

Energia eolica

Introduzione

Il vento è un elemento fondamentale del nostro pianeta e il principale “motore” del clima terrestre: non vi è luogo della Terra dove il vento non soffi, più o meno intensamente, per diversi giorni all’anno. In alcune zone della pianeta il vento è uno dei principali agenti di erosione delle rocce, di trasporto di sedimenti e di modellamento del paesaggio: si pensi agli ambienti desertici e costieri, dove il lavoro del vento lascia una forte impronta sulle caratteristiche morfologiche del paesaggio. Il vento si accompagna ad ogni perturbazione meteorologica, è il responsabile del moto ondoso dei mari e degli oceani, e, di conseguenza, delle morfologie costiere, determina la stabilità del manto nevoso in alta montagna e le morfologie delle superfici coperte di neve e ghiaccio delle zone artiche ed antartiche.

Fin dai primordi della storia, l’uomo si è reso conto della possibilità di utilizzare l’energia del vento, dapprima per muovere imbarcazioni, poi per far funzionare ingranaggi, per muovere le pale dei mulini a vento e, infine, per produrre energia elettrica.

Conoscere l’energia eolica

Che cos’è

L’energia eolica è l’energia posseduta dal vento. L’uomo ha impiegato la forza del vento sin dall’antichità per navigare e per muovere le pale dei mulini, utilizzati per macinare i cereali, per spremere olive o per pompare l’acqua. Solo da pochi decenni l’energia eolica viene impiegata per produrre elettricità. La parola “eolica” deriva da Eolo, dio greco del vento, il cui nome “aiolos” significa “veloce”.

L’energia elettrica si ottiene sfruttando l’energia cinetica del vento che fa girare le pale di un’elica; queste a loro volta sono collegate ad un generatore che trasforma l’energia meccanica (rotazione delle pale) in energia elettrica. Questi moderni mulini a vento sono chiamati aerogeneratori.

Come si forma il vento

Il vento è un fenomeno atmosferico dovuto al riscaldamento del Sole. Il Sole irradia sulla Terra 1.74×10^{17} watt di potenza; di questa circa il 2% viene convertita in energia eolica.

La Terra cede all’atmosfera il calore ricevuto dal Sole, ma non lo fa in modo uniforme. Nelle zone in cui viene ceduto meno calore la pressione dei gas atmosferici aumenta, mentre dove viene ceduto più calore, l’aria diventa calda e la pressione dei gas diminuisce. Si formano così aree di alta pressione e aree di bassa pressione, influenzate anche dalla rotazione della Terra. Quando diverse masse d’aria vengono a contatto, la zona dove la pressione è maggiore tende a trasferire aria dove la pressione è minore. Succede la stessa cosa quando lasciamo sgonfiare un palloncino. L’alta pressione all’interno del palloncino tende a trasferire l’aria verso l’esterno, dove la pressione è più bassa, dando luogo a un piccolo flusso d’aria. Il vento è dunque lo spostamento d’aria, più o meno veloce, tra zone di diversa pressione. E tanto più alta è la differenza di pressione, tanto più veloce sarà lo spostamento d’aria, tanto più forte sarà il vento.

Come si misura il vento

Un vento viene descritto attraverso due parametri: la forza (che è in relazione alla velocità) e la direzione.

Tutti abbiamo potuto sperimentare che il vento non è costante, cambia forza e direzione.

La direzione di provenienza si può osservare mediante una banderuola lasciata libera di orientarsi.

Per classificare il vento in base alla sua direzione si usa definirlo col luogo da cui proviene. A volte si prende spunto dalla provenienza geografica (Grecale se viene dalla Grecia, Libeccio se viene dalla Libia, Scirocco se viene dalla Siria), altre volte, come nella “Rosa dei Venti”, viene indicato con i punti cardinali (vento di Nord-Est, vento di Sud-Ovest).

La forza del vento può essere indicata o con la misura della sua velocità, e cioè in nodi che corrispondono alle miglia orarie (1 nodo = 1 miglio orario = 1,85 chilometri orari), o attraverso la scala proposta da Francis Beaufort.

La velocità si misura con l'anemometro, una semplice girandola esposta alla forza del vento: si va a misurare la velocità di rotazione.

Anemometro a coppe

Fra i più usati, il più semplice anemometro è quello a coppe, in cui il vento, soffiando sulle coppe, le pone in rotazione attorno a un asse verticale; un contatore elettrico o meccanico, misura il numero di giri che esse eseguono in un certo intervallo di tempo. Mediante opportune tabelle di taratura è possibile risalire alla velocità del vento.

La circolazione dei venti

Gli spostamenti di masse d'aria sono dovuti al riscaldamento solare e, in particolare, alla differenza (gradiente) di temperatura esistente tra le zone equatoriali e quelle tropicali.

L'irraggiamento solare delle zone equatoriali è maggiore rispetto a quello delle zone tropicali. L'aria equatoriale, più calda e quindi meno densa, tende a salire richiamando aria fredda dalle zone tropicali. Giunta in corrispondenza dei tropici, l'aria calda si raffredda e comincia a scendere. E così via in un continuo ricircolo equatore-poli e viceversa. In assenza di altri fattori, la circolazione dei venti sulla Terra avrebbe un andamento regolare di questo tipo.

