

# Eolico

## 1. Quadro sintetico della tecnologia, degli impianti e delle macchine eoliche

La bassa densità energetica, dell'energia eolica per unità di area della superficie di territorio, comporta la necessità di procedere alla installazione di più macchine per lo sfruttamento della risorsa disponibile. Questo ovviamente non costituisce una preclusione agli impianti con macchina singola.

L'esempio più tipico di impianto eolico è costituito dalla wind farm (cluster di più aerogeneratori disposti variamente sul territorio, ma collegati ad una unica linea che li raccorda alla rete locale o nazionale).

La concezione della wind farm è legata allo sfruttamento della risorsa eolica e deve commisurarsi ad alcuni concetti base: risorsa accessibile, tecnicamente ed economicamente sfruttabile.

Ma soprattutto deve strutturarsi sulla base delle esigenze dell'utenza cui si riferisce.

Gli impianti possono essere sostanzialmente delle tipologie che seguono:

- A. Isolati
- B. In Cluster (in genere collegati alla rete di potenza o ad una rete locale con sistemi diesel);
- C. Combinati o Integrati

Le macchine eoliche sono classificabili in diversa maniera e cioè in funzione della tipologia di energia sfruttata, della posizione dell'asse di rotazione, della taglia di potenza, del numero di pale etc.

Abbiamo così:

- I. in funzione dell'energia sfruttata
- II. in funzione della posizione dell'asse di rotazione
- III. in funzione della taglia di potenza
- IV. in funzione della velocità del rotore
- V. in funzione del numero di pale
- VI. in funzione della regolazione

Altre variabili utili alla classificazione riguardano per esempio la tipologia della torre (metallica tubolare o a traliccio, in cemento) ed il tipo di progetto delle macchine soft o hard in funzione della rigidità del rotore, ma riguardano in genere le macchine ad asse orizzontale. Esiste oggi una ulteriore classificazione in macchine a velocità variabile o a velocità fissa ed, inoltre, in funzione del tipo di generatore elettrico:

In questa ultima ripartizione esistono macchine che posseggono *due generatori* e macchine con generatori a *numero di coppie polari variabili*.

Ancora, esistono macchine dotate di inverter e macchine che ne sono prive.

Dal punto di vista della *linea d'assi: con o senza moltiplicatore del numero di giri*.

Gli impianti eolici di potenza sono sostanzialmente costituiti dalle wind farm con cluster più o meno densamente popolato.

Dall'esame di diversi esempi di parchi eolici, diversi per disposizione delle macchine e per densità di popolazione del cluster delle stesse, risulta un gran numero di tipologie possibili che, tuttavia possono raggrupparsi in un insieme discreto di cui quelle che seguono sono le principali componenti:

- A. disposizione su reticolo quadrato o romboidale;
- B. disposizione su una unica fila;
- C. disposizione su file parallele;
- D. disposizione su file incrociate (croce di S. Andrea);
- E. disposizione risultante dalla combinazione e sovrapposizione delle precedenti tipologie;
- F. apparentemente casuale;

la prima tipologia è caratteristica delle installazioni più vecchie (specie in USA), mentre l'ultima è caratterizzata da disposizioni in pianta secondo linee e figure molto articolate e si presta alle installazioni in ambiente "*complex terrain*" (cioè con orografia complessa).

Le file possono risultare con un minor numero di elementi in larghezza nella forma detta di "*pine-tree array*". La centrale di Alta Nurra (Sardegna) appartiene alla tipologia "E" ("C" con sovrapposizione di "D").

La interdistanza fra gli aerogeneratori può variare da (3-5)D a (5-7)D a seconda se si tratti della distanza entro la fila o tra file diverse.

