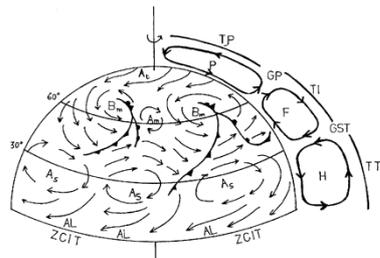


Eolico

Corso: Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili
 Anno accademico: 2018/2019
 Docente: Mirko Morini

Il vento



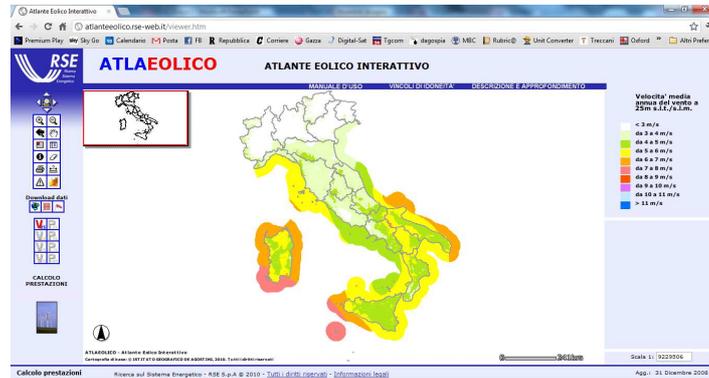
L'energia del vento deriva direttamente dall'energia solare in quanto i moti convettivi dell'atmosfera sono dovuti ai gradienti di temperatura provocati dal riscaldamento non uniforme del globo terrestre.

Nelle zone equatoriali l'intenso irraggiamento solare provoca un forte riscaldamento del suolo e quindi dell'aria sovrastante che tende a salire verso l'alto richiamando aria più fresca dalle zone circostanti. L'aria calda si raffredda al contatto con gli strati d'aria superiori e ricade attorno al 30esimo parallelo. Si forma la cella di Hadley (H). Analogo comportamento si ha per la cella di Ferrel (F) tra il 30esimo e il 60esimo parallelo e la cella Polare (P) tra il 60esimo e il polo.

A questi moti convettivi si sovrappongono poi i moti dovuti alle forze di Coriolis in direzione tangenziale. Si hanno quindi venti in direzione est nelle medie latitudini e in direzione ovest agli estremi.

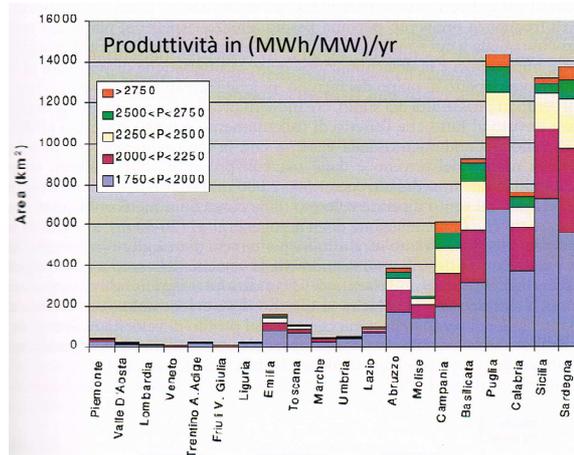
L'atlante eolico CESI

Tutto ciò ha una validità su scala globale, ma su scala locale vanno considerate le caratteristiche della zona (presenza di mari, oceani o terre emerse e loro orografia).



Per la quantificazione indicativa delle prestazioni di impianti eolici sono stati predisposti diversi strumenti. Un esempio è l'atlante eolico del CESI (ora RSE) disponibile al sito <http://atlanteeolico.rse-web.it/>

Potenzialità



Per una superficie di 41000 km² è stata stimata una produttività superiore a 2000 (MWh/MW)/yr. Ipotizzando che solo il 10 % possa essere utilizzato a fini eolici si desume un potenziale impiantistico di 41 GW con una produttività di 82 TWh/yr.

Gli impianti in Italia

Classi di potenza	n°	Potenza (MW)	Energia (GWh)
P ≤ 1 MW	5.175	491	690
1 MW < P ≤ 10 MW	117	619	1.114
P > 10 MW	287	8.655	15.938
Totale	5.579	9.766	17.741,9

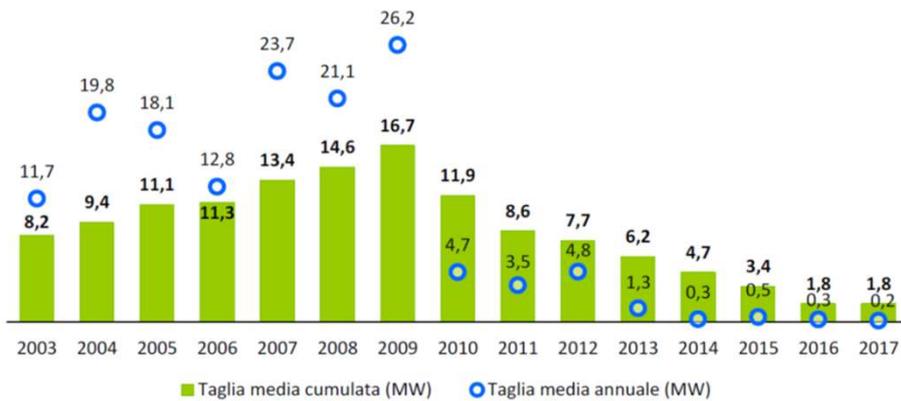
Fonte: Terna

Nel 2017 la potenza eolica installata rappresenta il 18 % di quella relativa all'intero parco impianti rinnovabile. Il censimento degli impianti lo si può trovare al sito https://atla.gse.it/atlaimpianti/project/Atlaimpianti_Internet.html

