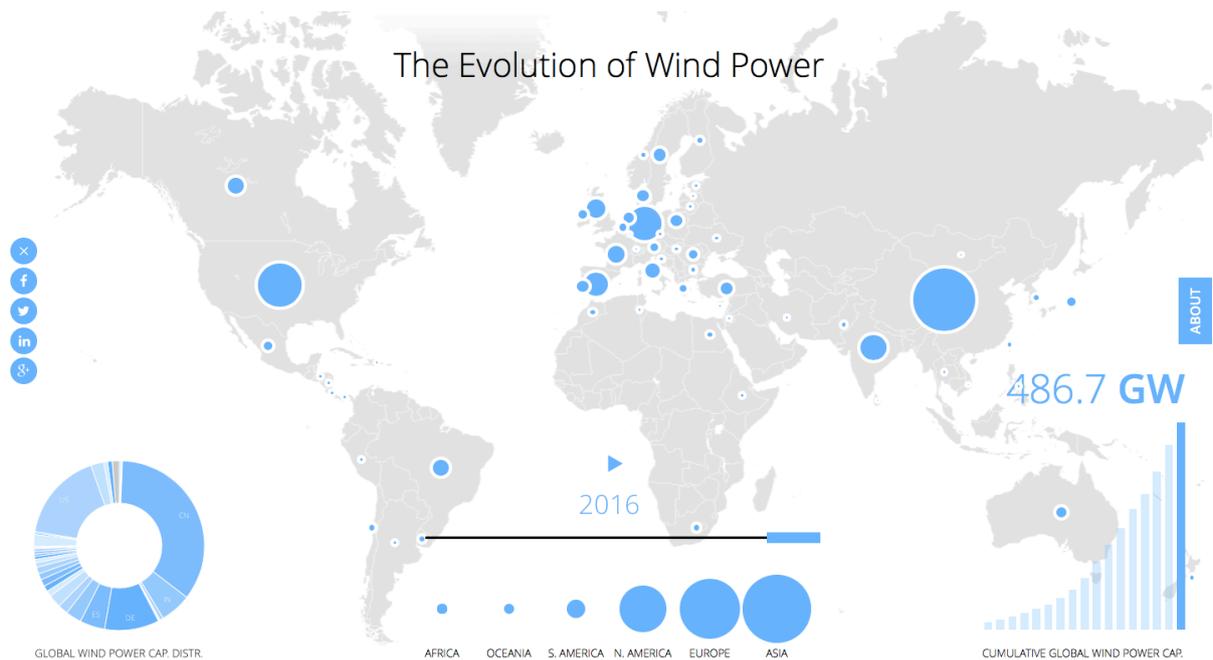


FIG. 10 Distribuzione capacitativa di energia eolica nel mondo

La mappa mostra la capacità cumulativa installata per paese, continente e del mondo. Dando uno sguardo più da vicino si può vedere quanto è successo negli ultimi dodici mesi.

Ancora una volta, come succede ininterrottamente dal 2010, la Cina si è dimostrata leader assoluto per capacità di energia eolica installata, segnando nel solo 2016 una capacità eolica aggiuntiva di 23.328 MW. Con 168.690 MW di capacità installata totale, la Cina rimane il più grande mercato al mondo per sviluppo dell'energia eolica.