Al fine di completare l'exkursus sulle macchine eoliche, vale la pena di elencare, con un approccio da "teoria dei sistemi", le componenti dell'intero aerogeneratore, guardando ai sistemi e sottosistemi dello stesso. Ne risulta l'elenco che segue:

- A. sistema della "Torre" e delle fondazioni o *struttura di sostegno*;
- B. sistema "Navicella" o *struttura di alloggiamento o contenimento*;
- C. sottosistema di orientamento;
- D. sottosistema di protezione esterna;
- E. sistema "Rotore";
  - i. sottosistemi del rotore;
  - ii. il moltiplicatore di giri;
  - iii. il generatore elettrico;
  - iv. il sottosistema di regolazione;
  - v. il sistema di attuazione;
  - vi. il freno;
- F. sistema di controllo macchina;
- G. sistema connessione alla rete o *sistema di collegamento*.

## 2. Stato dell'arte

La tab. 1 che segue riporta lo sviluppo attuale (aggiornato alla fine del 1999) degli impianti eolici installati nel Mondo con le previsioni per l'anno 2000.

Tab. 1

ANDAMENTO DELLA POTENZA EOLICA INSTALLATA PER AREE GEOGRAFICHE		
Ripartizione Geografica (con previsione al 2000)		
Anno	<i>Mondo</i>	<i>Europa</i>
1980	10,00	
1981		
1982	80,00	10,00
1983	300,00	35,00
1984	700,00	50,00
1985	1.020,00	80,00
1986	1.500,00	
1987		
1988	1.700,00	
1989	1.800,00	328,00
1990	1.930,00	473,10
1991		665,70
1992		883,30
1993	3.200,00	1.253,10
1994	3.738,00	1.723,00
1995	4.820,00	2.531,00
1996	5.734,00	3.445,00
1997	7.636,00	4.694,00
1998	9.600,00	6.303,00
1999	13.250,00	8.959,00
2000	<b>17.614,50</b>	<b>11.216,60</b>

N.B.: I valori figuranti in corsivo sono stati dedotti attraverso la stima della potenza installata nel singolo anno successivo; i valori figuranti in grassetto e corsivo costituiscono una previsione sulla base di dati forniti dalla IEA ed EWEA; i dati raccolti nella tabella sono tratti da fonte IEA, EWEA, ISES (v. Bibliografia)-

La tab. 2 successiva riporta i dati delle installazioni nei principali paesi che sfruttano le tecnologie eoliche.

Tab. 2

VALORI DELLE POTENZE INSTALLATE NEI DIECI PRINCIPALI PAESI DEL MERCATO EOLICO MONDIALE				
Continente	Nazione	P installata al 1998 (MW)	P installata al 1999 (MW)	Diff. (%)
Europa	Germania	4.444	2.875	54,57
	Spagna	1.180	707	66,90
	Danimarca	1.700	1.441	17,97
America N.	Italia	180	281	-35,86
	Grecia	121	39	210,26
	Olanda	409	340	20,29
	USA	2.502	1.770	41,36
Asia	Cina	300	224	33,93
	India	1.077	1.015	6,11

N.B.: Fonte EWEA e AWEA [in Wind Directions, v. XIX, n° 3, March 2000, p. 6c]

Nella tab. 3 figura una sintesi, sempre aggiornata al 1999, relativa agli impianti italiani.

*Una doverosa precisazione si deve fare a proposito di quest'ultima tabella: essa prescinde dalle variazioni di denominazione eventualmente verificatesi a carico di alcuni degli Enti proprietari delle singole wind farm.*

Tali variazioni, legate prevalentemente, alla evoluzione dei mercati finanziari e/o alla creazione di nuovi soggetti giuridici necessitano di verifiche al momento in corso.