Gli impianti in Italia

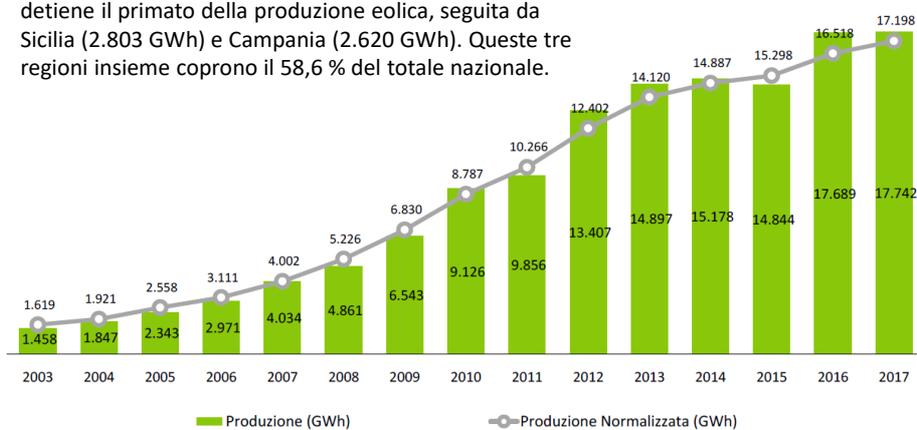


La taglia media

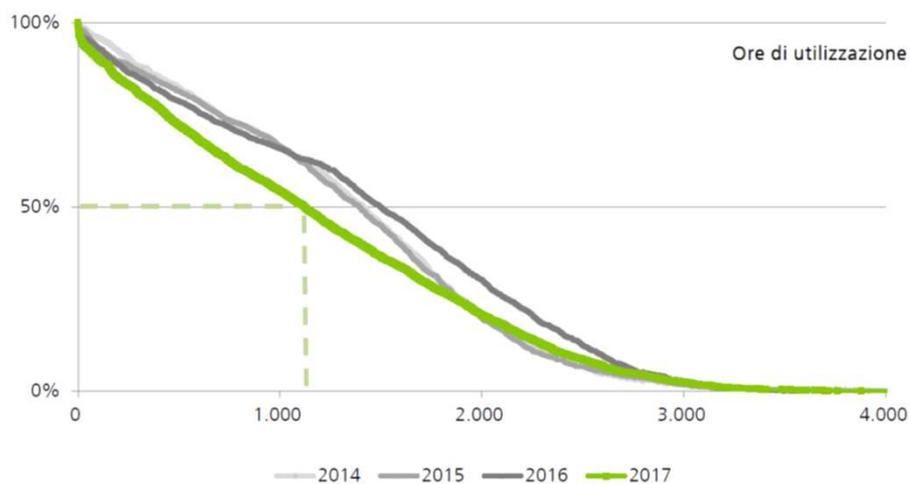


La produzione in Italia

Con 4.980 GWh di energia elettrica prodotta la Puglia detiene il primato della produzione eolica, seguita da Sicilia (2.803 GWh) e Campania (2.620 GWh). Queste tre regioni insieme coprono il 58,6 % del totale nazionale.



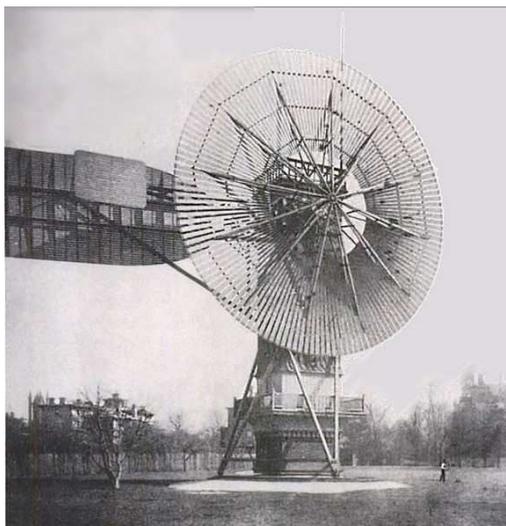
Ore di utilizzazione



La storia

L'utilizzo del vento come fonte energetica per la macinazione dei cereali e per il pompaggio di acqua è databile a 3000 anni fa, mentre da ancor più tempo il vento è una fonte energetica per il trasporto.

Il primo sistema di conversione dell'energia del vento in energia elettrica è databile al 1888 con il generatore da 12 kW DC costruito da Charles Brush negli USA (17 m di diametro, 144 pale).



La storia

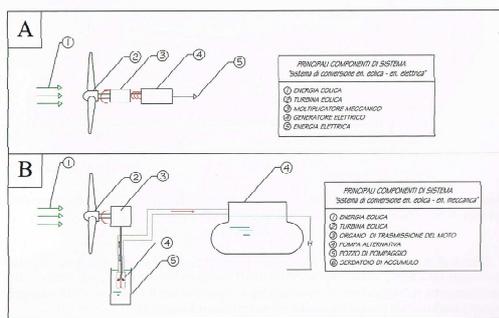
Per la maggior parte del ventesimo secolo questi sistemi sono stati per lo più utilizzati per la ricarica di batterie in luoghi isolati. La turbina da 1250 kW di Smith-Putnam costruita negli USA nel 1941 (rotore bipala in acciaio di 53 m di diametro) è rimasta per 40 anni la più grande turbina esistente.

Grande spinta allo sviluppo di questi sistemi è stata data dalla crisi petrolifera degli anni '70 con la partenza di diversi progetti di ricerca governativi in USA, Germania, Gran Bretagna e Svezia: per più di un decennio si provarono diverse architetture (asse verticale od orizzontale) e diversi numeri di pale (uno, due o tre).

Emerse la cosiddetta turbina eolica "alla danese": asse orizzontale, tre pale, velocità di rotazione fissa regolata per stallo.