Fattori che influenzano la circolazione dei venti

In realtà, altri fattori di tipo geografico-astronomico intervengono nella circolazione dell'aria, modificandone l'andamento. L'inclinazione dell'asse terrestre e la rivoluzione della Terra intorno al Sole, spostano stagionalmente le fasce di maggior irraggiamento tra i due tropici. Inoltre, la rotazione della Terra contribuisce all'alternarsi dell'irraggiamento solare e la sua superficie, scarsamente omogenea, ha una diversa capacità di assorbimento e scambio del calore. La rotazione della Terra induce inoltre un altro fattore fondamentale per la comprensione della circolazione dei venti: l'accelerazione di Coriolis, che conferisce alle masse d'aria una componente rotatoria o a spirale.

Altri fattori importanti per la determinazione della direzione e dell'intensità del vento, sono la forza d'attrito della superficie terrestre, per vincere la quale la corrente d'aria consuma energia, e la presenza di catene montuose, che bloccano o deviano la traiettoria del vento.

La rugosità del terreno

Il vento e la rugosità del terreno

La velocità del vento dipende, oltre che da parametri atmosferici, anche dalla conformazione del terreno. Più un terreno è rugoso, cioè presenta variazioni brusche di pendenza, boschi, edifici e montagne, più il vento incontrerà ostacoli che ridurranno la sua velocità.

Per definire la conformazione di un terreno sono state individuate quattro classi di rugosità:

- **classe di rugosità 0:** suolo piatto come il mare, la spiaggia e le distese nevose
- **classe di rugosità 1:** suolo aperto con terreni non coltivati a vegetazione bassa e aeroporti
- **classe di rugosità 2:** aree agricole con rari edifici e pochi alberi
- **classe di rugosità 3:** suolo rugoso in cui vi sono molte variazioni di pendenza del terreno, boschi e paesi

In generale la posizione ideale di un aerogeneratore è in un terreno appartenente a una bassa classe di rugosità.

Un po' di storia

L'uomo ha imparato a sfruttare l'energia cinetica del vento migliaia d'anni fa. La navigazione a vela risale, infatti, ad almeno diecimila anni fa, mentre i primi **mulini a vento**, di cui sono state trovate le tracce, sono persiani e risalgono al 200 a.C. Erano costruiti in modo molto semplice, con vele fissate a telai di legno. Nei secoli seguenti i mulini a vento si diffusero in tutto il Medio Oriente, diventando una macchina d'uso corrente in agricoltura.

Poi, tra il 1200 e il 1300 trovarono impiego anche in Europa, soprattutto nei paesi del Nord. Lo stesso *Leonardo Da Vinci* contribuì all'evoluzione di queste macchine.

Intorno al 1600 furono introdotte tecnologie più raffinate: furono perfezionati i profili delle pale e rese più aerodinamiche le pale per meglio sfruttare la forza del vento.

Nell'*Encyclopedie* di *Diderot* e *D'Alambert*, scritta alla fine del '700, se ne trova una raffigurazione. A quei tempi, l'energia eolica non veniva utilizzata per macinare granaglie, ma soprattutto per prosciugare terreni allagati.

L'**invenzione della dinamo**, da parte del belga *Gramme*, nella metà del diciannovesimo secolo, aprì nuovi orizzonti all'utilizzo dell'energia idraulica ed eolica e nel 1887 il francese *Duc de La Peltrie* costruì il primo aerogeneratore realizzato in Europa e destinato alla produzione di energia elettrica: iniziava così lo sfruttamento dell'energia eolica per l'industria. Nel medesimo periodo anche gli Stati Uniti realizzavano il primo "mulino a vento" per produrre elettricità (*Charles Brush*, Ohio, 1890).

La produzione di energia elettrica da energia eolica si è poi sviluppata tra il 1920 e il 1930, in seguito all'evoluzione di turbine per la trasformazione dell'energia idraulica.

Infine, la crisi petrolifera del 1973 ha fatto rinascere l'interesse per le fonti energetiche rinnovabili, tra cui quella eolica, che in certi casi si dimostra competitiva con i combustibili fossili. I mulini moderni sono molto più veloci ed efficienti di quelli d'inizio secolo. Hanno un minor numero di pale e riescono a raggiungere velocità anche cinque volte superiori a quella del vento, con una produzione di energia doppia rispetto ai mulini tradizionali.

Impianti

Il generatore eolico

La più importante forma di impiego dell'energia eolica è quella relativa alla produzione di energia elettrica attraverso i generatori eolici, ovvero **aerogeneratori**.

L'energia elettrica si ottiene sfruttando l'energia cinetica del vento: le masse d'aria in movimento ad una velocità superiore ai 10 chilometri orari fanno girare le pale di un elica; queste a loro volta sono collegate ad un generatore che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica.