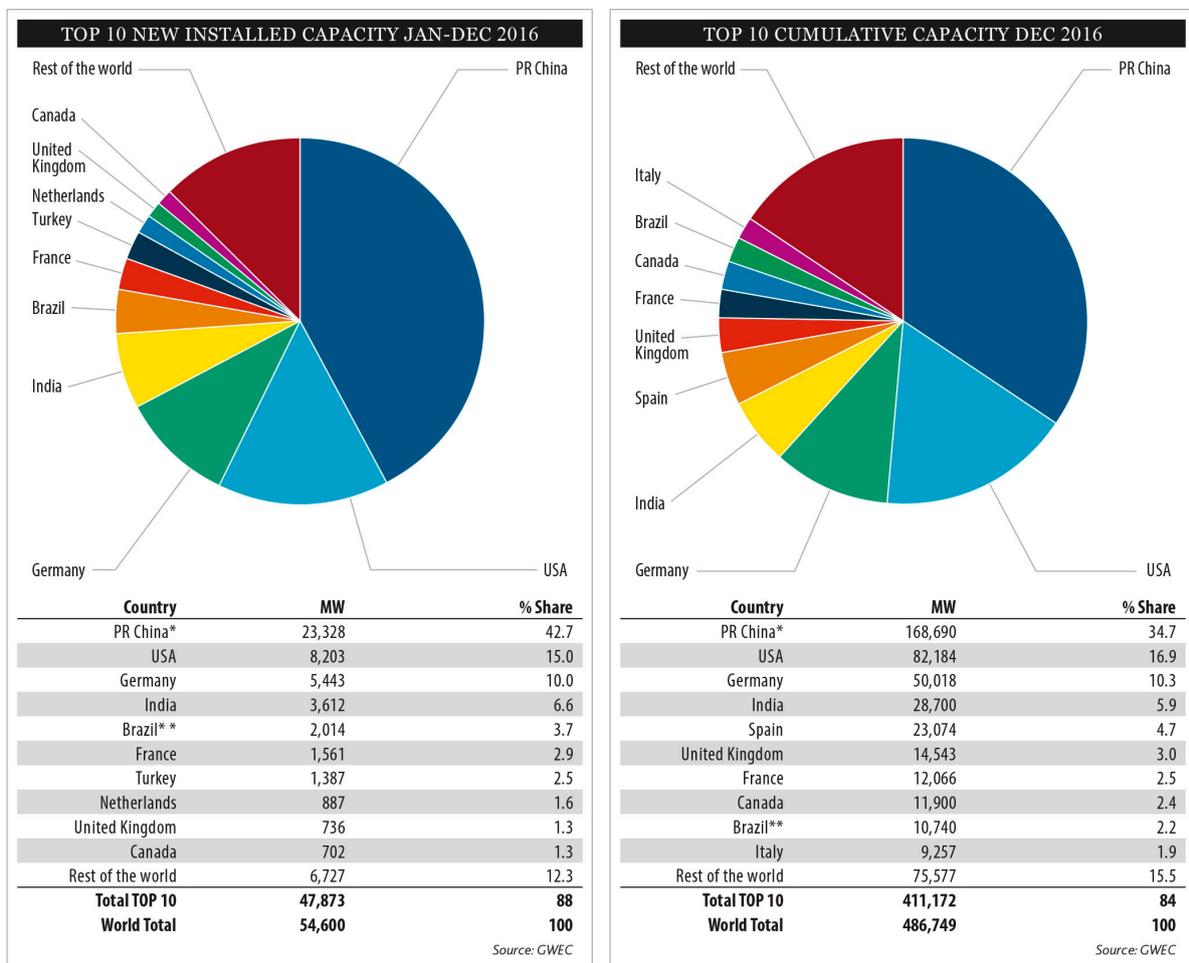
Una new entry nel mondo asiatico sulla mappa del 2016 è il Pakistan, che ha quasi raddoppiato la sua capacità eolica installata: 591 MW. Un altro paese asiatico in rapida evoluzione è la Corea del Sud, con un aumento del 19% rispetto allo scorso anno arrivando a 1.031 MW di capacità installata di energia eolica nel paese tanto da renderla la quarta nazione dell'Asia per uso di energia eolica.

La Francia dopo aver avuto un anno eccellente nel 2015 con 1.073 MW installati è riuscita a raddoppiare la sua crescita nel 2016 arrivando a quasi 12 GW di energia eolica super-pulita totale. A circa 1000 chilometri a sud della Francia, il Sud Africa ha avuto il vento in poppa per tutto il 2016, raggiungendo 1.471 MW di potenza installata, vale a dire un aumento del 28% rispetto all'anno precedente.

Il 2016 è stato anche un grande anno per l'America Latina: il Brasile ha mantenuto la sua crescita impressionante e costante con più di 2 GW installati, per un totale di 10.740 MW e tanto in Cile quanto in Uruguay la capacità eolica installata è cresciuta di oltre il 30%.

Tra le nazioni che più si appoggiano sull'energia eolica, Germania e Stati Uniti hanno mantenuto una crescita costante del 10% nel 2016 per potenza installata. In particolare nel 2016, la Germania ha superato la soglia di 50 GW di capacità eolica installata.

Altri paesi che hanno registrato una crescita significativa della capacità di energia eolica installata l'anno scorso sono il Cile che segna +34,5% a 1.424 MW; l'Uruguay in crescita del 30% raggiungendo quota 1210 MW; il Perù +39% a 241 MW; la Turchia in crescita del 23% a 6081 MW e i Paesi Bassi con il 20,5% a 4328 MW.



FIGG. 11, 12 Top ten dei Paesi nel mondo per nuova capacità installata nel 2016 e per capacità installata cumulata al 2016

Nel solo 2016 sono stati installati oltre 54 GW, portando la capacità complessiva a circa 487 GW, con al comando del mercato globale la Cina, seguita da Stati Uniti, Germania, India e Spagna. Inoltre ci sono state forti proiezioni in avanti per Francia, Turchia e Paesi Bassi. Tuttavia il mercato globale dell'energia eolica ha rallentato la sua corsa rispetto al 2015, e ciò è dimostrato anche dalla super potenza cinese.

Le sue installazioni nel 2016 si sono fermate a 23.328 MW contro gli oltre 30 GW del 2015. Di contro però la Cina ha puntato la Danimarca e messo la freccia per superarla nel 2017 sul versante dell'offshore e posizionarsi dietro a Regno Unito e Germania.