I sistemi di conversione

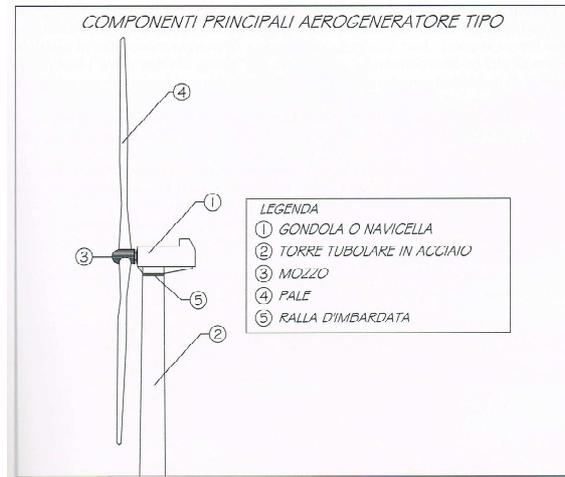


I sistemi eolici che effettuano la conversione di energia cinetica del vento in energia elettrica sono detti aerogeneratori (A), mentre i sistemi per la conversione in energia meccanica sono detti aeromotori.

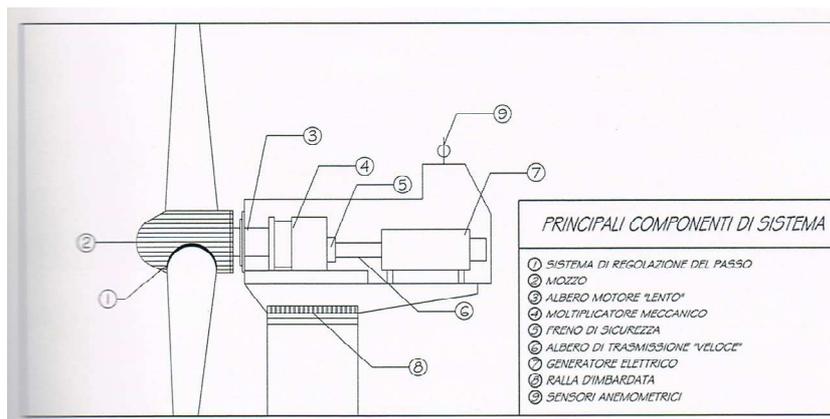
Attualmente gli aeromotori sono installati raramente, mentre in passato hanno svolto un ruolo importante nei luoghi in cui l'energia del vento era l'unica energia disponibile.

Gli aerogeneratori sono attualmente i sistemi più diffusi. In futuro, oltre alla produzione di energia elettrica, si ritiene plausibile che si diffondano sistemi per la produzione di idrogeno mediante elettrolisi dell'acqua alimentata da elettricità da fonte eolica.

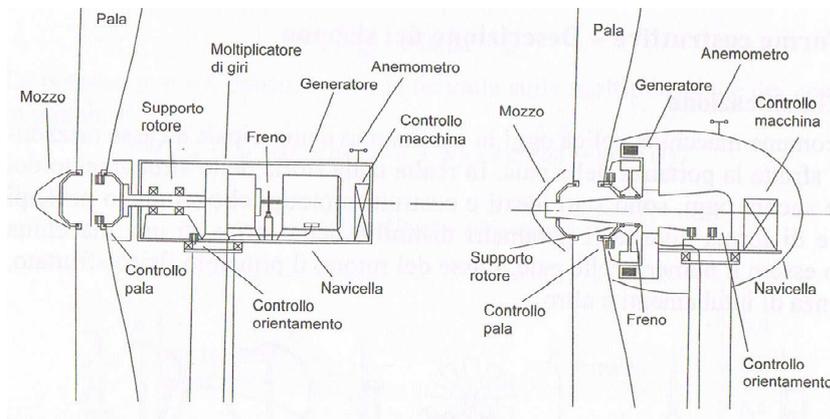
L'aerogeneratore



L'aerogeneratore



L'aerogeneratore



Con moltiplicatore di giri

Con accoppiamento diretto

Classificazione aerogeneratori

Classificazione per taglia. Comprende una doppia distinzione: la classe di potenza e la dimensione dell'aerogeneratore.

Si possono distinguere aerogeneratori di:

- piccola taglia: diametro rotore inferiore a 12 m e potenza inferiore a 100 kW
- media taglia: diametro inferiore a 50 m e potenza compresa tra 100 kW e 600 kW
- taglia intermedia: diametro circa 50 m e potenza tra 600 kW e 1 MW
- grande taglia: diametro superiore a 60 m e potenza superiore a 1.5 MW

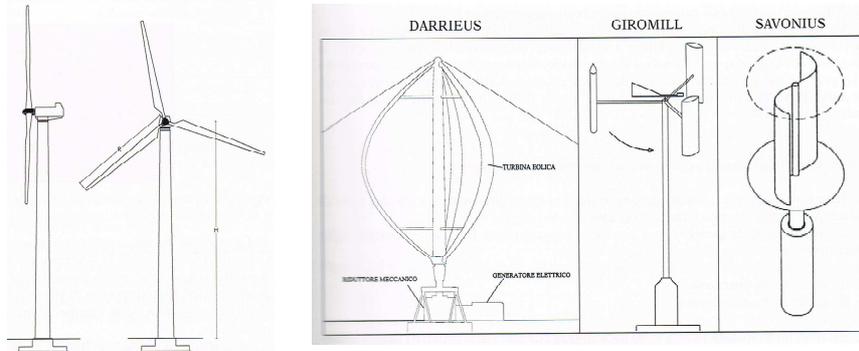
Classificazione per asse di rotazione. Il componente più importante di un aerogeneratore è la turbina che presenta diverse tipologie costruttive e funzionali classificabili in relazione della posizione dell'asse di rotazione in:

- turbine ad asse orizzontale (HAWT);
- turbine ad asse verticale (VAWT)
 - rotorii Darrieus;
 - rotorii Savonius;
 - rotorii Giromill.

Classi per asse di rotazione

Turbina ad asse orizzontale

Turbine ad asse verticale



I sistemi di grande taglia sono ad oggi realizzati con turbine ad asse orizzontale, mentre sulle taglie medie le due classi coesistono. Sulle taglie inferiori ai 20 kW è preminente l'utilizzo di sistemi ad asse verticale (sono maggiormente adatti all'ambiente urbano per il ridotto impatto visivo e la maggior adattabilità a flussi molto turbolenti).