Esistono aerogeneratori diversi per forma e dimensione. Possono, infatti, avere una, due o tre pale di varie lunghezze: quelli con pale lunghe 50 centimetri vengono utilizzati come caricabatteria, quelli con pale lunghe circa 30 metri sono in grado di erogare una potenza di 1500 chilowatt, riuscendo a soddisfare il fabbisogno elettrico giornaliero di circa 1000 famiglie.

Il più diffuso aerogeneratore è costituito da una torre di acciaio di altezze che si aggirano tra i 60 e i 100 metri, con due o tre pale lunghe circa 20 metri e genera una potenza di 600 chilowatt che equivale al fabbisogno elettrico giornaliero di 500 famiglie.

Le pale del generatore eolico sono fissate su un elemento meccanico chiamato **mozzo** a formare l'elemento dell'aerogeneratore chiamato **rotore**. A seconda della posizione dell'asse attorno a cui ruota questo meccanismo, si distinguono **rotori ad asse orizzontale** e **rotori ad asse verticale**. I primi sono i più noti e diffusi, i secondi sono stati utilizzati fin dall'antichità, ma solo ultimamente sono oggetto di studi e ricerche per migliorarne l'efficienza (i principali vantaggi dell'asse verticale sono: il costante funzionamento indipendentemente dalla direzione del vento, la migliore resistenza anche alle alte velocità dei venti e alla loro turbolenza).

La struttura di un generatore eolico con rotore ad asse orizzontale è semplice: un sostegno (formato da fondamenta e torre) che reca alla sua sommità una **gondola** o **navicella**. In questo involucro sono contenuti **l'albero di trasmissione** lento, il **moltiplicatore di giri**, **l'albero veloce**, il **generatore elettrico** e i **dispositivi ausiliari** (sistema frenante e sistema di controllo).

All'estremità dell'albero lento è fissato il **rotore** (costituito dal mozzo sul quale sono montate le pale).

La forma delle pale è disegnata in modo che il flusso dell'aria che le investe azioni il rotore.

Dal rotore, l'energia cinetica del vento viene trasmessa a un generatore di corrente. Il generatore eolico funziona a seconda della forza del vento. Al di sotto dei 4/5 metri al secondo non può partire. La velocità minima che permette alla macchina di fornire la potenza di progetto è 10/12 metri al secondo per qualche centinaia di chilowatt. Ad elevate velocità

(20/25 metri al secondo) l'aerogeneratore viene spento per ragioni di sicurezza.

I progressi nel disegno dei rotori eolici degli ultimi 10 anni permettono a questi di operare anche a velocità del vento inferiori, imbrigliando una quantità maggiore di energia e raccogliendola ad altezze maggiori, aumentando la quantità di energia eolica sfruttabile.

Sono stati messi a punto anche dei rotori con pale "mobili": variando l'inclinazione delle pale al variare della velocità del vento è possibile mantenere costante la quantità di elettricità prodotta dall'aerogeneratore.

Le wind farm onshore

Più aerogeneratori collegati insieme formano le **wind farm**, le "fattorie del vento", che sono delle vere e proprie centrali elettriche. Una *wind farm* è costituita da un gruppo di turbine eoliche situate nello stesso luogo, interconnesse tra loro da una rete di collegamento a medio voltaggio, che raccoglie l'energia prodotta da ciascuna turbina e la convoglia ad una stazione di raccolta, dove un trasformatore converte la corrente elettrica a medio voltaggio in corrente ad alta tensione e la immette nel sistema di trasmissione e distribuzione. Una grande *wind farm* può consistere di dozzine di generatori eolici, fino a più di cento turbine singole, e copre un'area di diversi km²: poichè, però, l'area occupata dai singoli generatori eolici è molto piccola, tutte le zone tra una turbina e l'altra possono essere destinate ad altro uso, come, per esempio, l'agricoltura o l'allevamento di bestiame. Nelle *wind farm* la distanza tra gli aerogeneratori non è casuale, ma viene calcolata per evitare interferenze reciproche che potrebbero causare diminuzioni di produzione di energia. Di regola gli aerogeneratori vengono situati ad una distanza di almeno cinque-dieci volte il diametro delle pale. Nel caso di un aerogeneratore medio, con pale lunghe circa 20 metri, questo significa installarne uno ogni 200 metri circa. Gli USA possiedono il maggior numero di *wind farm*, seguiti dalla Germania, dalla Spagna e dalla Danimarca, con l'Italia al quarto posto, seguita poi da Gran Bretagna, Portogallo Francia e Irlanda. La più grande *wind farm onshore* (cioè, situata su terraferma) del mondo è quella di Roscoe, in Texas, con 627 turbine e una capacità di 781 MW. La più grande in Europa è in funzione a Glasgow (Scozia), con 140 turbine, che forniscono energia a 180.000 abitazioni, con una potenza installata di 322 MW.