Tab. 3

Wind farm italiane esistenti alla fine del 1999			
Wind farm	Ente Proprietario	Potenza Installata (kW)	Potenza effettiva (kW)
Alta Nurra	ENEL	2.970	400
Monte Arci	ENEL	10.880	10.880
Acqua Spruzza (IS)	ENEL	2.440	2.300
Bisaccia (AV)	Regione Campania	2.400	0
Bisaccia (AV)	Alenia Rei	640	0
Bisaccia (AV)	Com. Montana Penisola Sorrentina	640	640
Monte Uccari	Consorzio di Bonifica della Nurra	1.600	1.600
Palena (CH)	Cons. del Sangro	1.285	1.285
Campanedda	Consorzio di Bonifica della Nurra	1.000	1.000
Ottava	Consorzio di Bonifica della Nurra	1.000	1.000
Brunestica	Consorzio di Bonifica della Nurra	960	960
Carloforte (CA)	S.E.A.	960	960
Villacidro	Cons. Ind.le	1.770	1.770
Villagrande	Comune	640	640
Tocco da Casauria (PE)	Comune (RWP e ora Edison)	400	400
Frosolone (IS)	Comunità Montana del Sannio	320	320
Oriстано (OR)	Cons. Ind.le	320	0
Collarmente (AQ)	Marsica Gas	1.750	1.750
Assermini	Air Liquide Italia	225	225
Frontone	ANAS	216	0
San Simone	Cons. di Bonifica Sardegna	200	200
Villa Favorita	Soc. Villa Favorita	150	150
Ostuni (BR)	Massari	150	150
Collarmente (AQ)	ENEL	9.100	9.100
Montefalcone Val Fortore	IVPC S.r.l.	25.800	25.800
San Giorgio La Molara	IVPC S.r.l.	19.800	19.800
Molinara	IVPC S.r.l.	14.400	14.400
San Marco dei Cavoti	IVPC S.r.l.	11.400	11.400
Baselice	IVPC S.r.l.	7.200	7.200
Fosano Val Fortore	IVPC S.r.l.	5.400	5.400
Sant'Agata di Puglia	IVPC S.r.l.	25.200	25.200
Monteleone	IVPC S.r.l.	16.800	16.800
Ansano di Puglia	IVPC S.r.l.	7.200	7.200
Rocca San Felice	IVPC S.r.l.	2.400	2.400
Alberona	IVPC S.r.l.	36.000	36.000
Casone Romano (FG)	NCD	1.200	1.200
Persano (SA)	Acquara	1.100	1.100
Sale delle Langhe	Agricon	150	150
Accadia (FG)	Lucky Wind	10.800	10.800
Rocchetta S. Antonio	Edison Energie Speciali	5.250	5.250
Casone Romano (FG)	Riva-Calzoni	2.600	2.600
Mazara del Vallo (TP)	Sicil Marin	600	600
Castelfranco di Miscano (BN)	Filippo Sanseverino S.r.l.	30.000	30.000
San Benedetto Val di Sambro (BO)	Riva WP & Sistemi Energia	3.500	3.500
Fosano Val Fortore	Riva WP & ISMES	2.800	2.800
San Giorgio La Molara	Riva WP	10.000	10.000
Lamezia Terme	Consorzio Industriale	640	640
Celle San Vito (FG)	RWP	3.150	3.150
Fossato di Vico (PG)	Comune	1.500	1.500
	<b>Total</b>	<b>286.906</b>	<b>280.620</b>

### 3. Applicazioni

Le principali applicazioni riguardano, nel caso delle piccole macchine, aerogeneratori o aeromotori installati come sistemi **isolati a servizio** di una utenza isolata (per esempio una aeropompa azionata da un motore elettrico, nel caso dell'aerogeneratore, o una aeropompa, propriamente detta, ed in genere lenta nel caso dell'aeromotore).

Nel caso delle macchine di media e grande taglia, l'applicazione tipica è in **cluster** (in genere collegati alla rete di potenza o ad una rete locale con sistemi diesel), ed è questo il caso delle grandi wind farm americane ed europee e, più di recente, italiane.