Classi per asse di rotazione

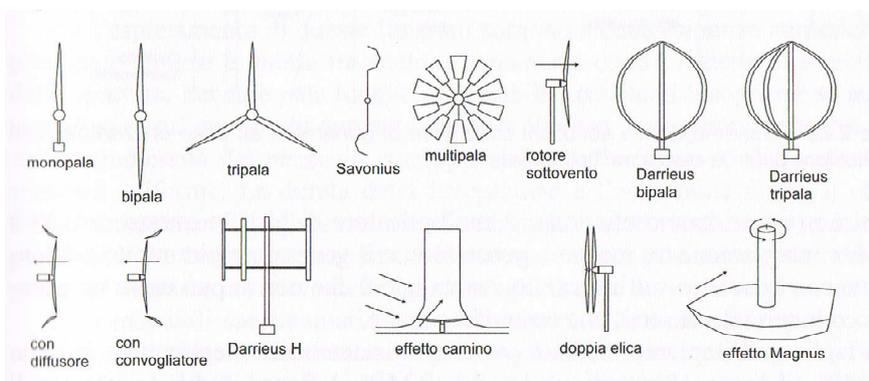
Per le turbine ad asse verticale il modello più semplice è il rotore Savonius che è una macchina a resistenza composta da lamiere verticali curvate a semicerchio.

Le turbine ad asse orizzontale e quelle ad asse verticale del tipo Darrieus e Giromill (detta anche H-Darrieus) sono turbine a portanza poiché le superfici esposte al vento presentano un profilo alare aerodinamicamente progettato per generare una distribuzione di pressione atta a garantire una coppia motrice.

Le turbine a portanza hanno una maggiore efficienza rispetto a quelle a resistenza, in quanto queste ultime dissipano in attrito una quota non trascurabile dell'energia cinetica del vento.

I motori Darrieus e Giromill non si avviano autonomamente in quanto per qualsiasi velocità del vento la coppia a fermo è nulla: è necessario quindi disporre di un motore ausiliario che porti la macchina alla velocità di rotazione minima d'attacco. Questo motore può essere un motore elettrico o un piccolo rotore Savonius.

I rotori



Classificazione aerogeneratori

Classificazione per sistema di generazione elettrica. Si possono utilizzare diversi generatori elettrici che hanno una ricaduta anche sulle prestazioni aerodinamiche del sistema.

Classificazione del generatore	Sottoclasse	Flessibilità ⁽¹⁾
Generatore sincrono	Sincrono ad avvolgimento	1
	Sincrono a magneti permanenti	>3
Generatore asincrono	Asincrono a gabbia di scoiattolo	1
	Asincrono ad avvolgimento	1.7 ÷ 1.9

(1) espressa come il rapporto tra la velocità di rotazione massima consentita e la velocità di rotazione minima

Classificazione aerogeneratori

Classificazione per sistema di controllo della sopravvelocità. Si possono riconoscere due macro-categorie:

- controllo passivo: sistemi in cui è la stessa velocità del vento ad innescare forze aerodinamiche o meccaniche in grado di ridurre la velocità di rotazione

- controllo per stallo passivo
- controllo per imbardata

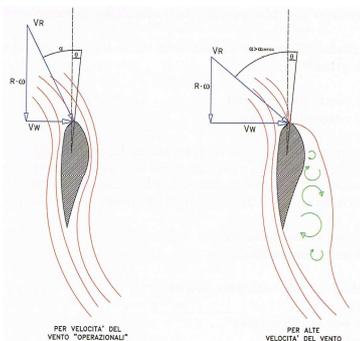
- controllo attivo: sistemi in cui dispositivi agiscono sul rotore in modo da ridurre la velocità di rotazione (più utilizzati in sistemi megawatt o multimegawatt)

- controllo per stallo attivo
- controllo per pitch

Controllo per stallo

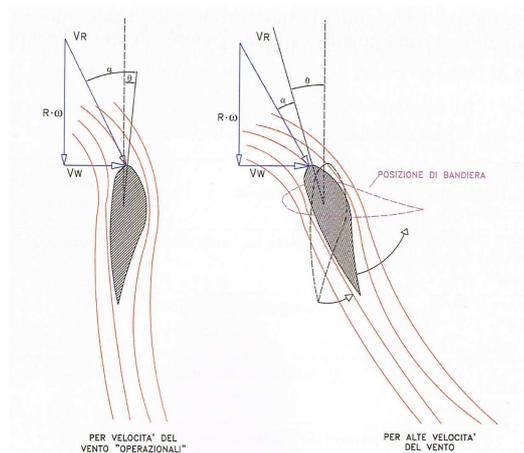
Nei sistemi di controllo per stallo si agisce sull'angolo di attacco per muovere dalla condizione di progetto ad una condizione di minore portanza aumentando l'angolo di incidenza e quindi mandando in stallo il profilo.

Ciò può avvenire per una riduzione del rapporto tra la velocità tangenziale del profilo e la velocità del vento (stallo passivo) o per una variazione diretta dell'angolo di attacco delle pale ruotando le pale attorno al proprio asse longitudinale (stallo attivo).



Controllo per pitch

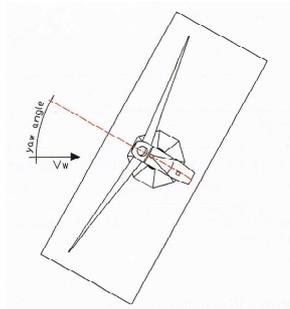
E' del tutto analogo allo stallo attivo, ma in questo caso l'angolo di calettamento viene variato solo per ridurre la portanza e non per mandare in stallo il profilo. E' detto anche controllo per regolazione del passo.