Le wind farm offshore

Le *wind farm* più recenti tendono ad essere situate **offshore**, cioè in mare, lontano dalle coste, dove è possibile sfruttare i forti venti che soffiano, senza essere rallentati da ostacoli, sulla superficie dei mari, degli oceani, ma anche di grandi laghi. I costi di realizzazione e di manutenzione di *wind farm offshore* sono molto più elevati di quelle *onshore*, a causa dei costi di trasporto dei materiali, delle difficoltà costruttive, dei problemi di ancorare le torri al fondale (tecnicamente, con una profondità massima di 200 m, ma in genere non più di 20 m e a non più di 20 km dalla costa, per tenere bassi i costi) e dei problemi legati alla corrosione ad opera delle acque marine sulle strutture, ma i vantaggi in termini di produttività sono molto elevati. Sulla superficie di mari e oceani, infatti, i venti non trovano ostacoli e soffiano con velocità maggiori e con maggior costanza. Il posizionamento *offshore* di grandi *wind farm* risolve anche i problemi di impatto estetico e acustico, poichè le torri sono situate oltre la linea dell'orizzonte visibile, ad almeno 3 km dalla costa, e anche i problemi ambientali legati al pericolo costituito dalle torri per gli uccelli, rapaci e migratori in particolare, e per i pipistrelli sono molto più limitati. Le centrali in mare rappresentano, inoltre, un'utile soluzione per quei paesi densamente popolati e con forte impegno del territorio che si trovano vicino al mare. Alcuni ricercatori sostengono persino che la creazione di piattaforme e sistemi di piloni e cavi sottomarini potrebbe creare, nel tempo, zone di ripopolamento e di biodiversità sui fondali, come accade per le pile e gli ancoraggi delle piattaforme petrolifere. Gli impianti *offshore* rappresentano quindi, secondo la maggior parte degli esperti del settore, il vero futuro dell'energia eolica, sia in termini ambientali sia di potenziale produttivo.

Danimarca e Regno Unito possiedono il maggior numero di *wind farm offshore*, seguiti da Olanda e Svezia. Attualmente la maggiore *wind farm offshore* si trova di fronte alle coste del Kent in Gran Bretagna (Thanet Wind Farm): è costituita da 100 turbine per una potenza installata di 300 MW.

Vi sono grandi progetti per l'eolico *offshore*: il Regno Unito ha pianificato di illuminare ogni abitazione del Paese con

energia prodotta da *wind farm offshore* entro il 2020, il Canada sta progettando la realizzazione di *wind farm offshore* nella regione dei Grandi Laghi, e una delle più grandi *wind farm offshore* del mondo, denominata London Array, verrà costruita nell'estuario del Tamigi, con una potenza installata di 630 MW (che diventeranno poi 1 GW), e fornirà energia a 750.000 abitazioni, circa ¼ delle case di Londra, tramite 341 turbine situate a 12 miglia dalla costa.

La mappa eolica

Per produrre energia elettrica in quantità sufficiente è necessario che il luogo dove si installa l'aerogeneratore sia molto ventoso.

La valutazione della potenzialità produttiva di un impianto eolico è un'operazione difficile e complessa, che dipende dalle caratteristiche dei venti che soffiano nel luogo dove l'impianto verrà realizzato. La conformazione di un terreno influenza la velocità del vento. Eventuali ostacoli possono influenzare profondamente velocità, potenza, direzione e distribuzione dei venti. Per quanto riguarda i rilievi montuosi, si è constatato che, mentre i pendii ripidi creano turbolenze pericolose per la stabilità e negative per il rendimento del generatore eolico, quelli più gradualmente favoriscono la concentrazione del vento. In generale la posizione ideale di un aerogeneratore è in un terreno con un numero non eccessivo di ostacoli con una pendenza compresa tra i 6 e i 16 gradi.

Il vento deve superare la velocità di almeno 5,5 metri al secondo e deve soffiare in modo costante per gran parte dell'anno.

Per quanto riguarda i siti eolici *offshore*, i migliori sono quelli con venti che superano la velocità di 7-8 metri al secondo, che hanno bassi fondali (da 4 a 40 metri) e che distano oltre 3 chilometri dalla costa.

La creazione di un impianto presuppone la conoscenza della "mappa eolica" del luogo, indicativa di quanto e come soffia il vento. Inoltre, prima di costruire un impianto, vengono realizzate registrazioni sistematiche e per prolungati periodi di tempo di grandezze, come velocità e traiettorie dei venti che soffiano nei luoghi prescelti.

Tipi di impianti eolici

L'energia elettrica può essere utilizzata attraverso due grandi categorie di impianto: impianti per utenze isolate e impianti concepiti per essere allacciati a reti elettriche già esistenti.

Un primo tipo di impianto è quello per la produzione di energia elettrica "di servizio" fornita da piccoli aerogeneratori di potenza inferiore a 1 chilowatt (rotore di 1-2 m.) per l'alimentazione di apparecchiature poste in luoghi isolati, come ripetitori radio, rilevatori, impianti di segnalazione, ecc.; questi utilizzi sono spesso concorrenziali o utilizzati insieme ai sistemi fotovoltaici. Inoltre esiste una produzione di elettricità per l'alimentazione di case sparse o insediamenti isolati non allacciati alla rete. Tali impianti sono costituiti da aerogeneratori di piccola taglia (3-20 chilowatt) e un sistema di accumulo (batteria) dell'energia elettrica prodotta nei momenti di vento favorevole. Queste applicazioni hanno diffusione limitata nei Paesi industrializzati, ma potrebbero avere prospettive interessanti nei Paesi in via di sviluppo con elevata ventosità.