GLOBAL INSTALLED WIND POWER CAPACITY (MW) – REGIONAL DISTRIBUTION				
		Cumulative (End 2015)	New Installed (End 2016)	Cumulative (End 2016)
AFRICA & MIDDLE EAST				
	South Africa	1,053	418	1,471
	Egypt	810	-	810
	Morocco	787	-	787
	Ethiopia	324	-	324
	Tunisia	245	-	245
	Jordan	119	-	119
	Other ¹	150	-	150
	Total	3,488	418	3,906
ASIA				
	PR China*	145,362	23,328	168,690
	India	25,088	3,612	28,700
	Japan	3,038	196	3,234
	South Korea	835	201	1,031
	Taiwan	647	35	682
	Pakistan	308	282	591
	Thailand	223	-	223
	Philippines	216	-	216
	Other ²	253	25	276
	Total	175,970	27,680	203,643
EUROPE				
	Germany	44,941	5,443	50,018
	Spain	23,025	49	23,074
	UK	13,809	736	14,543
	France	10,505	1,561	12,066
	Italy	8,975	282	9,257
	Sweden	6,029	493	6,520
	Turkey	4,694	1,387	6,081
	Poland	5,100	682	5,782
	Portugal	5,050	268	5,316
	Denmark	5,064	220	5,228
	Netherlands	3,443	887	4,328
	Romania	2,976	52	3,028
	Ireland	2,446	384	2,830
	Austria	2,404	228	2,632
	Belgium	2,218	177	2,386
	Rest of Europe ³	7,220	1,077	8,241
	Total Europe	147,899	13,926	161,330
	of which EU-28 ⁴	141,721	12,491	153,729
LATIN AMERICA & CARIBBEAN				
	Brazil**	8,726	2,014	10,740
	Chile	911	513	1,424
	Uruguay	845	365	1,210
	Argentina	279	-	279
	Costa Rica	278	20	298
	Panama	270	-	270
	Peru	148	93	241
	Honduras	176	-	176
	Dominican Republic	86	50	135
	Caribbean ⁵	164	-	164
	Others ⁶	335	24	359
	Total	12,218	3,079	15,296
NORTH AMERICA				
	USA	73,991	8,203	82,184
	Canada	11,219	702	11,900
	Mexico	3,073	454	3,527
	Total	88,283	9,359	97,611
PACIFIC REGION				
	Australia	4,187	140	4,327
	New Zealand	623	-	623
	Pacific Islands	13	-	13
	Total	4,823	140	4,963
	World total	432,680	54,600	486,749

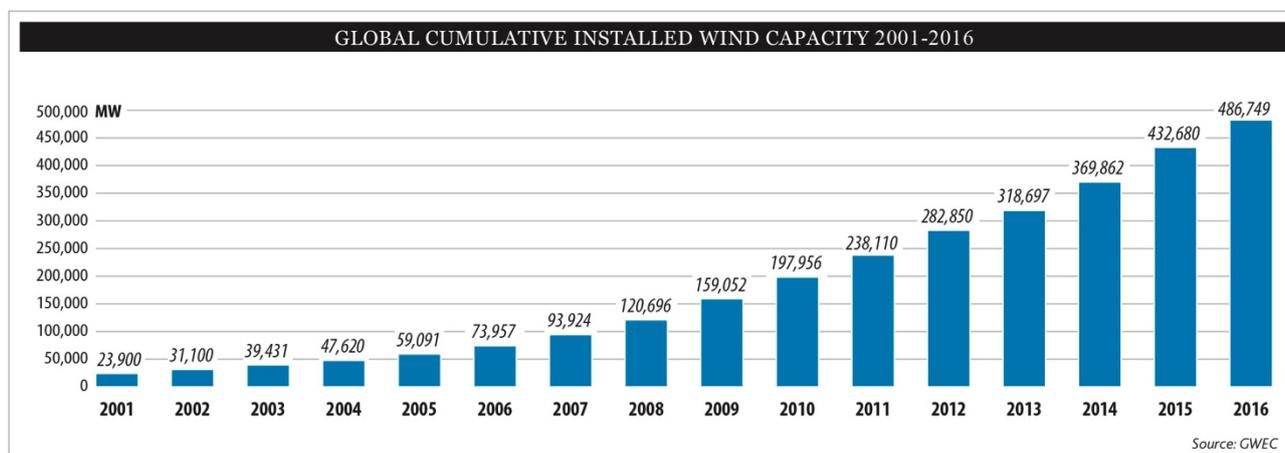
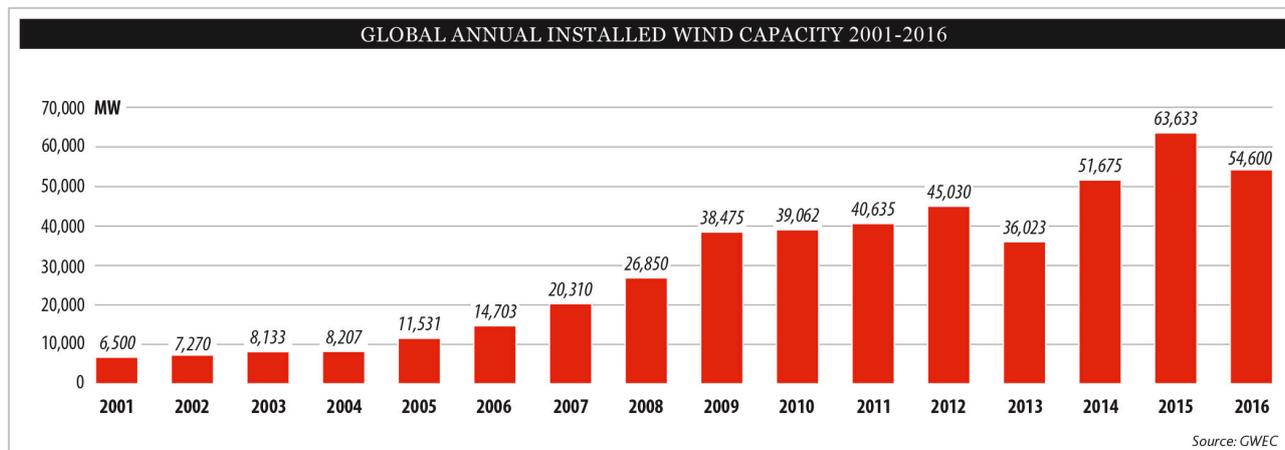
Source: GWEC