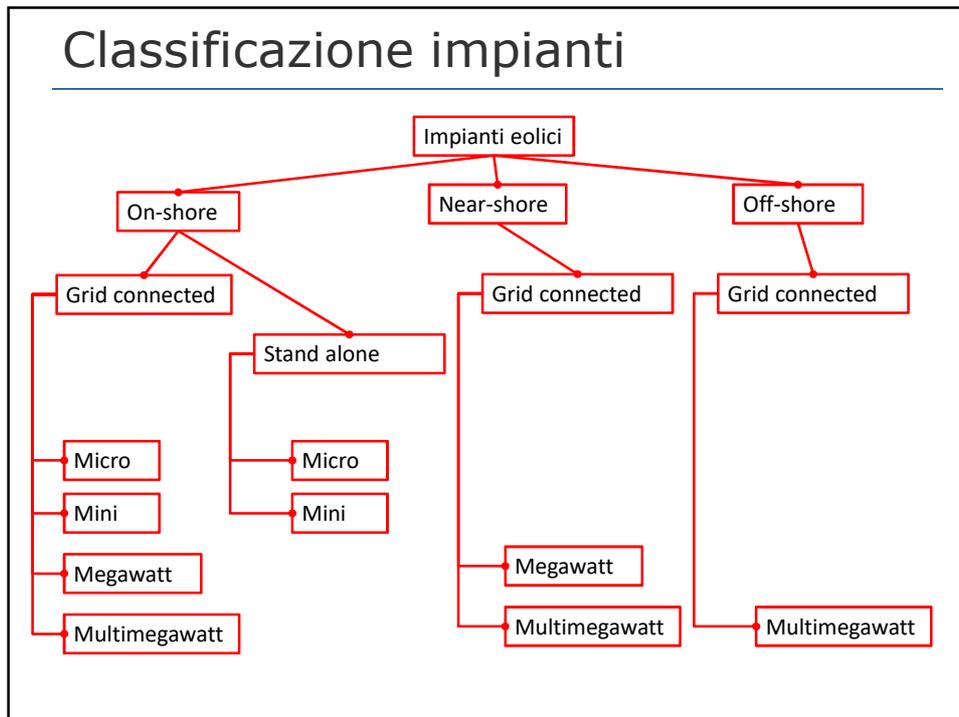
Orientando in posizione di bandiera il profilo è possibile frenare il rotore

Controllo per imbardata

I sistemi di controllo per imbardata prevedono una limitazione della potenza conseguenziale alla rotazione della navicella così da tenere il rotore in direzione non ortogonale al flusso. Questo sistema è in genere utilizzato solo per impianti di microgenerazione con turbine ad asse orizzontale.



Classificazione impianti



Classificazione impianti

Per **classe di potenza** nominale:

- micro: potenza inferiore a 20 kW
- mini: potenza compresa tra 20 kW e 100 kW
- megawatt: potenza compresa tra 100 kW e 1.5 MW
- multimegawatt: potenza superiore a 1.5 MW

E' una classificazione arbitraria, ma funzionale. Bisogna considerare che l'impianto di classe superiore può essere composto da cluster di impianti di classi inferiori e quindi le problematiche tecnologiche relative alla macchina utilizzata sono per la maggior parte relative alle classi inferiori.

Classificazione impianti

Per modalità di **interazione con la rete elettrica**:

- **grid-connected**: gli impianti eolici sono direttamente connessi alla rete elettrica di distribuzione. La taglia di potenza di questo tipo di impianti eolici è nel range completo dal micro al multimegawatt. Nel caso di micro impianti si tratta di microturbine connesse in parallelo alla rete elettrica in bassa tensione in alimentazione dei carichi elettrici di utenze domestiche;
- **stand-alone**: in questo caso gli impianti eolici alimentano una rete elettrica locale di modeste dimensioni a servizio di utenze isolate. Queste applicazioni in isola prevedono generalmente l'integrazione dei sistemi eolici con altri sistemi di generazione elettrica quali fotovoltaico, idroelettrico e sistemi CHP. E' necessaria la presenza di batterie. La potenza di questi impianti è limitata superiormente alla classe mini.

Classificazione impianti

Per **posizionamento**:

- **on-shore**: gli impianti sono posizionati in siti terrestri oltre i 3 km dalla costa. Coprono l'intero range di potenza e possono essere sia connessi alla rete sia isolati. Le installazioni on-shore grid-connected rappresentano numericamente la stragrande maggioranza delle installazioni eoliche, ma si prevede in futuro un grosso incremento delle applicazioni off-shore.

Wind farm	Current capacity (MW)	Country	State
Gansu Wind Farm	7,965	China	Gansu
Alta Wind Energy Center	1,548	USA	California
Muppandal wind farm	1,500	India	Tamil Nadu
Jaisalmer Wind Park	1,064	India	Rajasthan
Shepherds Flat Wind Farm	845	USA	Oregon
Roscoe Wind Farm	781.5	USA	Texas
Horse Hollow Wind Energy Center	735.5	USA	Texas
Capricorn Ridge Wind Farm	662.5	USA	Texas
Fântânele-Cogealac Wind Farm	600	Romania	Fântânele & Cogealac
Fowler Ridge Wind Farm	599.8	USA	Indiana

On-shore vs. Off-shore



Source EWEA, 2007

Classificazione impianti

Per **posizionamento**:

- near-shore: sono impianti posizionati sulla terraferma entro 3 km dalla costa e in mare entro 10 km dalla costa. Sulla terraferma coprono l'intero range di potenze e possono essere sia connessi sia ad isola. Nel caso di installazioni marine sono tipicamente grid connected e con potenze superiori al megawatt.

- off-shore: sono impianti posizionati in mare aperto con distanza dalla costa superiore a 10 km di tipo multimegawatt grid-connected. La maggior parte di questi impianti è situata in nord-Europa, in quanto i mari sono caratterizzati da fondali di modeste profondità anche a distanze significative dalla costa. In mare i regimi ventosi sono più intensi a causa della minore rugosità della superficie del mare rispetto alla terraferma e caratterizzati da minore turbolenza. Le torri di sostegno possono quindi essere più basse. In genere le turbine per applicazioni off-shore sono caratterizzate da potenze più elevate (maggiori di 2 MW): ciò consente di ridurre il numero delle turbine di ogni parco con riduzione dei costi di ancoraggio e delle infrastrutture di cablaggio e di interconnessione. Entro il 2020 si stima di arrivare a macchine con potenza di 10 MW.

Per aumentare la distanza dalla costa sono allo studio ipotesi alternative relative alla trasmissione della corrente verso la terraferma che prendono in considerazione corrente alternata e continua ad alto voltaggio per ridurre le perdite.