Il secondo tipo di impianti eolici è connesso alla rete e si suddivide in due categorie: quello per la produzione di elettricità per l'alimentazione di piccole reti e quello collegato alla rete nazionale. Nel primo caso si tratta impianti situati su piccole isole o in aree remote che sono alimentate da sistemi elettrici non connessi con la rete nazionale. Anche per questa tipologia di sistemi si può prevedere l'impiego congiunto di eolico e fotovoltaico (impianti ibridi), che potrebbero, in alcuni casi, integrarsi a vicenda su base annua.

L'applicazione di maggior interesse per l'eolico è invece l'alimentazione delle grandi reti nazionali; per questo scopo sono utilizzate macchine di taglia medio-grande installate singolarmente o in gruppi di unità (*wind farm*) con potenze totali dell'ordine di alcuni megawatt o di alcune decine di megawatt.

Eolico nel mondo

Energia eolica nel mondo

Negli ultimi anni si è assistito ad una crescita esponenziale della potenza eolica installata e della produzione di energia elettrica dal vento. Nel 2015 nel mondo è stata installata una potenza di 63 GW, con un incremento del 22% circa rispetto al 2014, raggiungendo una potenza totale di 433 GW. Le maggiori potenze installate nel 2015 sono in Cina (circa 129,3 GW), in USA (74 GW), in Germania (45 GW), in India (25,1 GW) e in Spagna (23 GW), con l'Europa 28 che globalmente totalizza il 32,7% della potenza eolica mondiale. L'81% della potenza installata nel mondo si trova in soli dieci Paesi: Cina, USA, Germania, India, Spagna, Gran Bretagna, Canada, Francia, Italia e Brasile.

Tradizionalmente, fin dall'inizio dell'utilizzo del vento come fonte di energia elettrica, i Paesi che più hanno investito e prodotto sono stati Germania, Spagna e USA: la Germania è sempre stata la prima in classifica, ma nel 2011 è stata sorpassata da Cina e Stati Uniti. Negli ultimi 5 anni è emerso un importantissimo "outsider", la Cina, che dal 2010 è diventata il primo Paese in classifica, diventando così il principale Paese emergente nel settore eolico.

Nel 2015 i maggiori sforzi per incentivare la potenza eolica installata vengono dalla Cina, che, con un incremento del 30,8% rispetto al 2014, raggiunge il 30% della potenza mondiale installata, e dagli USA, che con un incremento dell'8,6% raggiungono il 17%.

La posizione dell'Italia è sempre stata all'avanguardia, e nel 2014 l'Italia occupa un onorevole 9° posto nella classifica della potenza installata, dopo Cina, USA, Germania, India, Spagna, Gran Bretagna, Canada, Francia.

Nel 2015, l'eolico ha coperto il 3,7% dei consumi mondiali di elettricità, tuttavia in alcuni Paesi la produzione di energia eolica è una parte molto più importante del bilancio elettrico nazionale. Per esempio, nel 2015 in Spagna ben il 18% dell'energia consumata proveniva da fonte eolica, in Danimarca il 42%, in Irlanda e in Portogalli il 23%.

(Fonte dati: Renewables 2015 – Global Status Report; EWEA – Wind in power: 2015 European Statistics)

Energia eolica in Europa

Alla fine del 2015 in Europa erano installati 142 GW di potenza eolica. Dell'energia eolica in Europa si occupa la European Wind Energy Association (EWEA), un'associazione non-profit e non governativa nata nel 1982, che conta più di 700 membri, tra i quali le più importanti aziende costruttrici di turbine eoliche e i più autorevoli centri di ricerca: è la più grande associazione del mondo nel settore delle energie rinnovabili. Nel 2015 la potenza eolica installata in Europa è aumentata di 13.805 MW, passando 134.252 MW a 147.772 MW. Vi sono però ancora moltissime disparità tra i vari Paesi: Germania (30,4% sul totale europeo), Spagna (15,6%), Gran Bretagna (9,2%) Francia (7%) e Italia (6%), sostengono da sole il 68,2% della capacità eolica europea.