¹ Algeria, Cape Verde, Iran, Israel, Kenya, Libya, Nigeria
² Bangladesh, Mongolia, Sri Lanka, Vietnam
³ Bulgaria, Cyprus, Czech Republic, Estonia, Finland, Faroe Islands, FYROM, Hungary, Iceland, Latvia, Liechtenstein, Lithuania, Luxembourg, Malta, Norway, Romania, Russia, Switzerland, Slovakia, Slovenia, Ukraine
⁴ Austria, Belgium, Bulgaria, Cyprus, Croatia, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, UK
⁵ Caribbean: Aruba, Bonaire, Curacao, Cuba, Dominica, Guadalupe, Jamaica, Martinica, Granada, St. Kitts and Nevis
⁶ Bolivia, Colombia, Ecuador, Guatemala, Nicaragua, Venezuela

Note: Project decommissioning of approximately 520 MW and rounding affect the final sums
* Provisional figures
** Projects fully commissioned, grid connections pending in some cases

FIG. 12 Distribuzione per continente per capacità energetica installata

Da una panoramica degli ultimi 15 anni è possibile vedere come dopo una costante crescita fino al 2012 si è avuto un andamento altalenante per quanto riguarda le nuove installazioni nel mercato globale.



FIGG. 13, 14 Capacità installata globale per anno e capacità installata cumulata dal 2001 al 2016

Questo per effetto in prevalenza del mercato cinese, come è possibile notare dal seguente grafico:

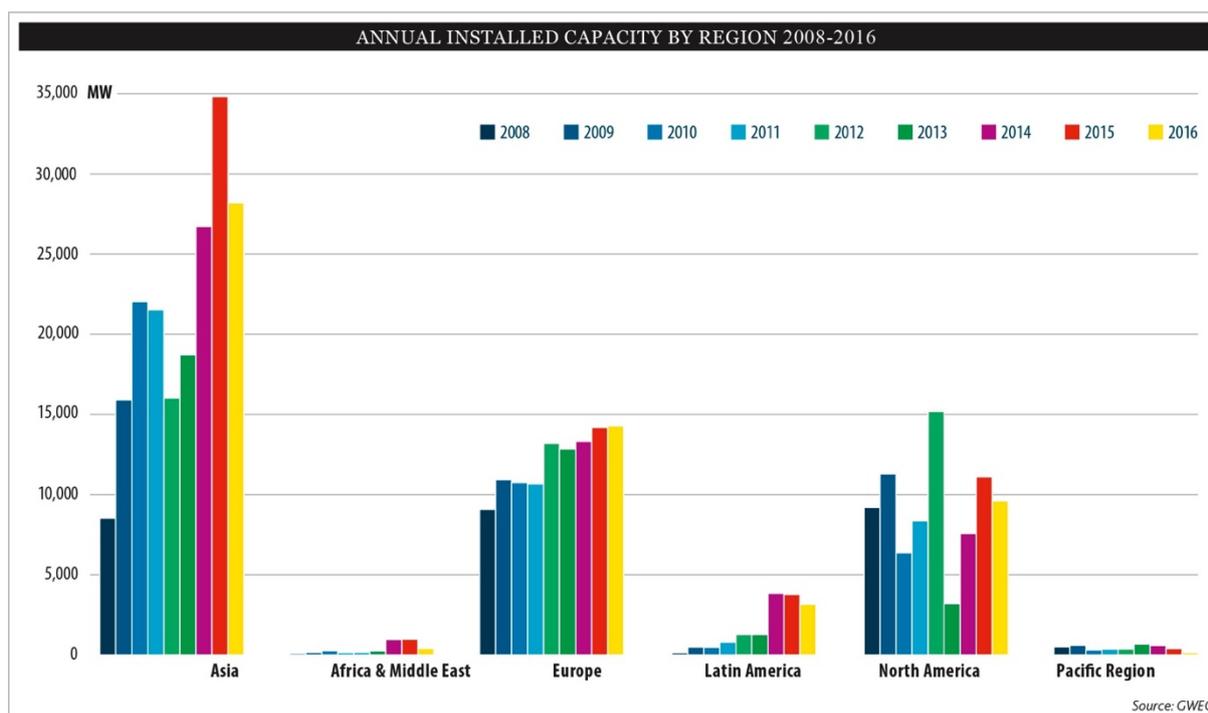


FIG. 15 Capacità installata annualmente per continente dal 2008 al 2016

5.2.2 Capacità eolica in Europa

L'energia eolica ha rappresentato il 51% della nuova potenza installata nel 2016 in Europa, connettendo in totale 12,5 GW alla rete, distribuiti tra i 28 Stati Membri dell'UE, di cui 10.923 MW onshore e 1.567 MW offshore.