Classificazione impianti

Wind farm	Capacity (MW)	Location	Turbines & model	Commissioning date
London Array	630	United Kingdom	175 × Siemens SWT-3.6-120	2012
Gemini Wind Farm	600	Netherlands	150 × Siemens SWT-4.0	2017
Gode Wind (phases 1+2)	582	Germany	97 × Siemens SWT-6.0-154	2017
Gwynn y Môr	576	United Kingdom	160 × Siemens SWT-3.6-107	2015
Race Bank	573	United Kingdom	91 × Siemens SWT-6.0-154	2018
Greater Gabbard	504 ^[12]	United Kingdom	140 × Siemens SWT-3.6-107	2012
Dudgeon	402	United Kingdom	67 × Siemens SWT-6.0-154	2017
Veja Mate	402	Germany	67 × Siemens SWT-6.0-154	2017
Anholt	400	Denmark	111 × Siemens SWT-3.6-120	2013
BARD Offshore 1	400	Germany	80 × BARD 5.0MW	2013

Sviluppi futuri

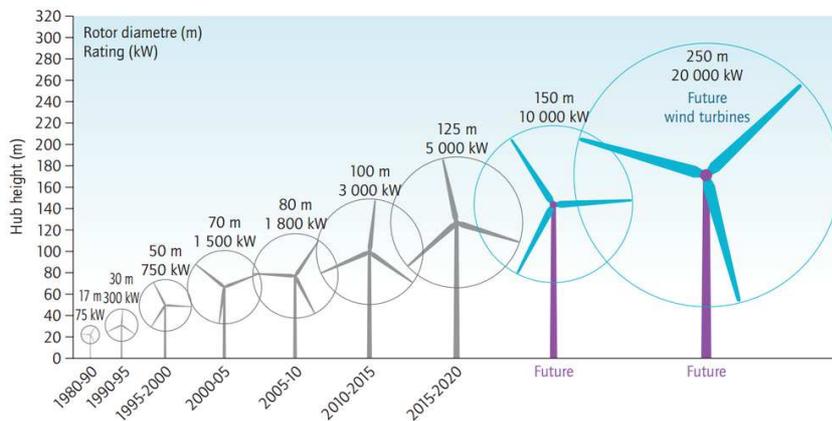
Per quanto riguarda l'eolico, si confermano le esigenze di focalizzare gli sforzi sull'offshore ad alte profondità (> 40 m) a causa di venti più forti e di una opposizione minore (sindrome NIMBY, not-in-my-backyard) per la loro realizzazione rispetto all'eolico onshore.

La ricerca è concentrata sullo sviluppo di turbine più potenti, affidabili ed economiche, moltiplicatori di giri più efficienti, sistemi di trasmissione alternativi, strutture flottanti e nanotecnologie per ridurre i fenomeni di *icing*, aumentando nel contempo la lunghezza delle pale e riducendo il loro peso, utilizzando materiali come titanio o fibra di carbonio.

Attualmente sta crescendo la competizione fra i produttori per lo sviluppo di prototipi di turbine offshore con potenze fino a 15-20 MW mediante l'utilizzo di magneti superconduttori e nuove tecniche di modellazione CFD per rotori che permetteranno di raccogliere i forti venti offshore sopprimendo la trasmissione dei carichi al moltiplicatore di giri e alla testa della torre e innovativi modelli di simulazione che possano prevedere e migliorare le performance di impianti offshore, con un alto grado di accuratezza, riducendo i costi dell'energia eolica.

Sviluppi futuri

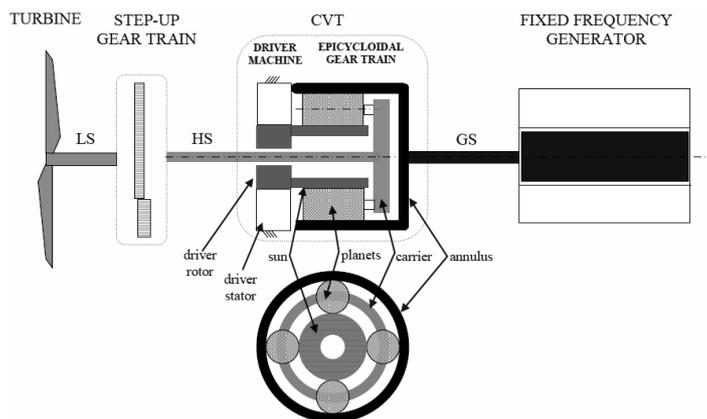
Figure 14: Growth in size of wind turbines since 1980 and prospects



Source: adapted from EWEA, 2009.

IEA, 2013, Technology Roadmap - Wind Energy

Sviluppi futuri



Sistema di controllo per trasmissione innovativa a rapporto variabile (CVT) sviluppato da UNIBO-DIE all'interno del LISEA.

Progettazione di sistemi eolici

A seguito della quantificazione della risorsa energetica disponibile è necessario procedere alla vera e propria progettazione del sistema eolico.

Gli aspetti toccati spaziano in molti campi (prevalentemente esterni al campo energetico):

- inserimento paesaggistico ed ambientale degli aerogeneratori
 - disposizione geometrica degli aerogeneratori;
 - quantificazione e mitigazione dell'impatto visivo;
 - quantificazione e mitigazione dell'impatto su flora e fauna;
 - quantificazione delle emissioni evitate;
 - quantificazione dell'impatto acustico.
- progettazione elettrica degli impianti eolici;
- progettazione delle opere civili (fondazioni, vie di accesso, piazzali, etc.)
 - progettazione opere civili provvisorie di sistemazione stradale;
 - progettazione opere civili in cemento armato gettato in opera;
 - scelta delle fondazioni dirette e su pali.

Analisi economica

Non essendoci costi correlati all'approvvigionamento della fonte energetica la redditività di un impianto eolico dipende fortemente dai costi di investimento iniziali, essendo questi preponderanti rispetto ai costi di gestione e manutenzione.

Per quanto riguarda la gestione annuale, in fase di progetto è fondamentale la corretta individuazione del sito al fine di assicurare all'impianto un numero di ore annue di funzionamento sufficienti a ripagare l'investimento iniziale.