(Fonte dati: EWEA – Wind in power: 2015 European Statistics)

Un contributo significativo

La Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio (che ha sostituito le precedenti direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE) mira ad istituire un quadro comune per la produzione e la promozione di energia a partire da fonti rinnovabili. Per ciascuno Stato membro la direttiva fissa un obiettivo per la quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia entro il 2020, coerente con l'obiettivo globale «20-20-20» (ciò significa ridurre del 20% le emissioni dei gas serra, portare al 20% il risparmio energetico e aumentare al 20% il consumo di fonti rinnovabili) della Comunità. Per quanto riguarda il settore dei trasporti, la quota di energia da fonti rinnovabili deve essere pari almeno al 10% del consumo finale di energia entro il 2020. Nel 2013 le fonti rinnovabili hanno raggiunto il 13,5% della domanda mondiale di energia, con l'idroelettrica e le biomasse che hanno il maggior peso (queste ultime grazie al contributo dei Paesi più poveri, dove si fa largo uso di biomasse per il riscaldamento domestico, per cucinare e per l'illuminazione). Alla fine del 2015, la produzione di energia eolica nel mondo ha coperto circa il 3,7% di energia elettrica mondiale consumata: può sembrare un quantitativo assai poco significativo, tuttavia, nel settore eolico si continuano a registrare incrementi della produzione ogni anno.

(Fonte dati: ewea.org)

Energia eolica in Italia

Nel 2015 l'Italia si è posizionata al 9° posto nel mondo nella classifica per la potenza eolica, con 8.958 MW installati. Un posto di tutto rispetto, se si considerano le piccole dimensioni del nostro Paese, rispetto a "giganti" come gli USA, la Cina o l'India.

Le condizioni per la produzione di energia eolica nel nostro Paese, inoltre, non sono delle più favorevoli, a causa della conformazione allungata e stretta del territorio e della presenza di rilievi elevati, come l'arco alpino, che fanno da ostacolo ai venti, tuttavia localmente vi sono molte situazioni favorevoli, in particolare lungo il crinale appenninico adriatico e sulle isole, e grande potenzialità hanno gli impianti offshore.

In Italia diverse associazioni si occupano della gestione, della ricerca e della diffusione nel settore eolico, tra le quali, per esempio, l'Associazione Nazionale Energia del Vento (ANEV), che ha sottoscritto anche protocolli di intesa con Greenpeace e Legambiente, per uno sviluppo sostenibile e il più possibile rispettoso dell'ambiente, o l'Associazione Produttori Energia da Fonti Rinnovabili (APER), e un'importante collaborazione è anche in atto con il Gestore Servizi Energetici (GSE), per l'integrazione dell'energia prodotta per via eolica con la rete di distribuzione elettrica nazionale.

Il 1994 è l'anno in cui la produzione di energia eolica inizia a comparire in modo interessante (e non più solo con impianti pilota o sperimentali) nel bilancio energetico nazionale, e da allora ha continuato a far registrare aumenti significativi. Nel 1994 l'energia eolica (con una produzione di 6 GWh) costituiva lo 0,02 % dell'energia prodotta da fonte rinnovabile, nel 2001 si passa (con una produzione di 1.179 GWh) al 2,14%, nel 2006 si balza al 5,6% (con una produzione di 2.971 GWh), ma è nel 2007 che inizia veramente il "salto di qualità": nel 2007, l'energia eolica prodotta (4.034 GWh) ha costituito circa l'8% dell'energia prodotta da fonti rinnovabili e l'1,2% del bilancio elettrico nazionale (che considera l'energia prodotta più quella importata). La crescita dell'eolico è continuata anche negli anni successivi e nel 2014 ha raggiunto la quota 15.178 GWh.

Alla fine del 2014, in Italia risultano installati 1.847 impianti eolici. A causa delle caratteristiche fisiografiche del nostro territorio e del conseguente regime dei venti, tuttavia, la distribuzione non è uniforme nelle diverse Regioni. Il maggior numero di impianti si trova in Puglia (572 impianti), seguita da Basilicata (263), Campania (221), Sicilia (191), Sardegna (118), Calabria (111), Toscana (89), Emilia Romagna (56), Molise (35), Marche (35), Liguria (33), Abruzzo (29), Lazio (24), Veneto (17), Piemonte (15), Umbria (13), Trentino (9), Lombardia (7), Friuli Venezia Giulia (5) e Valle d'Aosta (4).

Per quanto riguarda la potenza efficiente lorda, alla fine del 2014 ha raggiunto i 8.703 MW, così distribuiti: Puglia (2.339 MW, il 26,9 % della potenza eolica nazionale), Sicilia (1.747 MW, il 20,1% della potenza eolica nazionale), Campania (1.251 MW, il 14,4%), Calabria (1000 MW, l'11,5%), Sardegna (997 MW, l'11,5%), Basilicata (475 MW, il 5,5%), Molise (370 MW, il 4,2%), Abruzzo (231 MW, il 2,7%), Toscana (121,9 MW, l'1,4%), Liguria (58 MW, lo 0,7 %), Lazio (51 MW, lo 0,6%), Emilia Romagna (19 MW, lo 0,2%), Piemonte (19 MW, lo 0,2%), Veneto (10 MW, lo 0,1%), Marche (9 MW, lo 0,1%), Valle d'Aosta (3 MW, lo 0,1%).