Il totale della capacità eolica installata oggi in Europa si attesta sui 153,7 GW sui 486,7 GW totali. L'energia eolica ha coperto il 10,4% dei fabbisogni di energia elettrica lo scorso anno. La Germania ha installato la quota maggiore di nuova energia eolica, ovvero il 44% del totale dell'UE. Cinque stati membri hanno raggiunto l'anno record: la Francia, i Paesi Bassi, la Finlandia, l'Irlanda e la Lituania. Tutte le energie rinnovabili insieme hanno aggiunto l'86% di nuova potenza installata nel 2016, ovvero 21,1 GW su 24,5 GW. In Italia installati solo 282,5 MW pari ad un flusso di investimento pari a oltre 350 milioni di euro.

Gli investimenti in nuovi impianti eolici tra onshore e offshore hanno raggiunto il record di 27,5 miliardi di euro. L'eolico off-shore è aumentato del 39% ogni anno fino a raggiungere 18,2 miliardi di euro, mentre per l'onshore gli investimenti sono diminuiti del 29% raggiungendo quota 9,3 miliardi di euro.

5.2.3 Capacità eolica in Italia

Oggi l'eolico in Italia ha superato i 9.000 MW di potenza installata e questo consente di produrre energia elettrica pari a 14.6 TWh, che corrispondono a circa il 6% dei consumi totali di energia elettrica. Questa produzione permette di risparmiare annualmente 21 milioni di barili di petrolio, entro il 2030 dovrà essere aumentata fino a coprire oltre il 10% dei consumi nazionali di energia elettrica e nel 2050 potrebbe essere raddoppiata creando oltre 80mila posti di lavoro dei quali un terzo direttamente occupati nel settore industriale e due terzi nell'indotto. Le regioni italiane che maggiormente contribuiscono alla produzione di energia eolica sono la Puglia, la Sicilia, la Campania, la Calabria e la Sardegna. Il potenziale di crescita dell'eolico in Italia è ancora molto alto e per questo è necessario predisporre ogni elemento utile affinché possa essere sfruttato a pieno.

5.3 L'energia eolica offshore

Il potenziale dell'energia eolica offshore è enorme. Si potrebbe soddisfare più di sette volte la domanda di energia dell'Europa e fino a quattro volte la domanda di energia degli Stati Uniti.

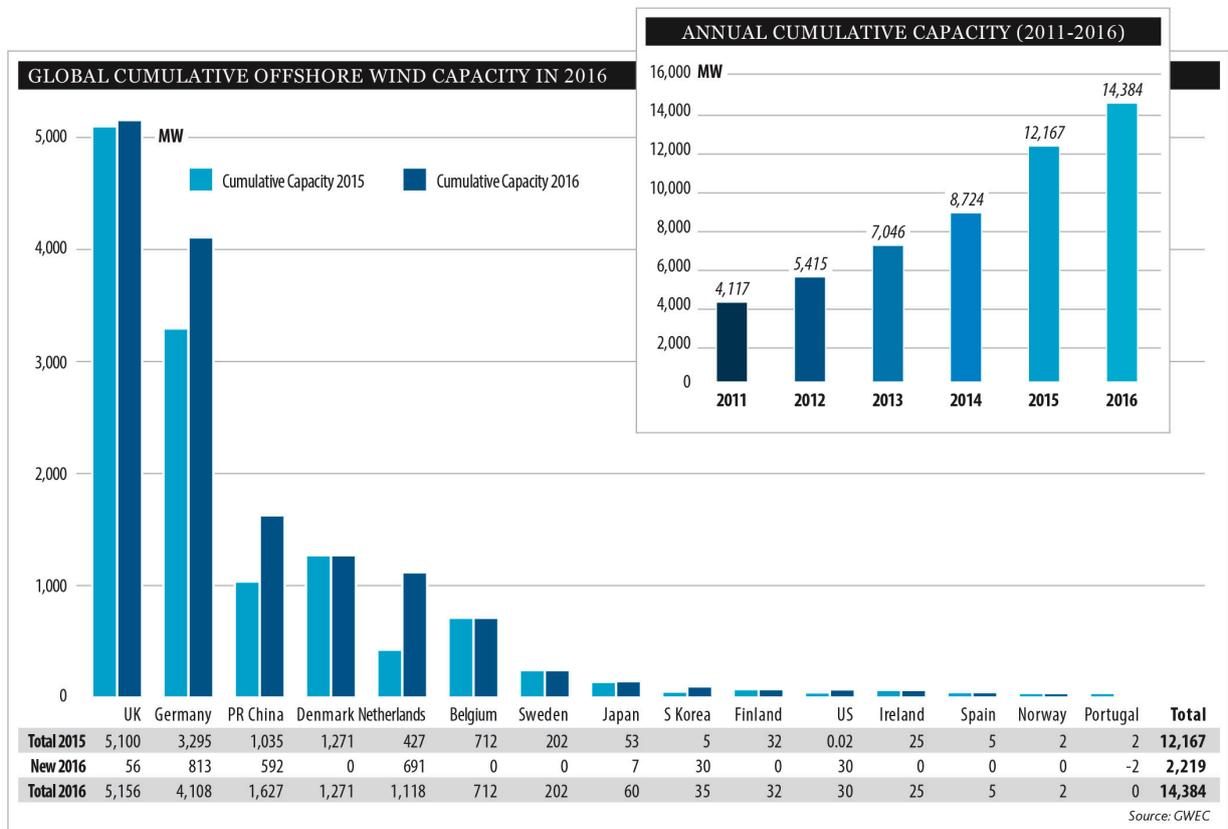
L'eolica offshore è una tecnologia innovativa relativamente nuova, tale da poter ridurre i costi e migliorare la tecnologia del settore nel breve termine. Questa interessante tecnologia è già incorporata nella pianificazione energetica del governo in tutto il mondo.