Le wind farm nel Nostro Paese, dopo qualche esempio realizzato in aree pianeggianti (Alta Nurra), si stanno sviluppando in aree appenniniche anche al di sopra di 1.000 m s.l.m. In un prossimo futuro potrebbero aversi anche centrali off-shore su fondali non oltre i 10 m e entro 1-2 km dalla linea della costa.

#### 4. Potenzialità

Per valutare le potenzialità di sfruttamento della fonte eolica non è fuori luogo mostrare un raffronto con altre tecnologie basate sulle fonti rinnovabili: è quanto viene fatto nella tab. 4 che segue.

**Tab. 4**  
SCENARIO PER SVILUPPO DEI SETTORI-CHIAVE (1999-2003)

Settore	Iniziative della Campagna Take-Off	Stima capacità installata	Stima investimenti totali(mld di Euro)	Sostegno medio del settore pubblico (%)
<b>ENERGIA SOLARE</b>	650.000 sistemi FV in U.E. 350.000 sistemi FV nei PVS	650 MW 350 MW	2,85(2,45)	45% -
	15 milioni m <sup>2</sup> di collettori solari	15 Mm <sup>2</sup>	4,7	15%
<b>ENERGIA EOLICA</b>	10.000 MW di turbine eoliche	10.000 MW	10,1	20%
<b>ENERGIA DA BIOMASSE</b>	10.000 MW per produzione combinata calore ed elettricità	10.000 MW	5,5	30%
	1.000.000 abitazioni riscaldate con biomassa	10.000 MWt	4,4	10%
	1.000 MW di installazioni biogas	1.000 MW	1,2	25%
	5 milioni di t di biocombustibili	5 milioni di t	1,25	50%
<b>TOTALE</b>			<b>30 mld Euro</b>	

Fonte: Campaign for the Take-Off (documento elaborato dal Consiglio Europeo, 8 Giugno 98 )

Così come la tab. 5 mostra alcune possibili evoluzioni stimate in termini di potenza installata.

Tab. 5

<b>Previsioni riguardo alla potenza delle centrali italiane</b>			
<i>Anno</i>	<i>PEN (88)</i>	<i>APER (1998)</i>	<i>Secondo la formula (1)</i>
2000	600		431,84
2001			633,49
2002			902,16
2003			1249,94
2004		900	
2010		2000	

## 5. Aspetti economici

Attualmente, in Italia, il *costo di installazione*, ipotizzando l'impiego di aerogeneratori da almeno 600 kW di potenza nominale, si può ritenere compreso fra un minimo di 1.650.000 ed un massimo di 2.500.000 €/kW andando da siti *pianeggianti* a siti caratterizzati da *orografia complessa*. Il costo della macchina può ritenersi, prudenzialmente, compreso fra 2/3 e 3/4 del costo totale di installazione in funzione delle caratteristiche orografiche del sito. Quando saranno disponibili rilevazioni di mercato ufficiali anche in Italia sarà possibile fornire indicazioni più precise. Attualmente, in linea di principio, può dirsi che una centrale da circa 10 MW, allacciata quindi alla rete elettrica in AT, potrebbe avere un costo di realizzazione compreso fra i 16 e i 25 miliardi di lire in funzione dell'orografia del sito. Applicazioni sempre in rete ma allacciate a quella di MT (impianti con potenza di circa 2-3 MW) potrebbero avere un costo di realizzazione compreso tra 1,8 e 2,1 miliardi di lire per MW installato. Il costo di produzione varia in funzione della taglia delle macchine e della ventosità del sito. Dopo essere stato, nel corso degli ultimi anni, a livelli di 85 - 141 €/kWh, stime più recenti lo indicherebbero in un range compreso fra 65 e 85 €/kWh. Presto il costo del kWh da fonte eolica, potrebbe raggiungere anche le 55 €/kWh divenendo così confrontabile con quello proveniente dagli impianti turbogas. Bisogna ricordare che l'energia prodotta varia con il cubo della velocità del vento, il costo del kWh prodotto dipende fortemente dalla ventosità del sito e quindi la sua scelta è fondamentale e deve basarsi su una corretta campagna anemologica.