L'energia prodotta nel 2014 è stata pari a 15.178 GWh, e proviene per il 28,3% dalla Puglia, il 19,3% dalla Sicilia, il 13,5% dalla Campania, il 12,6% dalla Calabria, il 10,9% dalla Sardegna, il 5,4% dalla Basilicata, il 4,5% dal Molise, il 2,2% dall'Abruzzo, l'1,5% dalla Toscana. In tutte le altre Regioni la produzione di energia da fonte eolica è inferiore all'1%.

Si vede quindi come le Regioni dell'Italia meridionale e centrale siano le più produttive, grazie alle favorevoli condizioni dei venti lungo il crinale appenninico e sui rilievi delle isole, mentre la presenza delle Alpi condiziona negativamente lo sfruttamento del vento nelle regioni a ridosso dell'arco alpino.

(Fonte: GSE, Rapporto statistico "Energia da Fonti Rinnovabili in Italia – 2014")

Scenari futuri

Secondo l'OWEMES (*Offshore Wind and other marine renewable Energy in Mediterranean and European Seas*) i futuri scenari dell'eolico indicano la Puglia come la regione con la maggiore estensione in km² utilizzabili per l'offshore (2.932 km²), seguono le Marche (2.717 km²), Sicilia (1.772 km²), Sardegna (1.270 km²), Abruzzo (952 km²), Toscana (727 km²), Emilia Romagna (369 km²), Molise (292 km²) e Lazio (6 km²), per un totale di 11.686 km² da poter dedicare allo sviluppo eolico. Alle isole maggiori va la possibilità di contare su luoghi con una velocità del vento superiore (circa 7-8 metri al

secondo) rispetto alla media degli altri siti (6-7 m/s), mentre la Puglia appare essere una delle regioni più interessate allo sviluppo di parchi marini.

Tendenze ed evoluzione

La ricerca sta cercando di risolvere quello che attualmente è il maggior problema della produzione di energia dal vento: la discontinuità nella fornitura di energia a causa del regime incostante dei venti. Qui occorre fare una piccola premessa. La potenza efficiente lorda degli impianti eolici, espressa in MW, definisce la quantità di energia che può essere prodotta in un determinato lasso di tempo di funzionamento dell'impianto, ed è il parametro che viene considerato per confrontare tra loro le possibilità produttive dei generatori eolici. Tuttavia, occorre considerare, che per vari fattori, e, in primo luogo, l'incostanza del vento, un generatore eolico non funziona mai 24 ore su 24 per tutto l'anno, ma solo per un certo numero di ore: nei periodi durante i quali il vento spira con velocità troppo basse ($v < 5-4$ m/s) il generatore non produce energia, mentre quando la velocità del vento è troppo elevata ($v > 20-25$ m/s) gli impianti devono essere spenti per ragioni di sicurezza. Un fattore molto importante per la determinare la produttività degli impianti è quindi il numero di ore di esercizio: in Italia, gli impianti che funzionano per il maggior numero di ore lavorano in genere per circa 3.200 ore l'anno (cioè, per circa il 38 % del tempo, considerato che in un anno ci sono 8.760 ore), ma la media nazionale è ben più bassa, di circa 1.700 ore l'anno. Per ovviare a questo problema, e aumentare il numero di ore di utilizzo, la ricerca sta cercando di sviluppare rotor in grado di produrre energia e di funzionare in sicurezza anche con velocità dei venti molto basse o molto alte, ma vi sono dei limiti oltre ai quali non è possibile alcun ulteriore miglioramento, soprattutto per quanto riguarda l'efficienza a basse velocità.

Ambiente e territorio

Limiti e vantaggi del vento

Il vento in sé è abbondante, economico, inesauribile, ampiamente distribuito e l'energia eolica è una fonte rinnovabile che non produce alcuna emissione inquinante. Pertanto, soprattutto nell'ambito della produzione di energia elettrica, una sua maggiore diffusione può contribuire in maniera significativa alla riduzione delle emissioni dei cosiddetti "gas serra". Inoltre, rispetto a quella solare e a quella geotermica, l'energia eolica presenta il vantaggio di essere disponibile sotto forma meccanica e quindi facilmente trasformabile in elettricità. I generatori eolici, inoltre, non producono sostanze radioattive o chimiche inquinanti, dal momento che sono costituiti solo da materie plastiche e metalliche. Occorre anche considerare che l'energia prodotta da un aerogeneratore durante il corso della sua vita media (circa 20 anni per gli impianti *onshore* e più di 25 anni per gli impianti *offshore*), è circa 80 volte superiore a quella necessaria alla sua costruzione, manutenzione, esercizio, smantellamento e rottamazione. Si è calcolato che sono sufficienti due o tre mesi per recuperare tutta l'energia spesa per costruire l'aerogeneratore e mantenerlo in esercizio.