Più del 91% (11.028 MW) di energia eolica offshore al mondo è attualmente installata al largo del nord Europa, nei mari del Nord, Baltico e Irlandese, oltre che nel Canale della Manica. Tuttavia, i governi al di fuori dell'Europa hanno fissato obiettivi ambiziosi per lo sviluppo dell'offshore tanto che questa nuova tecnologia sta cominciando a decollare in Cina, Giappone, Corea del Sud, Taiwan e Stati Uniti. Il consorzio FOWIND guidato dal GWEC sta sviluppando una roadmap per l'eolico offshore per mercati emergenti come l'India e il Brasile, che hanno manifestato interesse per il futuro sviluppo del vento in mare aperto.

L'eolico offshore è una componente essenziale (di obiettivo vincolante dell'Europa di fonte) del 20% del consumo finale di energia da fonti rinnovabili, e la Cina si è posta obiettivi ambiziosi per le installazioni a largo delle sue coste entro il 2020. Gli Stati Uniti hanno eccellenti risorse eoliche in mare aperto e molti altri progetti sono in fase di sviluppo.

I principali vantaggi dell'eolico offshore sono: il fatto che la risorsa del vento in mare è in genere molto più grande, tale da generare più energia da un minor numero di turbine; la maggior parte delle più grandi città del mondo si trovano nei pressi di una costa: l'eolico offshore è quindi adatto per lo sviluppo su larga scala in prossimità dei principali centri di domanda, evitando la necessità di lunghe linee di trasmissione sulla

terraferma; ha senso costruire parchi eolici offshore in regioni costiere densamente popolate, con alti valori di proprietà, perché alti valori di proprietà rendono lo sviluppo di parchi eolici onshore costoso e tale da portare ad un'aspra opposizione dell'opinione pubblica.



FIGG. 16, 17 Capacità globale cumulata per gli impianti offshore nel 2016 e capacità cumulata per anno dal 2011 al 2016

Sebbene gli esperti del settore eolico parlano spesso dell'offshore, esso oggi rappresenta solo il 3% della capacità installata globale. Nel 2016 sono stati aggiunti 2.217 MW di nuova capacità offshore, portando il totale a 14.384 MW.

Mentre l'elettricità da impianti eolici onshore è già più conveniente rispetto all'energia elettrica convenzionale per un numero sempre crescente di mercati, i costi relativamente elevati rimangono la sfida più grande per lo sviluppo dell'energia eolica offshore. Tuttavia, secondo uno studio commissionato da Ernest & Young nel 2015, il costo dell'energia eolica offshore potrebbe essere ridotto a 100 euro per MWh entro il 2020 e addirittura a 90 euro per MWh entro il 2030, al termine del quale la capacità cumulativa installata nelle acque europee si prevede possa aver raggiunto 23,5 GW.

Le azioni chiave per ridurre i costi includono: la distribuzione delle turbine più grandi per aumentare la cattura di energia (9% di risparmio); favorire una maggiore concorrenza (7%); la commissione di nuovi progetti in grado di mantenere volume (7%) e di affrontare le sfide della supply-chain (3%).

Ad oggi, la dimensione media di una turbina offshore è di 4,2 MW, la profondità dell'acqua media cui essa è installata è di 27,1 metri e la distanza media dalla costa è di 43,3 km. La dimensione media di un parco eolico off-shore connesso alla rete nel 2015 era 337,9 MW.

5.3.1 L'offshore in Europa

Nel 2016, il 70% circa di nuova capacità eolica offshore è venuta dall'Europa. L'eolico offshore rappresentava il 24% del totale delle installazioni di energia eolica in tutta l'Unione Europea nel 2015, rispetto al 13% in quota parte all'offshore nel totale delle installazioni del 2014.