L'investimento complessivo richiesto per la realizzazione di un impianto eolico della taglia megawatt o multimegawatt può assumere valori dell'ordine di 900-1200 €/kW. I minori investimenti specifici sono relativi agli impianti con molte turbine (almeno 10-20), con siti con orografia non complessa e di facile accessibilità e limitata distanza dalle linee di trasporto dell'energia elettrica.

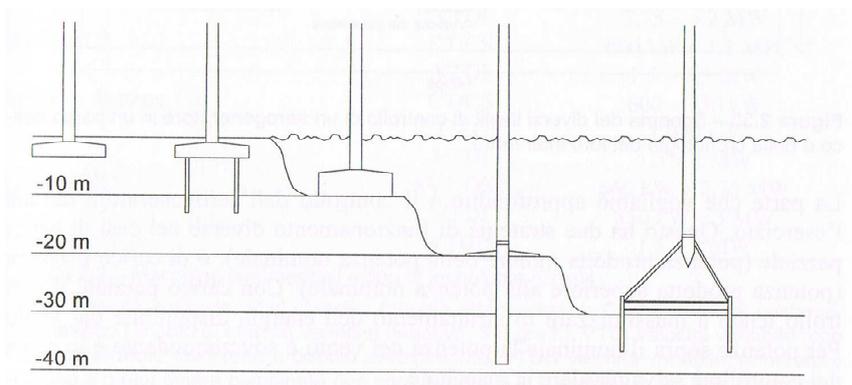
I costi per micro e mini eolico possono arrivare a 7000 €/kW.

Costo di investimento

Le principali voci di costo sono:

- studi di fattibilità e progetto. Questa voce comprende l'individuazione del sito e la sua caratterizzazione anemometrica (almeno un anno di misure), la valutazione della produzione potenziale, il procedimento autorizzativo, il reperimento del finanziamento, lo studio di impatto ambientale, progettazione preliminare ed esecutiva. Incide per un 3-5 % sul totale dell'investimento.
- acquisto, trasporto ed installazione delle turbine. I costi specifici diminuiscono all'aumentare della taglia della macchina. Questo costo rappresenta mediamente il 65-80 % dell'investimento complessivo.
- opere civili. Fondazioni, strade di accesso all'impianto e di collegamento tra le turbine, piazzole, cavidotti interrati e edifici di servizio rappresentano un costo che può andare dal 6 % al 13 % dell'impianto (la variabilità è fondamentalmente dovuta alle fondazioni)

Le fondazioni



Variabilità di soluzioni e quindi di costi.

Le fondazioni

Figure 17: Fixed-bottom foundation and floating offshore concepts



Source: Wiser et al., 2011.

KEY POINT: diverse concepts are being tested for offshore turbines.

IEA, 2013, Technology Roadmap - Wind Energy

Costo di investimento

Le principali voci di costo sono:

- opere elettriche. Realizzazione della sottostazione, collegamento elettrico tra le macchine e fino alla linea di trasporto (in media o alta tensione) pesano per una frazione pari al 8-12 % sull'investimento iniziale.
- costi vari. Interessi, imprevisti, modifiche, licenze e royalties possono pesare per il 3-8 % dell'investimento

Costi di investimento

On-shore

	INVESTMENT (€1,000/MW)	SHARE OF TOTAL COST %
Turbine (ex works)	928	75.6
Grid connection	109	8.9
Foundation	80	6.5
Land rent	48	3.9
Electric installation	18	1.5
Consultancy	15	1.2
Financial costs	15	1.2
Road construction	11	0.9
Control systems	4	0.3
TOTAL	1,227	100

Note: Calculated by the author based on selected data for European wind turbine installations

Finora si è parlato di impianti on-shore.

Nelle applicazioni off-shore crescono fondamentalmente i costi delle opere civili e di quelle elettriche.

Mentre il costo della turbina può anche calare in quanto si riduce l'altezza della torre.

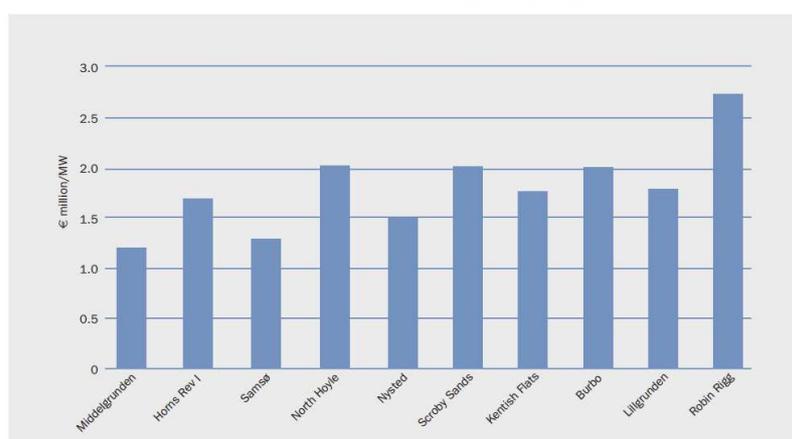
Off-shore

	INVESTMENTS 1000 €/MW	SHARE %
Turbines ex works, including transport and erection	815	49
Transformer station and main cable to coast	270	16
Internal grid between turbines	85	5
Foundations	350	21
Design and project management	100	6
Environmental analysis	50	3
Miscellaneous	10	<1
TOTAL	1,680	~100

Source: Risoe

Costo impianti off-shore

FIGURE 1.31: Investments in offshore wind farms, million €/MW (current prices).