L'energia eolica presenta anche alcuni svantaggi. In primo luogo si tratta di una fonte intermittente su base stagionale e giornaliera. Per questo motivo installare 100 MW di turbine eoliche non significa avere a disposizione 100 MW di potenza in continuo, ma una potenza inferiore. La capacità annuale effettiva risulta essere pari al 45% di quella nominale nelle zone più ventose, attestandosi su una media del 30% a livello globale. In altre parole, per disporre di 100MW effettivi occorre installare 250 MW. Un altro problema da affrontare è costituito dalle reti di trasmissione e distribuzione dell'energia a cui sono collegati gli impianti eolici, che devono essere predisposte a ricevere un flusso elettrico intermittente a media tensione. Le reti di distribuzione attualmente presenti nei paesi industrializzati sono concepite in maniera opposta, poiché sono collegate a pochi grandi impianti di grande potenza con flussi di energia controllati e prevedibili. Il passaggio a una produzione di energia proveniente da molti impianti di piccola taglia, eolici e non solo, richiede adeguate e costose modifiche della rete di distribuzione elettrica.

Impatto visivo

L'impatto visivo di un aerogeneratore alto dai 40 ai 60 metri è evidente, ma può essere ridimensionato realizzando gli impianti a una certa distanza dai centri abitati più vicini. Oggi si tende a diminuire l'impatto visivo disponendo le macchine

su una sola fila e utilizzando i colori neutri (come il bianco). Il minor impatto ambientale-paesaggistico si ottiene anche collocando gli impianti in mare aperto oltre l'orizzonte visibile dalle coste. Sono comunque allo studio soluzioni costruttive meno visibili anche per le installazioni terrestri. Si può ricorrere al mimetismo di carattere cromatico che consiste nel rendere i colori delle torri eoliche simili a quelli del paesaggio circostante (per esempio la parte inferiore che si mimetizza con il verde della campagna, mentre la parte superiore gradatamente azzurra come il cielo), oppure al mimetismo delle forme integrando i sistemi eolici su strutture preesistenti.

Occupazione del territorio

Il terreno necessario per realizzare un impianto eolico è complessivamente vasto, dal momento che bisogna calcolare anche la distanza fra un generatore e l'altro. Da questo punto di vista, la densità di potenza (10 watt per metro quadrato) è piuttosto bassa. Se, però, si tiene conto del fatto che le macchine eoliche e le opere di supporto occupano solo il 2 - 3% del territorio, la densità cresce a centinaia di watt per metro quadrato e lo spazio tra una macchina e l'altra può comunque essere impiegato per l'agricoltura o la pastorizia.

Rumore

L'inquinamento acustico potenziale degli aerogeneratori è legato a due tipi di rumori: quello meccanico proveniente dal generatore e quello aerodinamico proveniente dalle pale del rotore. Per quanto riguarda il rumore, in termini di decibel, il ronzio degli aerogeneratori è ben al di sotto del rumore che si percepisce in città. Allontanandosi di trecento metri da una wind farm si rilevano gli stessi decibel che si avvertono normalmente stando nel traffico o nelle vicinanze di molte industrie. Attualmente comunque gli aerogeneratori ad alta tecnologia sono molto silenziosi. Si è calcolato che, ad una distanza superiore a circa 200 metri circa, il rumore della rotazione dovuto alle pale del rotore si confonde completamente col rumore del vento che attraversa la vegetazione circostante.

Effetti elettromagnetici

Le possibili interferenze ai danni di apparecchi di telecomunicazione sono poco rilevanti. Come qualsiasi ostacolo, infatti, anche la macchina eolica può interferire con la propagazione delle telecomunicazioni, ma un'adeguata distanza rende tale interferenza trascurabile.

Effetti su flora e fauna

Quanto alle possibili alterazioni di flora e fauna, sulla base delle informazioni disponibili, si è verificato che le possibili interferenze di qualche rilievo riguardano solo l'impatto dei volatili con il rotore delle macchine. In genere le collisioni sono rare e per lo più limitate ai rapaci. Gli uccelli migratori sembrano, invece, adattarsi alla presenza di questi ostacoli. Secondo la *US Fish and Wildlife Service* la prima causa di mortalità tra gli uccelli è da imputare ai gatti (circa un miliardo di esemplari all'anno), a seguire gli edifici (poco meno di un miliardo), i cacciatori (circa 100 milioni l'anno) e infine i veicoli, le torri per gli impianti di telecomunicazione, i pesticidi e le linee ad alta tensione (ciascuna categoria con un contributo che va da 60 a 80 milioni di esemplari l'anno); il contributo relativo agli impianti eolici risulta una frazione estremamente modesta.

L'impatto sulla vegetazione si verifica soprattutto in fase di realizzazione dell'impianto, con la costruzione delle strade e delle fondazioni, nonché con le movimentazioni dei materiali. Esistono delle misure per mitigare gli impatti sul territorio, ad esempio ripristinando la vegetazione al termine della fase di cantiere o compensando l'impatto con il miglioramento delle aree vicine per avere un bilancio complessivo positivo.

In conclusione, se si rispettano alcune accortezze nella fase di progettazione di una wind farm, tra tutte le industrie produttrici di energia, quella eolica è fra le più pulite e sicure. Durante il funzionamento non produce sostanze inquinanti, polveri e calore e anche dopo lo smantellamento tutto può tornare come prima, senza lasciare traccia né danni all'ambiente e alle persone.