Oggi, sulla base di valutazioni economiche e tecniche, si comincia a parlare di "*valore*" dell'energia elettrica da fonte eolica, in contrapposizione ai "*costi*", per meglio specificare il ruolo degli impianti eolici nel sistema energetico d'un paese.

Alcuni degli elementi costitutivi del *valore* si possono evincere nel paragrafo 6.

## 6. Impatto ambientale degli impianti eolici

Gli impianti eolici producono un impatto sull'ambiente estremamente limitato e fondato sui seguenti fattori di impatto:

1. occupazione del territorio;
2. variazione al paesaggio;
3. emissioni acustiche;
4. interferenze elettromagnetiche;
5. disturbo all'avifauna stanziale e migratoria;
6. produzione di energia da immettere direttamente sulla rete locale (*impatto positivo*);
7. disponibilità di potenza direttamente vicino ai centri di carico locali (*impatto positivo*);
8. emissioni inquinanti evitate dalla sostituzione di una quota parte del parco termoelettrico (*impatto positivo*).

Di questi fattori solo i primi due possono in qualche modo considerarsi particolarmente significativi e provati. Tuttavia il fattore rappresentato dall'*occupazione del suolo* di fatto non esclude gli altri usi del territorio in quanto solo l'1-2% del territorio occupato dalla wind farm è materialmente indisponibile per l'esistenza stessa delle macchine.

Gli impianti eolici, insieme agli impianti idraulici (anche di piccola taglia), sono gli unici in grado di sostituire quote significative di impianti basati su fonti fossili, per cui per ogni unità di energia elettrica prodotta verrebbero risparmiati quantitativi di emissioni come da tab. 6 (fattori di emissioni per tipologia di impianto a fonte fossile).

Tab. 6

Tipo di centrale	Tipo di combustibile	Specie Inquinanti					P.S.T.	Note
		SO2	NOx	CO	CO2			
ENEL (T.V.)	mix (T.V.)	9,42	3,23			0,43	CLES S.r.l. (1988)	
UNAPACE (Cogen.)	mix (Cogen.)	4,69	1,88			0,18	CLES S.r.l. (1988)	
ENEL (T.V.)	carbone (1% S)	6,3	4,4		1000	3	Agostini & Bianchi (93)	
	ATZ (3% S)	13,8	2,9		700	0,5	Agostini & Bianchi (93)	
	BTZ (1% S)	4,6	2,9		700	0,5	Agostini & Bianchi (93)	
ENEL (T.G.)	vario (*)	1,4	2,5		1000	0,18	Agostini & Bianchi (93)	
ENEL (T.G./T.V.)	gas		2,8		500	0,1	Agostini & Bianchi (93)	
N.B.: La tabella riporta i cosiddetti "rapporti di emissione" in g/kWh.								
P.S.T. è la sigla di "particelle solide totali", anche indicate come "particolato".								
Composizione del Mix "T.V.": olio=34,18% - gas=44,62% - altro=20,33%;								
Composizione del Mix "Cogen.": olio=60,2% - gas=17,0% - carbone=21,8% - lignite=0,8% - altro=0,2%;								
[dati tratti da CLES S.r.l. (1988)].								
(*) Si tratta del Mix per le centrali policombustibile.								
Per centrali termoelettriche a recupero sfruttanti biomasse si sono portate in conto le seguenti emissioni								
Combustibile	Tenore di O2	Specie Inquinanti					P.S.T.	Note
		SO2	NOx	CO	CO2			
Culture energetiche	11%	300	250	250		40	come fumi secchi	
Combustibile	Tenore di O2	Specie Inquinanti			Note			
		COT	HCl	Ceneri				
Culture energetiche	11%	40	50	5 - 15 %	come fumi secchi			
N.B.: I valori per le biomasse son espressi in "mg/Nmc" a parte le "ceneri".								