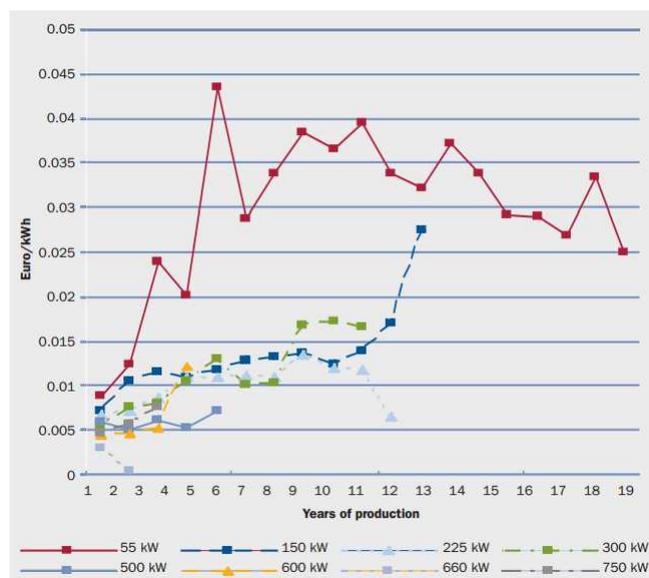
Source: Risø DTU

Costi di gestione e manutenzione

Le principali voci di costo sono:

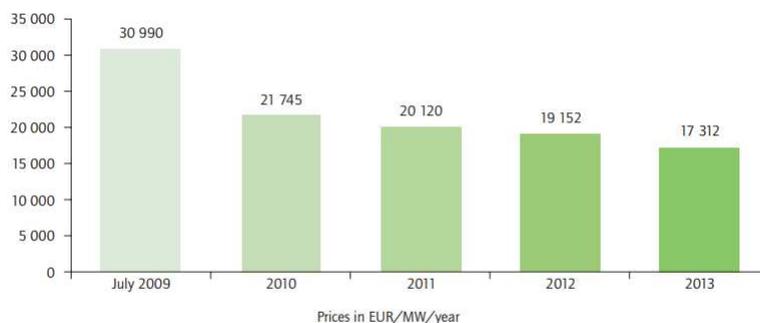
- spese amministrative (0.5-1 % dell'investimento iniziale all'anno);
- spese assicurative (1 % del valore dell'impianto all'anno);
- canoni per l'utilizzo del terreno (2000-3000 €/anno per ogni macchina);
- manutenzione ordinaria e straordinaria delle macchine. Tali costi sono pari all'1 % del costo delle turbine per i primi 2-3 anni, aumentano al 2-3 % per i successivi 10 anni e arrivano al 5-6 % fino al 20esimo anno. Nel secondo decennio si rendono necessari spesso interventi straordinari di sostituzione di parti soggette ad usura (albero, cuscinetti, moltiplicatore, etc.). Per gli impianti off-shore i costi possono essere più elevati a causa dell'ambiente operativo più ostile.

Costi di gestione e manutenzione



Costi di gestione e manutenzione

Figure 7: Recent trends in average price for full-service O&M contracts (EUR/MW/yr)



Source: Tabbush, 2013b.

KEY POINT: O&M costs of land-based wind power have decreased by almost half since 2007.

IEA, 2013, Technology Roadmap - Wind Energy

Impatto ambientale

Non essendo basati sulla combustione gli impianti eolici non hanno emissioni di effluenti gassosi, liquidi o solidi.

Risultano invece importanti altre forme di impatto ambientale quali l'occupazione del territorio, l'impatto visivo, le emissioni acustiche, le emissioni elettromagnetiche e le possibili interferenze con flora e fauna.

Per quanto riguarda l'occupazione del territorio si può stimare che la densità di potenza sia pari a 100 kW/ha. Il terreno però effettivamente occupato dalle strade e dalle piazzole e quindi effettivamente sottratto ad altri usi è solamente il 2-3 %.

Per quanto riguarda le interferenze con la flora, queste sono molto modeste e limitate alla fase di costruzione dell'impianto.

I problemi con la fauna persistono invece per la vita dell'impianto e sono principalmente riconducibili alla collisione di volatili con le pale della turbina.

La presenza di un elemento rotante può causare disturbo anche alle radiocomunicazioni (riflessione intermittente delle onde).

Impatto ambientale

L'impatto visivo è un problema di percezione e integrazione complessiva delle turbine con il paesaggio: per mitigarlo a seconda delle circostanze può essere preferibile un numero ridotto di macchine di maggiore altezza o viceversa. Così come per ridurre l'impatto da lunga distanza si può optare per torri a traliccio, mentre per ridurre quello da breve distanza si possono scegliere torri tubolari. Le torri possono essere verniciate con colori neutri e antiriflesso.

Opere di mitigazione mediante schermatura (filari di alberi) possono essere utilizzate per ridurre l'impatto visivo in corrispondenza di punti di osservazione particolarmente sensibili.

Di fondamentale importanza è la valutazione dell'impatto acustico, anche se nelle moderne turbine le problematiche relative a questo aspetto si sono di molto ridotte. Macchine più grandi producono livelli di emissione sonora maggiori e l'emissione aumenta con la velocità del vento. Poiché con l'aumentare della distanza aumenta anche l'attenuazione sonora è opportuno localizzare gli impianti eolici lontano dalle zone urbane (oltre che per il rumore è opportuno distanziarsi qualche centinaio di metri anche per motivi di sicurezza rispetto all'eventuale rottura catastrofica dell'aerogeneratore).

Impatto ambientale

Oltre all'impatto acustico, le interazioni negative con la popolazione possono essere dovute anche alle ombre intermittenti causate dalla rotazione delle pale. Ciò può arrecare disturbo specie nel caso in cui quest'ombra venga percepita all'interno di edifici. In base alla posizione reciproca di sole, impianto e abitazioni in certi momenti può essere opportuno fermare l'impianto.

Un impianto eolico permette di evitare emissioni di gas climalteranti e nocivi per sostituzione (l'elettricità prodotta dall'impianto sostituisce quella prodotta da impianti basati sulla combustione).

L'analisi però dovrebbe essere fatta sull'intero ciclo di vita dell'impianto, comprendendo l'energia e le emissioni correlate ai processi di produzione.

Per quanto riguarda l'energia, si stima che l'energia spesa per la produzione dell'impianto eolico (sia in termini di processi che di materiali) possa essere recuperata in circa 4 mesi di funzionamento (a differenza del fotovoltaico non richiede processi minerari e metallurgici troppo complessi, anche se per i generatori si utilizzano metalli delle terre rare).