Nel complesso 419 nuove turbine sono state erette nel 2015. Anche per la prima volta delle turbine offshore sono state dismesse, per un totale di 7 turbine tra il Regno Unito e la Svezia, con un conseguente incremento netto di 412 turbine nel 2015. Una dismissione di turbine offshore è avvenuta inoltre anche nel 2016 (-2 MW di capacità installata in Portogallo).

L'eolico offshore in Europa vede in testa il Regno Unito e a seguire la Germania; un po' più distaccate Danimarca e Paesi Bassi, questi ultimi hanno segnato nel solo 2016 un +691 MW di nuova capacità installata.

5.3.2 L'offshore in Italia

L'Italia dispone di ben 11.700 chilometri quadrati di superficie marina adatta all'eolico offshore. Le zone ideali sono soprattutto quelle dell'Italia centro-meridionale, con in testa la Puglia.

In vista, in Italia, non vi è alcun allestimento di impianti eolici offshore, malgrado siano stati presentati più di 15 progetti tra il 2006 e il 2013 per impianti al largo delle coste italiane, uno soltanto ha ricevuto l'ok del Consiglio dei Ministri dopo la bocciatura da parte di Regione, Comuni e ministero dei Beni culturali.

In Italia non ci sono regole per valutare i progetti, inoltre in mare non valgono le linee guida approvate per gli impianti a terra. L'assenza di una normativa chiara è tale che una soprintendenza può bloccare un progetto eolico off-shore anche se posizionato a diversi chilometri dalla costa. Almeno in teoria vi sono tutte le condizioni per realizzare interventi eolici in Italia. le potenzialità per valorizzare l'energia dal vento esistono: l'Anev le stima in circa 2.500 MW capaci di soddisfare i fabbisogni elettrici di 1,9 milioni di famiglie. Inoltre, conformemente alle direttive europee, il Piano di azione nazionale sulla promozione delle fonti rinnovabili prevedeva per gli impianti eolici off-shore un obiettivo crescente dai 100 MW che si sarebbero dovuti installare nel 2013 fino ad arrivare a 680 MW nel 2020.

5.4 L'energia eolica nel 2020

Dopo aver impostato nuovi record nel 2014, il settore dell'energia eolica ha sorpreso molti osservatori con un altro anno record nel 2015, con un 22% di crescita annua del mercato e passando per la prima volta la soglia di 60 GW di nuova capacità installata in un solo anno; e questo dopo aver superato la soglia di 50 GW per la prima volta nel 2014. Ancora una volta, la storia è stata scritta dalla Cina, con una installazione complessiva sorprendente di 30,8 GW nonostante un rallentamento dell'economia e la domanda quasi piatta. L'Europa e gli Stati Uniti hanno avuto risultati sorprendentemente forti in questi anni; mentre il Canada, il Brasile, il Messico e altri "nuovi" mercati hanno continuato a svilupparsi.

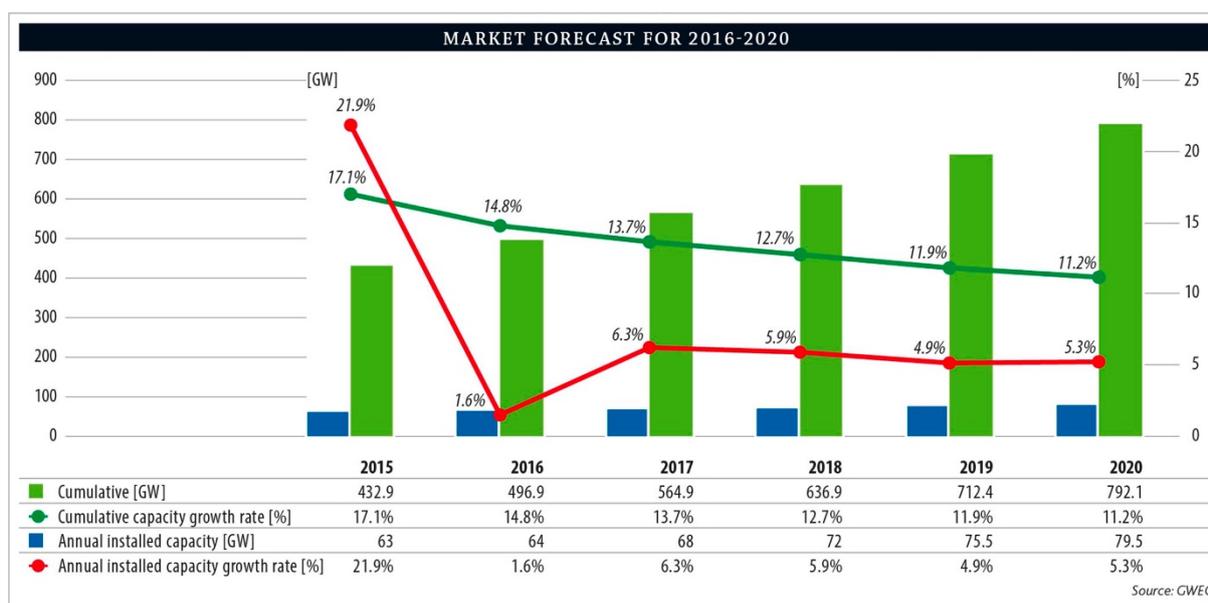


FIG. 18 Previsioni di mercato per il quadriennio 2016-2020

Si prevede una capacità eolica globale quasi raddoppiata nei prossimi cinque anni e tre grandi tendenze continueranno a guidare la crescita nel medio termine:

- **Clima**

L'esito positivo dei negoziati sul clima della conferenza COP 21 di Parigi del mese di dicembre e gli obiettivi a lungo termine adottati da 186 Paesi che si sono riuniti a Parigi è una chiamata, di fatto, per il settore energia libero al 100% da emissioni entro il 2050; e data la mancanza di una seria concorrenza da parte di altre fonti di alimentazione di emissioni libere, questo significa un settore di alimentazione fornito in gran parte o completamente da energie rinnovabili, con energia del vento ed energia solare in testa al gruppo. La vera prova dell'accordo di Parigi, ovviamente, sarà l'attuazione, e c'è il rischio che potrebbe andare male. Anche se il messaggio emerso è chiaro: il futuro è delle energie rinnovabili, e questa è la direzione da intraprendere.

- Prezzi in picchiata

Mentre abbiamo visto per molto tempo prezzi molto bassi per il mercato del vento negli Stati Uniti e, negli ultimi anni, gare d'appalto in Brasile e Sud Africa che hanno generato prezzi bassi, ultimamente i risultati delle gare d'asta in Egitto, Marocco, Perù e in altri paesi, hanno dato alla luce prezzi mai visti nei mercati più consolidati: circa € 40/MWh, e in Marocco addirittura sotto € 30/MWh.

È chiaro che i costi della tecnologia del vento e del solare sono scesi notevolmente negli ultimi anni, e nuove e complesse strutture di finanziamento vengono a creare le condizioni per le energie rinnovabili per renderle competitive in un numero sempre crescente di mercati. Naturalmente, questa sarà una evoluzione naturale soprattutto per alcuni paesi che presentano eccellenti risorse eoliche, ma la corsa al ribasso dei prezzi spingerà tutti i mercati, sia nuovi che quelli già attivi, ad investire nelle fonti rinnovabili. La Cina, ad esempio, si è già portata avanti abbassando i tassi d'interesse per il vento per quest'anno, e lo farà di nuovo nel 2018.

- Stabilità del mercato degli Stati Uniti

Gli Stati Uniti, come pioniere mondiale nel settore eolico, oltre ad avere alcune delle migliori risorse eoliche in tutto il mondo, ha avuto prezzi molto più bassi rispetto alla maggior parte dei suoi concorrenti OCSE per molto tempo, ma la difficoltà è sempre stata la natura del mercato degli Stati Uniti, da sempre sottoposto a scenari politici in continuo contrasto che hanno ostacolato la crescita del settore.

Ma la novità recente è che il Congresso degli Stati Uniti ha approvato la legge di estensione a lungo termine e la Production Tax Credit (PTC) che è stato il principale sostegno federale in termini politici per l'energia eolica negli Stati Uniti. Così da lasciare intravedere per l'industria eolica statunitense un periodo di prosperità e di stabilità politica, e le potenziali implicazioni di questa decisione vanno ben oltre il mercato statunitense in termini di strategie aziendali, scelte di localizzazione per la produzione e lo sviluppo della catena di fornitura. L'industria eolica statunitense giocherà un ruolo fondamentale per lo sviluppo del settore fino al 2020.

Oltre al clima e la competitività, la sicurezza energetica si colloca in cima alla lista dei driver per il mercato globale, così come la necessità di avere aria pulita, libera dall'inquinamento da polveri sottili che attanaglia sempre di più le grandi città. La domanda di fonti di energia pulita e sostenibile continuerà a crescere, soprattutto nelle economie emergenti in Africa, Asia e America Latina.

Per quanto riguarda il breve termine le previsioni di mercato parlano di un periodo di crescita sostenuta fino al 2020 rispetto a quella esponenziale che si è verificata negli ultimi due anni.

Anche se, come abbiamo visto, la Cina nel 2014 ha installato nuova capacità per 23 GW e nel 2015 oltre 30 GW, smentendo le previsioni che attribuivano alla super potenza asiatica un mercato piatto per gli anni presi in esame.

Allo stesso modo per gli Stati Uniti, nonostante ci si aspettava che la domanda potesse crescere, mai nessuno si era spinto nel prevedere che la domanda potesse addirittura raddoppiare.

BIBLIOGRAFIA

R. Castelnovo, F. Trezza; R. Vigotti; 1995; *Vento per l'energia*; Le Monnier;

J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers; 2004; *Wind Energy Explained: theory, design and application*; Wiley

SITOGRAFIA

<http://www.anev.org>

<http://www.ecoage.it>

<http://www.enea.it>

<http://www.gammaenergy.it>

<http://www.gwec.net>

<http://www.nextville.it>

<http://orizzontenergia.it>

<http://www.qualenergia.it>

<http://www.tuttogreen.it>

<https://it.wikipedia.org>